

621.38

M49

**Pak S.S., Gulyamova S.T.,
Maxmudov M.M., Rashidova A.A.**

MIKRO VA NANOELEKTRON ASBOBLAR VA QURILMALAR

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLYI VA O‘RTA MAXSUS TA‘LIM VAZIRLIGI**

**S.S.Pak, S.T.Gulyamova,
M.M.Maxmudov, A.A.Rashidova**

**MIKRO VA NANOELEKTRON
ASBOBLAR VA QURILMALAR**

*O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta‘lim vazirligi
tomonidan darslik sifatida tavsiya etilgan*

**«HISTORY AND PAGE»
Toshkent – 2022**

UO'K: 621.382 (075)

KBK: 371.72

Pak S.S., Gulyamova S.T., Maxmudov M.M., Rashidova A.A Mikro va nanoelektron asboblari va qurilmalar: Darslik. – Toshkent: 2022. – 212 b.

Darslikda mikro va nanoelektronik asboblari va qurilmalarining ishlashining asosiy va fizik tamoyillari o'rganilgan, mikro va nanoelektronikaning hozirgi holati va rivojlanish istiqbollari tasvirlangan, asosiy e'tibor nanoelektronikaning aniq asboblari va qurilmalarida zamonaviy ilm-fan yutuqlariga qaratilgan. Darslik "5310800 - Elektronika va asbobsozlik" (asbobsozlik) yo'nalishi bo'yicha "Mikro va nanoelektronik asboblari va qurilmalar" fanining O'zbekiston Respublikasi oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi ta'lim standartining tasdiqlangan o'quv rejaları va dasturlari talablarga javob beradi va oliy o'quv yurtlarining bakalavriat talabalari uchun mo'ljallangan bo'lib, magistrlar va doktorantlar uchun ham foydali bo'lishi mumkin.

В учебнике рассматриваются основные и физические принципы работы приборов и устройств микро и нанoelektronики, описано современное состояние и перспективы развития микро и нанoelektronики, основное внимание уделено достижениям современной науки в конкретных приборах и устройствах нанoelektronики. Учебник соответствует требованиям утвержденных учебных планов и программ образовательного стандарта министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан по направлению «5310800 - Электроника и приборостроение» (приборостроение), дисциплине «Микро и нанoelektronические приборы и устройства» и предназначено для студентов бакалавриата высших учебных заведений, а также может быть полезным студентам обучающихся в магистратурах и докторантам.

The textbook discusses the basic and physical principles of operation of devices and devices of micro- and nanoelectronics, describes the current state and prospects for the development of micro and nanoelectronics, focuses on the achievements of modern science in specific devices and devices of nanoelectronics. The textbook complies with the requirements of the approved curricula and programs of the educational standard of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan in the direction "5310800 - Electronics and instrumentation" (instrument engineering), the discipline "Micro and nanoelectronic devices and devices" and is intended for undergraduate students institutions of higher education, and can also be useful for students studying in master's programs and doctoral students.

Taqrizchilar:

Umirzakov B.B. – TDTU, "Umumiy fizika" kafedrası professorı, f.-m.f.d;

Isaxanov Z.A. – "Ion plazma va lazer texnologiyalari" instituti professorı, f.-m.f. doktori.

O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligining 2022-yil 13-maydagi 166-sonli buyrug'iga asosan darslik sifatida nashrga tavsiya etilgan.

ISBN 978-9943-8560-6-6

© Toshkent davlat texnika universiteti, 2022.
© «HISTORY AND PAGE» nashriyoti, 2022.

KIRISH

Mikroelektronika integral sxemalar (IS) va ular asosidagi radioelektron apparaturalarni tadqiq qilish, konstruksiyalash va ishlab chiqarishni o'z ichiga olgan elektronikaning zamonaviy yo'nalishi hisoblanadi. Mikroelektronikaning asosiy vazifasi yuqori ishonchlilik va takrorlanuvchanlik, past energiya iste'moli va yuqori funksional murakkablikka ega bo'lgan kichik o'lchamli apparaturani yaratish hisoblanadi.

Konstruksiyalash va texnologiyalardagi yutuqlar yagona texnologik siklda mahsulotlar tarkibidan elektr radiodetallar va asboblarni to'liq yoki qisman chiqarib tashlash imkonini beradigan butun funksional tugunlarni ishlab chiqarishga imkon berdi.

Mikroelektronikaning eng muhim texnologik usullaridan biri bitta plastinada o'zaro sxematik bog'langan elementlar guruhlarini yaratishga imkon beradigan integral texnologiya hisoblanadi. Integral texnologiyadan foydalanish bilan bir vaqtning o'zida parametrlari bo'yicha bir xil ko'p sonli funksional tugunlarni ishlab chiqarishga imkon beradigan yuqori unumdor avtomatlashtirilgan qurilmalarda sxemalarni tayyorlash mumkin.

Integral texnologiya bo'yicha bajarilgan funksional tugunlar **integral mikrosxemalar (IMS)** yoki oddiy **mikrosxemalar (MS)** deyiladi.

Integral mikrosxemalarning diskret komponentlardagi o'xshash sxemalarga nisbatan asosiy afzalliklari kichik o'lchamlar, kichik vazn va oshirilgan mexanik puxtalik hisoblanadi. Ularni ishlab chiqarishda yuqori samarador avtomatlashtirilgan qurilmalardan foydalanish hisobiga kam xarajatlarni talab qiladi, komponentlar parametrlarining bir xilligi tufayli qo'l mehnatini sezilarli darajada kamaytirish va sxemalarning eng yaxshi xarakteristikalarini olish mumkin. Kavsharlangan ulanishlar sonining kamayishi, texnologik operatsiyalarni avtomatlashtirish va yagona texnologik siklda tayyorlangan alohida elementlarning ishdan chiqish ehtimolligini kamayishi hisobiga oshirilgan ishonchlilikka ega bo'linaadi. Bunday asboblarni ishlatishda katta xarajatsiz takrorlash kiritilishi mumkin, bu ularning ishlash ishonchliligini oshiradi.

Shuni alohida ta'kidlash kerakki, mikroelektronikada diskret komponentlarda bajarilgan elektron tugunlardagi kabi o'sha nazariy qoidalar ishlatiladi. Biroq, uning rivojlanishi bilan alohida funksional tugunlar va qurilmalarning sxematik yechimlariga yondashishlar o'zgardi. Integral texnologiyada aktiv komponentlar sonining sezilarli ortishi mahsulot

tannaxini sezilarli o'zgartirmaydi. Shuning uchun qo'shimcha aktiv yoki passiv elementlarni kiritish yo'li bilan har qanday parametrlarni yaxshilash imkoniyatidan foydalaniladi.

IMSlarning prinsipial sxemalari diskret komponentlarda bajarilgan o'z o'xshashlariga qaraganda sezilarli murakkab.

Mikroelektronika qattiq jismning yarimo'tkazgichlik xossalari elektromagnit to'lqinlarni ro'yxatdan o'tkazish uchun A.S. Popov tomonidan foydalanilgan 1895 yil 7 mayda boshlangan yarimo'tkazgichli elektronikani rivojlanishining davomi hisoblanadi. Integral sxemalarning birinchi ishlanmalari 1958 - 1960 yillarga to'g'ri keladi. 1961-1963 yillarda qator Amerika firmalari eng oddiy ISlarni ishlab chiqarishni boshladi. Shu bilan birga, yupqa qatlamli ISlar ishlab chiqildi. Ammo elektr xarakteristikalari bo'yicha barqaror yupqa qatlamli aktiv elementlarni ishlab chiqishdagi ba'zi muvaffaqiyatsizliklar asosan gibrid ISlarni ishlab chiqishga olib keldi. Ichki ISlar 1962 - 1963 yillarda paydo bo'ldi. Birinchi mahalliy ISlar "Foton" ISHB Toshkent elektron asboblari zavodi konstruktorlik byurosida ishlab chiqilgan (K140UDI operatsion kuchaytirgichlari). Ular tekis epitaksial-diffuzion texnologiya bo'yicha tayyorlangan. Bu sxemalar G'arb ishlanmalardan kam emas edi.

Rivojlanish tarixi. Tarixiy jihatdan mikroelektronikaning rivojlanishini 5 bosqichlarga bo'lish mumkin. 60- yillarning birinchi yarmiga to'g'ri keladigan **birinchi bosqich** kristallga 100 ta elementgacha bo'lgan ISni integratsiyalanishi darajasi va 10 mkm tartibdagi elementlarning minimal o'lchamlari bilan tavsiflanadi.

60- yillarning ikkinchi yarmi va 70-yillarning birinchi yarmiga to'g'ri keladigan **ikkinchi bosqich** 100 dan 1000 gacha elementlar/kristallga ISni integratsiyalanishi darajasi va elementlarning 2 mkm gacha minimal o'lchamlari bilan tavsiflanadi.

70- yillarning ikkinchi yarmida boshlangan **uchinchi bosqich** 1000 dan ortiq elementlar/kristallga integratsiyalanish darajasi va elementlarning 1 mkm gacha minimal o'lchamlari bilan tavsiflanadi.

To'rtinchi bosqich 10 000 dan ortiq elementlar/kristallga integratsiyalanish darajasi va elementlarning 0,1 - 0,2 mkm o'lchamlariga ega bo'lgan birlashish darajasiga ega bo'lgan o'ta katta ISlarni ishlab chiqish bilan tavsiflanadi.

Beshinchi, zamonaviy bosqich katta va o'ta katta ISlar asosida ishlab chiqilgan mikroprotssessorlar va mikrokompyuterlarning keng qo'llanilishi bilan tavsiflanadi.

XXI asrning boshi mikroelektronikadan nanoelektronikaga mantiqiy o'tishni belgilaydi. Bularning barchasidan shu kelib chiqadiki, mikroelektronika rivojlangan mikroelektron industriyasiga aylanmaydi. Mikroelektronika abadiy qoladi, chunki usiz dunyo mavjud bo'la olmaydi.

Nanoelektronikada hali ham mukammal texnologik liniyalarni yaratishni, samarali qurilmalarni yaratishni o'rganish kerak.

Bunga parallel ravishda nanomexanika, nanooptika, nanotexnologiya kabi yangi bilimlar tarmoqlari rivojlanmoqda.

Tahlilchilarning fikricha, mamlakatni muvaffaqiyatli rivojlanishining asosiy omili yuqori texnologiyalarning jadal rivojlantirish hisoblanadi. Aynan mikroelektronika va nanotexnologiyalar hozirgi zamonning eng ilg'or texnologiyalari hisoblanadi.

Jadal rivojlanayotgani jahon elektronika sanoati yuqori unumdor intellektual elektron qurilmalarning yaratilishiga olib keldi, ularga talab uzluksiz ortib bormoqda. Ammo, shu bilan birga, mikroelektronikaning rivojlanishi bilan, ishlab chiqarish tannarxini oshishi, keyingi o'lchamlarni kamaytirishni ta'minlash, energiya sarfini kamaytirish va boshqa muammolar vujudga keladi.

XXI asr boshlarida elektronikani rivojlanishining asosiy yo'nalishlaridan biri "Atrofdagi ong" (Ambient Intelligence) nomini olgan yo'nalish edi. Bu axborot texnologiyalarining yangi yo'nalishi bo'lib, u foydalanuvchidan yashirilgan, insonlarning maishiy hayotdagi odatdagi amallarini soddalashtirish bilan ularning ehtiyojlari, odatlari va imoishoralariga javob bera oladigan qurilmalar tarmog'i bo'lgan raqamli muhitni nazarda tutadi. Hajmlarini kichrayishi bilan bunday qurilmalar atrofdagi muhitga tobora osonlik bilan qo'shib ketadi, axborot aloqalari takomillashadi va natijada umumiy foydalanuvchiga faqat boshqaruv interfeyslari mumkin bo'ladi.

Simsiz kommunikatsion tizimlarining rivojlanishi ko'p funksiyalikni oshirilishi, chastotalar diapazonini kengaytirilishini, bu masalalarni yechilishi uchun ishlatiladigan mikroelektron qurilmalarning energiya sarfini kamaytirilishini talab qiladi.

Transportni rivojlanishi yo'nalishlari, yangi konstruktiv yechimlar va materiallari asosida bajarilgan zamonaviy dvigatellardan foydalanish elektron qurilmalarning kengaytirilgan haroratlar diapazonlarida va hajm bo'yicha kichik maydonlarda ishlash talablarini qo'yadi.

Shubhasiz, yangi elektron innovatsiyalarning yetakchi kuchi hayot faoliyati jarayonlarini nazorat qiladigan turli maqsadlardagi intellektual

datchiklar va registratorlardan boshlab butun davolash -diagnostika komplekslari bilan tugaydigan sog'liqni saqlash sohasi ham hisoblanadi.

Elektronika bozori tez rivojlanmoqda va ishlab chiqaruvchilar unda o'z o'rmini egallash imkoniyatini qo'ldan boy bermasligi juda muhim. Biroq, intellektual tizimlarning joriy etilishi yanada katta o'chamlarni kichraytirish zarurligini belgilab beradi, bu faqat "kristalldagi tizim" (KT) sinfidan foydalanishda mumkin bo'ladi.

1 BOB. MIKROELEKTRONIKANING ASOSIY TAMOYILLARI VA TUSHUNCHALARI

1.1. Asosiy atamalar va ta'riflar, integral mikrosxemalar va ularning tasniflanishi

1.1.1. Asosiy atamalar va ta'riflar

Mikroelektronika integral guruhli texnologiya asosida ishlab chiqariladigan minimal bo'lishi mumkin o'lchamlar va yuqori ishonchlilikka ega bo'lgan elektron qurilmalarni ishlab chiqish, ishlab chiqarish va ulardan foydalanish bilan shug'ullanadigan elektronikaning bo'limi hisoblanadi.

Integral texnologiya yagona texnologik jarayonda ko'p sonli mahsulotlarni ishlab chiqarish usullari hisoblanadi.

Texnologiyaning guruhli usullari ko'p sonli turli, lekin ma'lum xususiyatlariga ko'ra guruhlangan mahsulotlarning ishlab chiqarish uchun kam sonli texnologik usullardan foydalanish hisoblanadi.

Elektron texnika (radiotexnika, kompyuter texnologiyalari) mahsulotlarini yig'ishda integratsiyalash usullariga quyidagilar kiradi:

a) sirtga o'rnatish (sxemaning har bir elementi va bog'lovchi o'tkazgichlari alohida kavsharlanadi va ustunlarga mahkamlanadi);

b) bosma platalar (ulash simlari dielektrik asosda bosma tuzilma shaklida yasalgan, sxemaning elementlari plataning teshiklariga kavsharlanadi);

s) gibrid integral sxemalar (nafaqat ulash o'tkazgichlari, balki rezistorlar va kondensatorlar ham dielektrik asosga changlatish yoki kuydirish yo'li bilan tayyorlanadi, aktiv elementlar osma elementlar sifatida kavsharlanadi);

d) integral sxemalar (sxemaning barcha elementlari integral texnologiya usulida tayyorlanadi).

Birinchi uchta usullar qo'lda yig'ishni talab qiladi. Integral sxemalarni tayyorlashda qo'lda yig'ish mumkin emas, unga faqat korpusga tayyor integral sxemani o'rnatishda ruxsat etiladi.

Mikroelektronika asosan integral sxemalar bilan shug'ullanadi. Mikroelektronika odatda quyidagi ikki qismlarga bo'linadi:

- integral elektronika;
- funksional elektronika.

Integral elektronika tarkibida bitta texnologik jarayonda bitta kristallda bajarilgan ko'p sonli tranzistorlarga (rezistorlar va sxematexnikaning boshqa elementlariga) ega bo'lgan ISlarning ishlash prinsipi, konstruksiyalash va tayyorlash haqidagi ma'lumotlarni umumlashtiradi. Integral elektronikada ma'lumotlarni tashuvchi bo'lib elektr toki yoki elektr potentsiallar farqi xizmat qiladi. ISlarning asosi bo'lib kremniy yoki $A^{III}V^V$ birikmalarining kristallari (masalan, galliy arsenidi) xizmat qiladi. Hozirgi vaqtda o'ta o'tkazgichlar yoki segnetoelektriklar asosidagi ISlarni ishlab chiqish bo'yicha tadqiqotlar olib borilmoqda. Biroq, bugungi kunda ISlarning 90% dan ortig'i kremniy asosida tayyorlanadi. So'nggi vaqtlarda o'ta yuqori chastotalarda (O'YUCH) signallarga ishlov berishga yo'naltirilgan mikroelektronika sanoati jadal rivojlanmoqda. Mikroelektronikaning bu tarmog'i O'YUCH mikroelektronika nomini oldi.

Funksional elektronika asosi bo'lib katta hajmdagi ma'lumotlar to'planishi, saqlanishi va ishlov berilishi mumkin bo'lgan aktiv muhit xizmat qiladigan qurilmalarning ishlash prinsipi, konstruksiyalash va tayyorlashi haqidagi ma'lumotlarni umumlashtiradi. Funksional elektronika qurilmalarida (FEQ) ma'lumotlarni tashuvchi sifatida dinamik bir jinslimasliklar - zaryadlar to'plamlari, magnit domenlari, turli tabiatdagi to'liqlarning to'liqin paketlari xizmat qiladi.

1.1- va 1.2-rasmlarda XX asrning ikkinchi yarmida va XXI asrning boshlarida elektronika va mikroelektronikaning rivojlanishi haqida tasavvur beradigan haqida tasavvur beradigan grafiklar keltirilgan. 1.1-rasmda quyidagi belgilashlar qabul qilingan:

EVA - elektrovakuumli asboblari; DYAO'A- diskret yarimo'tkazgichli asboblari; BT IS - bipolyar tranzistorlardagi integral sxemalar; MT IS - maydon tranzistorlardagi integral sxemalar; FEQ - funksional elektronika qurilmasi.

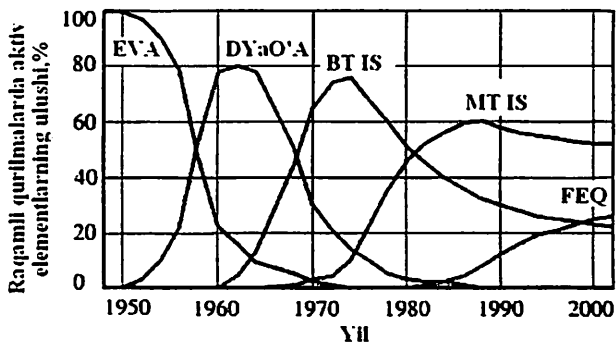
Bitta ISdagi elementlar sonining eksponensial ortishi eksponenta bo'yicha amalga oshiriladi, u odatda Mur qonuni deb ataladi (1.2-rasm).

Bugungi kunda ISlar 10^6 dan yuqori elementlarni o'z ichiga olishi mumkin.

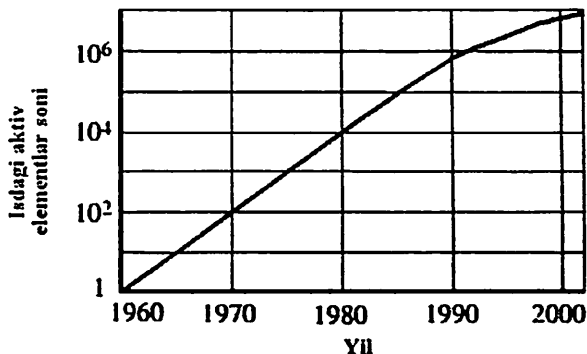
Yuqori integratsiyalanish darajasiga ega bo'lgan ISlar zamonaviy hisoblash mashinalarining kichik o'lchamlari va yuqori unumdorligini ta'minlaydi.

Integral sxema ma'lum signallarni o'zgartirish, ishlov berish, ma'lumotlarni to'plash funksiyalarini bajaradigan va sinovlar, qabul qilish,

yetkazib berish va ishlatishga talablar nuqtai nazaridan yagona sifatida qaraladigan elektr bog‘langan elementlarning (yoki elementlar va komponentlarning) yuqori zichligiga ega bo‘lgan mikroelektron mahsulot hisoblanadi.



1.1-rasm. Yillar bo‘yicha raqamli qurilmalar tarkibidagi aktiv elementlarning ulushi



1.2-rasm. Yillar bo‘yicha bitta integral sxema tarkibidagi aktiv elementlarning soni

Element mustaqil mahsulot sifatida ajratib bo‘lmaydigan elektr radioelementining funksiyasini bajaradigan integral sxemaning bir qismi hisoblanadi. Radioelement deganda tranzistor, diod, rezistor, kondensator va boshqalar tushuniladi. Elementlar murakkabroq funksiyalarni ham, masalan, mantiqiy (mantiqiy elementlar) yoki ma’lumotlarni saqlash (xotira elementlari) funksiyalarni bajarishi mumkin.

Komponent mustaqil mahsulot sifatida ajratilishi mumkin bo'lgan ma'lum radioelement funksiyasini bajaradigan integral mikroshemaning bir qismi hisoblanadi. Komponentlar yig'ish-montaj ishlarini bajarilishida mikroshemaning tagligiga o'rnatiladi. Oddiy komponentlarga kaskadsiz diodlar va tranzistorlar, maxsus turdagi kondensatorlar, kichik o'lchamli induktiv g'altaklar va boshqalar kiradi. Murakkab komponentlar bir nechta elementlar, masalan, diodli yoki tranzistorli to'plamlarga ega bo'ladi. ISlarga texnik hujjatlarni ishlab chiqishda "korpus", "taglik", "plata", "yarimo'tkazgichli plastina", "kristall", "kontakt yuzasi" va boshqalar atamaları qo'llaniladi.

Korpus kristallni tashqi ta'sirlardan himoya qiladigan IS konstruksiyasining bir qismi hisoblanadi. Korpuslarning turlari va o'lchamlari, shuningdek, chiqishlar soni va ularning joylashuvi standartlashtirilgan. Korpusda "kalit" mavjud bo'ladi yoki korpus nosimmetrik shaklda bajariladi, bu mikroshemalarning chiqishlarini to'g'ri topish uchun zarur bo'ladigan kalitga ekvivalent bo'ladi.

ISning tagligi unda gibrid va yupqa qatlamli ISlar elementlarini, elementlararo va komponentlararo ulanishlarni, kontakt yuzalarini tayyorlashga mo'ljallangan asos hisoblanadi.

IS platasi sirtida yupqa qatlam elementlari, kontakt yuzalar va elementlar va komponentlarning ulanish liniyalari bajarilgan taglikning bir qismi (yoki butun taglik) hisoblanadi.

Yarimo'tkazgichli plastina ISlarni yaratish uchun ishlatiladigan (ba'zida undagi elementlar bilan) asos hisoblanadi.

IS kristalli - bir plastinada bir nechta funksional qurilmalar bajarilishida uni kesilgandan keyin olingan plastinaning bir qismi hisoblanadi.

Kontakt yuzalar - IS korpusining chiqishlariga ulash uchun mo'ljallangan kristalldagi metallashtirilgan oraliqlar hisoblanadi.

Korpusiz mikroshema - kristall va chiqishlarni o'z ichiga olgan ISlar (mikroto'plamlarni yaratish uchun ishlatiladi) hisoblanadi.

ISning murakkabligi mezoni, ya'ni undagi elementlar va oddiy komponentlar N soni $k = \lg N$ koeffitsient bilan aniqlanadigan integratsiyalanish darajasi hisoblanadi, uning qiymati eng yaqin butun songa yaxlitlanadi. Shunday qilib, birinchi integratsiyalanish darajasi ($k = 1$) ISlar 10 tagacha, ikkinchi integratsiyalanish darajasi ($k = 2$) ISlar 10 dan 100 gacha, uchinchi integratsiyalanish darajasi ($k = 3$) ISlar 1000 dan 10 000 gacha elementlar va oddiy komponentlardan tashkil topadi va

h.k. Bipolyar texnologiya bo'yicha bajarilgan 500 yoki undan ortiq elementlarga yoki MDYAO'-texnologiya bo'yicha bajarilgan 1000 yoki undan ko'p elementlarni o'z ichiga olgan integral sxema **katta integral sxema** (KIS) deyiladi. Agar N soni 10 000 dan oshsa, u holda IS juda katta IS (JKIS) deyiladi. JKISlar o'miga bir kristallda bir necha yuz mingdan bir necha milliongacha elementlarni o'z ichiga olgan o'ta katta integral sxemalar (O'KIS) kelmoqda. Texnologik (TID) va funksional (FID) integratsiyalanish darajalariga ajratiladi. TID- kristalldagi komponentlar sonini aks ettiradi; FID – kristalldagi funksional yacheykalar sonini aks ettiradi.

IS texnologiyasi va konstruksiyasi sifatining muhim ko'rsatkichi kristallda elementlarning joylashtirish zichligi – maydon birligiga to'g'ri keladigan elementlar soni hisoblanadi. Kristalldagi elementlarning zichligini oshirish uchun elementlar hajmini kamaytirishdan tashqari, yarimo'tkazgichli kristallning ba'zi sohalarining bir nechta (odatda ikkita) funksiyalarini kombinatsiyalash, shuningdek, dielektrik qatlamlar bilan ajratilgan uch o'lchovli tuzilmalar qo'llaniladi.

Texnologiya darajasi Δ minimal texnologik o'lcham bilan, ya'ni yarimo'tkazgichli sohada, sirdagi yarimo'tkazgichli qatlamda erishiladigan eng kichik legirlash sohalari, masalan, emittingning minimal kengligi, o'tkazgichlarning kengligi, ular orasidagi masofalar bilan tavsiflanadi. Yarimo'tkazgichli ISlar uchun texnologiyalarning takomillashishi bilan ularning kamayishi ISlarning elektr parametrlarining yaxshilanishiga, masalan, p - n -o'tishlar parazit sig'imlarining kamayishi tufayli tezkorlikning ortishiga, maydon tranzistorlar qiyaliklarining ortishiga olib keladi.

Yarimo'tkazgichli mikrosxemalarni rivojlanishining asosiy yo'nalishlari integratsiyalanish darajasi va tezkorlikning ortishi hisoblanadi.

Mikroelektronikaning rivojlanishi asosan elementlarning o'lchamlarini kichraytirish (garchi kristall yuzasi ham o'sadi) yo'li bilan davom etadi, binobarin, joylashtirish zichligining ikki baravar ortishi o'rtacha 2 yilda bo'lib o'tadi. O'tgan asrning 70- yillarida turkum ishlab chiqariladigan mikrosxemalarning nazorat qilinadigan minimal o'lchami 2 - 8 mkmni tashkil etgan bo'lsa, 1980- yillarda u 0,5 - 2 mkmgacha kamaytirildi.

1990-yillarda yangi "platformalar urushi" bosqichi tufayli eksperimental usullar ishlab chiqarishga joriy etila boshlandi va tez takomillashtirildi. 1990- yillarning boshlarida protsessorlar (masalan, oldingi

Pentium va Pentium Pro) 0,5 - 0,6 mikron (500 - 600 nm) texnologiya bo'yicha tayyorlandi, keyin texnologiya 250 - 350 nmga yetdi. Keyingi protsessorlar (PentiumII, K6-2 +, Athlon) endi 180 nm texnologiya bo'yicha ishlab chiqarildi. 2002 - 2004 yillarda 90 nmli texnologik jarayonlar o'zlashtirildi (Winchester AMD 64, Prescott Pentium 4).

Navbatdagi protsessorlar UB-nurlari yordamida ishlab chiqarilgan (*ArF* eksimer lazeri, 193 nm to'liq uzunligi). Industriya yetakchilari tomonidan har 2 yilda ITRS rejasiga muvofiq yangi texnologik jarayonlar joriy qilindi, bunda maydon birligiga tranzistorlar sonini ikki barobar oshirish - 45 nm (2007), 32 nm (2009), 22 nm (2011) ta'minlandi, 14 nm da ishlab chiqarish 2014 yilda boshlandi.

2018 yilda 10 nm jarayonlarni o'zlashtirish bo'lib o'tdi. Elementlarning topologik o'lchamlarini kichraytirish mikrosxemalarning elektr parametrlarini yaxshilanishiga olib keladi. Bu holda diskret elementlardagi oddiy sxemalar uchun bo'lganidek, asosiy cheklovchi omil ichki sxemaviy ulanishlar hisoblanadi, ulardagi signallarning kechikishlari bu elementlarning erishiladigan yuqori tezligidan to'liq foydalanishga imkon bermaydi.

1.1.2. Integral mikrosxemalarning turlari va tasniflanishi

Mikrosxemalar ko'pincha yagona konstruktiv-texnologik bajarishga ega bo'lgan va birgalikda foydalanishga mo'ljallangan turli funksional maqsadlarga ega bo'lgan qator mikrosxemalar turlarni o'z ichiga oladigan turkum shaklda tayyorlanadi. **Integral mikrosxemalarning turkumi** yagona konstruktiv-texnologik bajarishga ega bo'lgan va birgalikda foydalanishga mo'ljallangan turli funksiyalarni bajaradigan IMSlar turlarining yig'indisi hisoblanadi. Bitta turkumdagi integral mikrosxemalar ta'minot kuchlanishi, kirish va chiqish qarshiligi, signallar sathlari va ishlatish sharoitlari bo'yicha moslashtirilgan. ISlar odatda ma'lum funksional maqsadga ega bo'lgan to'liq yakunlangan elektron tugun bo'lib, uning mos aktiv va passiv elementlari va komponentlari ma'lum texnologik usullardan foydalanish bilan guruhli usulda tayyorlanadi.

Mikrosxemaning turi aniq funksional maqsadni va konstruktiv-texnologik va sxematik yechimni aniqlashni ko'rsatadi. Har bir mikrosxema turi o'ziga xos belgilashga ega. Integratsiyalanish darajasining qiymatiga bog'liq ravishda quyidagi IMSlar guruhlari ajratiladi:

- 10 tagacha elementga ega bo'lgan birinchi integratsiyalanish

darajasi;

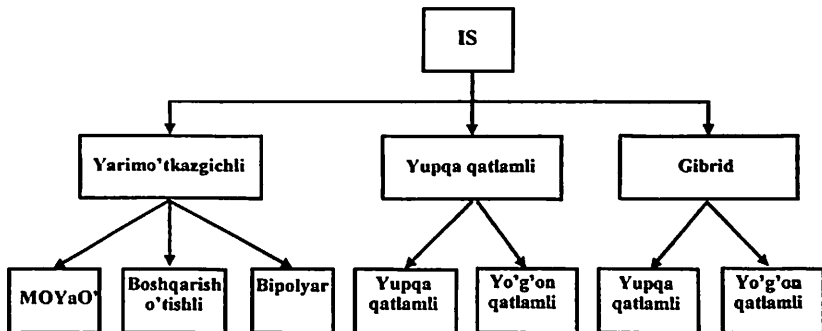
- 10 dan 100 gacha elementli ikkinchi integratsiyalanish darajasi;

- 100 dan 1000 gacha elementli uchinchi integratsiyalanish darajasi;

- 1000 dan 10000 gacha elementli to'rtinchi integratsiyalanish darajasi va h.k.

Shuni ta'kidlash kerakki, 10^5 gacha elementlar soniga ega bo'lgan mikrosxemalar odatda katta integral sxemalar (KIS), 10^6 gacha elementlar sonli mikrosxemalar juda katta integral sxemalar (JKIS), 10^6 dan ortiq elementlar sonli mikrosxemalar o'ta katta integral sxemalar (O'KIS) deyiladi.

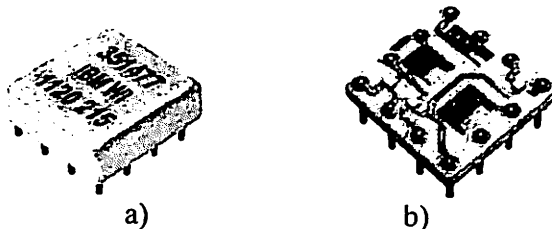
Maydoni 1 mm^2 bo'lgan bitta kristalldagi elementlar soniga bog'liq ravishda mikrosxemalar oddiy integral mikrosxemalarga (OIS), elementlarning o'rta integratsiyalanishli (O'IS), katta integral sxemalarga (KIS) va o'ta katta integral sxemalarga (O'KIS) bo'linadi. OISda kristallda 100 tagacha, O'ISda 1000 tagacha, KISda 10 000 gacha va O'KISda 1 million tagacha elementlar soni bo'ladi va O'KIS - har bir chip uchun 1 million elementgacha, ultrakatta ISlarda (UKIS) kristallda 1 milliardgacha, giga katta integral sxemalarda (GKIS) 1 milliarddan ortiq elementlar bo'ladi. Hozirgi vaqtda UKIS va GKIS nomi deyarli ishlatilmayapti (masalan, Itanium, 9300 Tukwila protsessorlarining so'nggi versiyalari ikki milliard tranzistorlarga ega) va elementlar soni 10 000 dan oshadigan barcha sxemalar O'KIS nimsinfi hisoblanishi bilan JKISlarga kiritiladi. Chiqariladigan barcha turdagi integral mikrosxemalar konstruktiv-texnologik bajarilishi bo'yicha qabul qilingan shartli belgilashlar tizimiga muvofiq quyidagi uchta guruhlarga bo'linadi: yarimo'tkazgichli, gibrid va boshqalar, ularga guruhga yupqa qatlamli, vakuumli va keramik ISlar kiradi (1.3 -rasm).



1.3 -rasm. Integral sxemalarning tasniflanishi

Vakuimli ISlar juda kichik o'lchamli vakuumli O'YUCH-
qurilmalar asosida qurilgan O'YUCH integral sxemalar hisoblanadi.

Yupqa qatlamli ISlarda barcha elementlar dielektrik asosga (passiv substrat) yotqizilgan plyonkalardir (1.4 -rasm).



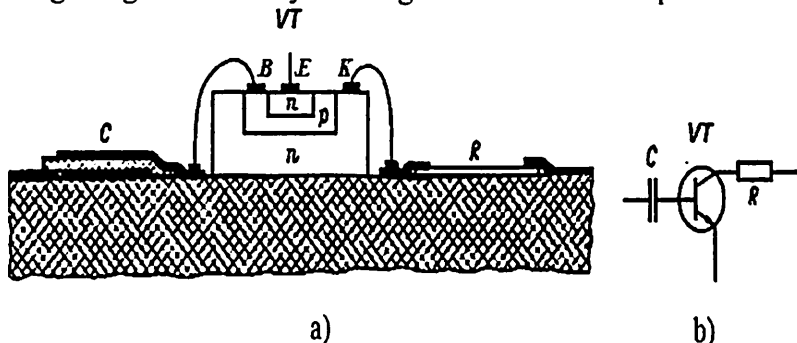
1.4 -rasm. Yupqa plyonkali ISlarning tashqi ko'rinishi (a) va platasi bo'lagining kattalashtirilgan tasviri (b)

Bu mahsulotlarda alohida elementlar va elementlararo ulanishlar dielektrik sirtida amalga oshiriladi, odatda dielektrik sifatida keramika olinadi. Mos materiallardan yupqa plyonkalarni yuritish texnologiyasi qo'llaniladi.

Yuritiladigan yupqa plyonka turiga bog'liq ravishda yupqa va qalin plyonkali ISlarga ajratiladi. Birinchi holda, yupqa plyonkalarining qalinligi 1 mkmdan oshmaydi. Yupqa plyonka vakuumli bug'lanish, kimyoviy cho'kma, katodli changlatish va boshqa yo'llari bilan yuritiladi. 10 Om 1 MOmgacha qarshilikli rezistorlar, 0,1 pFdan 20 nFgacha bo'lgan kondensatorlar, 2 mkGngacha nominal qiymatga ega bo'lgan induktiv g'altaklarni, shuningdek, yarim o'tkazgich sifatida kadmiy sulfid (CdS) ishlatiladigan MOYAO'-qurilmalarga o'xshash yupqa qatlamli tranzistorlarni olishga erishiladi. Qalin plyonkali ISlarning qalinligi 15 dan 45 mkgacha o'zgaradi. Bunday plyonkalarga kerakli rasmni maxsus bo'yoq bilan yuritish orqali ipak-trafaretli texnologiya yordamida olinadi. 10 Om dan 1 MOmgacha qarshilikka ega rezistorlar, 8 nFgacha sig'imli kondensatorlar, 4,5 mkGngacha induktiv g'altaklarni, shuningdek, turli ulash o'tkazgichlarni olish mumkin. Bu texnologiya yordamida aktiv elementlar yaratilmaydi. Yupqa plyonkali ISlarning tarkibiga kiradigan elementlarning nominallarini sozlash usullari ishlab chiqilgan.

Dielektrik taglikdagi gibrid ISlarda (GIS), masalan, alyuminiy oksididan (Al_2O_3) yupqa plyonkali passiv elementlar (rezistorlar, kondensatorlar) tayyorlanadi va turli texnologik usullar yordamida sirtga

osma aktiv va passiv komponentlar o'ratiladi (1.5-rasm). Bu ISlar sinfining o'ziga xos xususiyati uning nomini keltirib chiqardi.

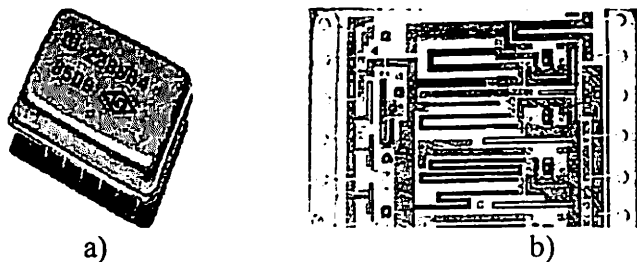


1.5-rasm. Gibril integral mikrosxemaning tuzilmasi (a) va elektr sxemasi (b)

1.5-rasmdan kelib chiqadiki, gibril ISlarning ikki turlari - yupqa va qalin plyonkali sxemalar mavjud. Yupqa plyonkali gibril ISlarning passiv elementlari ham kimyoviy, ham vakuumli usullarda amalga oshiriladigan metallashtirish yo'li bilan bajariladi. O'tkazgichlar oltin, alyuminiy, nikel, mis va boshqalardan tayyorlanadi. Rezistorlar uchun materiallar bo'lib Ni - Sg (80/20) qotishmasi, Ta₂N tantal nitridi va boshqalar xizmat qiladi. Kondensatorlar uchun dielektrik sifatida kremniy oksidi va tantal pentoksid ishlatiladi. Yuritiladigan qatlamlarning qalinligi 0,02 dan 10 mkm gacha o'zgaradi, bu "yupqa plyonkali gibril ISlar" atamasining kelib chiqishini tushuntiradi. Bo'lishi mumkin bo'lgan qo'llanish sohasi ixtisoslashtirilgan ISlarni ishlab chiqarish hisoblanadi, chunki bu texnologiya qimmat, maxsus qurilmalar va yuqori malakali ishlab chiqarish xodimlarini talab qiladi.

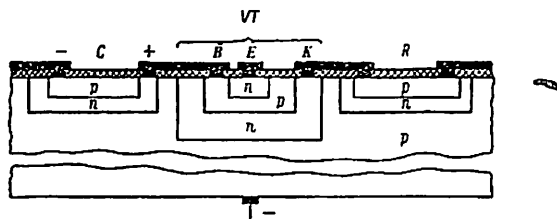
Qalin plyonkali gibril ISlarning yuritiladigan qatlamlarining qalinligi sezilarli katta bo'ladi. Bu yerda passiv elementlar ipakli grafika yoki fotolitografik texnika yordamida tayyorlanadi. Rezistorlar, induktiv g'altaklar, kondensatorlar va boshqa elementlar mos bo'yoq bilan ipakli-trafaretli bosish yo'li bilan olinadi. Keyin mahsulotlar bo'yoqqa kerakli yopishqoqlikni beradigan organik erituvchilarni olib tashlash uchun 120 °C da quritiladi, bo'yoq qatlamini kuydirishni amalga oshirish bilan taxminan 850 °C haroratgacha qizdiriladi. Suyuq bo'yoq qatlamining qalinligi taxminan 25 mkm ni tashkil qiladi, issiqlik bilan ishlov berilgandan keyin u taxminan 15 mkm gacha kamayadi. Tavsiflangan ISlar om-

maviy mahsulotlarda ishlatiladi, chunki ular ko'p funksiyali va yupqa plyonkali, hatto yarimo'tkazgichli ISlarga qaraganda ancha arzon. Shuni ta'kidlash muhimki, yupqa plyonkali va qalin plyonkali ISlarga shunday foydali xususiyatlar xosdirki, ularning ishchi parametrlarini lazer nurlari, abraziv oqim va boshqalar yordamida sozlash mumkin. Gibrid ISlar signalni bir vaqtda ham kuchlanish, ham quvvat bo'yicha kuchaytirishi mumkin; ularning yuqori iqtisodiy ko'rsatkichlari ularga kiradigan elementlarning kam soni bilan izohlanadi. Biroq, gibrid ISlar boshqa integral mikrosxemalar orasida ustun rol o'ynamaydi. GIS ko'rinishida funksional elementlarni amalga oshirish kichik turkumdagi ixtisoslashtirilgan mikrosxemalarni ishlab chiqarishda iqtisodiy maqsadga muvofiq. 1.6-rasmda gibrid mikrosxemaning tashqi ko'rinishi (a) va bo'lagining kattalashtirilgan tasviri (b) keltirilgan.



1.6-rasm. Gibrid mikrosxemaning tashqi ko'rinishi (a) va bo'lagining kattalashtirilgan tasviri (b)

Yarimo'tkazgichli ISlarda barcha elementlar va elementlararo ulanishlar yarimo'tkazgichning katta qismi va sirtida amalga oshiriladi (1.7-rasm).



1.7-rasm. Yarimo'tkazgichli integral sxemaning tuzilmasi, uning elektr sxemasi 1.5, b-rasmda tasvirlangan

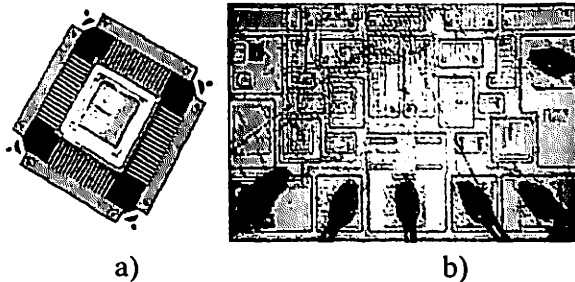
Monolit yarimo'tkazgichli ISlarda sxemaning barcha elementlari (diodlar, tranzistorlar, rezistorlar va boshqalar) yarimo'tkazgichli

materialning aktiv taglik odatda kremniy monokristali) deyiladigan bitta kristali asosida bajarilgan. Ishlatiladigan aktiv elementlarning turiga bog'liq ravishda yarimo'tkazgichli ISlar MDYAO'-tranzistorlar asosidagi yarimo'tkazgichli ISlar yoki Shottki diodi asosidagi zatvorli tranzistorlar (mikroelektronikada boshqariladigan o'tishli maydoniy tranzistorlar kamdan-kam ishlatiladi) va bundan keyin faqat IS deyiladigan bipolyar yarimo'tkazgichli ISlarga bo'linadi.

Yarimo'tkazgichli mikrosxemalarning tashqi ko'rinishi va kristalli bo'lagining kattalashtirilgan tasviri 1.8-rasmda keltirilgan.

Taglikning turi bo'yicha yarimo'tkazgichli ISlarni quyidagi ikki turlarga bo'lish mumkin:

- yarimo'tkazgichli tagliklardagi ISlar;
- dielektrik tagliklardagi ISlar.



1.8-rasm. Yarimo'tkazgichli mikrosxemalarning tashqi ko'rinishi (a) va kristalli bo'lagining kattalashtirilgan tasviri (b)

Yarimo'tkazgichli materiallar orasida IMSlarni tayyorlash uchun kremniy va galliy arsenidi eng keng qo'llaniladi. Yarimo'tkazgichli ISlarning tagligi sifatida asosan qalinligi 100 mkm va diametri 500 mm gacha bo'lgan kremniydan plastinalar ishlatiladi. Qator hollarda dielektrik tagliklar (masalan, safir) ishlatiladi.

Yarimo'tkazgichli qurilmalar va ISlarni tayyorlash uchun sanoatda ishlab chiqariladigan quyidagi to'rtta turlardagi kremniy plastinalar ishlatiladi:

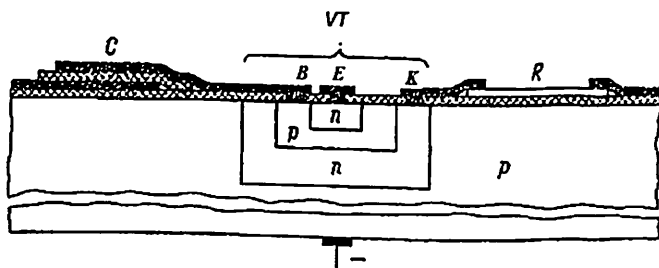
- bir qatlamli p - va n -turlardagi;
- kremniy oksidi yoki nitridi bilan qoplangan, epitaksial n - qatlamli ikki qatlamli p - yoki n -turlardagi;
- epitaksial n -qatlamli va yashirin n -qatlamli ikki qatlamli p -turlardagi;

-saffirdagi kremniy turidagi geteroepitaksial tuzilmalar.

Deyarli barcha zamonaviy ISlar yarimo'tkazgichli texnologiyalar bo'yicha bajariladi. Boshqa turlardagi IMSlar faqat ba'zi maxsus holatlarda qo'llaniladi.

ISlarning oraliq turi birlashtirilgan integral sxemalar hisoblanadi. Birlashtirilgan ISlarda (1.9-rasm) barcha aktiv elementlar va passiv elementlarning bir qismi kremniydan taglikda yarimo'tkazgichlar texnologiyalar bo'yicha tayyorlanadi, passiv elementlarning qismi esa yupqa plyonkali texnologiya bo'yicha bajariladi. Passiv elementlar himoya dielektrigining sirtiga joylashtiriladi.

Birlashtirilgan IMSlar texnologiyalari yupqa plyonkali va yarimo'tkazgichli ISlarning afzalliklaridan foydalanish va oddiy yarimo'tkazgichli ISlarning passiv elementlariga qaraganda xarakteristikalarining eng yaxshi barqarorligiga ega bo'lgan passiv elementlarni yaratish imkonini beradi. Yarimo'tkazgichli ISlar diskret elementlardan foydalaniladigan an'anaviy qurilmalarga qaraganda qator muhim afzalliklarga ega. Ulardan eng ma'lum afzalliklarni sanab o'tamiz.



1.9-rasm. Birlashtirilgan integral sxemaning tuzilmasi, uning elektr sxemasil.5,b-rasmda tasvirlangan

ISlarni ishlab chiqarish samarador, chunki bu yerda yagona texnologik siklda ko'p sonli bir xil mahsulotlar ishlab chiqariladi. Bitta plastinadan olingan barcha kristallar bir xil xarakteristikalarga ega bo'ladi, bunga diskret elementlar yordamida erishib bo'lmaydi. ISlar ishlatiladigan mahsulotlar yuqori ishonchlilik bilan ajralib turadi. Bu shunga bog'liqlik, barcha ichki o'zaro bog'lanishlar ISlarni tayyorlash jarayonida hosil bo'ladi, shuning uchun kavsharlash zarurati bo'lmaydi.

ISlarning kichik umumiy o'lchamlari mahsulotlarning kichik vazni va yuqori tezkorligi talab qilinadigan sohalarda, ayniqsa, kompyuter texnologiyalari va aloqa tizimlari kabi sohalarda keng qo'llanilishiga olib

keldi. Yaxshi ekspluatatsion xarakteristikalar va arzon narxlar juda murakkab ISlardan foydalanishga imkon beradi, bu esa ular ishlatiladigan qurilmalarning ishlash sifatini oshiradi.

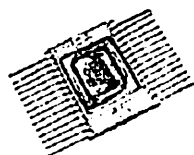
Integral sxemalar cheklovlarga ega. Yuqori chastotalar sohasida ISlarning xarakteristikalari parazit sig'implarning mavjudligi bilan yomonlashadi. Passiv elementlar yuqori harorat koeffitsientlariga ega.

Rezistorlarning qarshiligi 10-50 kOm chegaralarda yotadi, kondensatorlarning sig'imi 200 pFdan kichik bo'ladi. Integral bajarishda induktiv g'altaklarni yaratish juda qiyin.

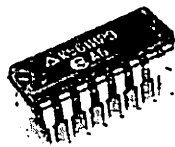
Tayyor mikrosxema atrof-muhitdan ajratilishi kerak. Tashqi ta'sirlardan himoya qilish uchun germetizatsiyalash usuli bo'yicha quyidagi ISlar guruhlariga ajratiladi:

-**korpusli ISlar**, ular kavsharlash yoki maxsus kontaktli ulagichlar yordamida o'rnatishga imkon beradigan maxsus korpusga joylashtiriladi (1.10a, b-rasm);

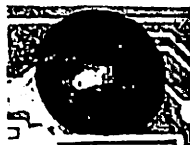
- **korpusiz ISlar**, ular maxsus epoksid birikmasi bilan qoplangan va IMS korpusi rolini o'ynaydigan bosma plataga to'g'ridan-to'g'ri montaj qilish uchun mo'ljallangan (1.10,c-rasm).



a)



b)



c)

1.10-rasm. Korpusli (a, b) va korpusiz (c) mikrosxemalarning tashqi ko'rinishi

Funksional maqsadi (ishlov beriladigan signal turi) bo'yicha ISlar analog va raqamli ISlarga bo'linadi.

Raqamli mikrosxemalar ikkita "0" yoki "1" qiymatlarni qabul qiladigan (mantiqiy elementlar, triggerlar, xotira qurilmalari, mikroprotessorlar va h.k.) diskret funksiya qonuniga muvofiq o'zgaradigan signallarni o'zgartirish va ishlov berish uchun mo'ljallangan, ya'ni raqamli ISlar diskret shaklda berilgan signallarni o'zgartirish va ishlov uchun mo'ljallangan.

Analog mikrosxemalar (operatsion kuchaytirgichlar, differensial

Kuchaytirish kaskadlari, tokni shakllantirish kaskadlari, chiqish kaskadlari, analog signallar integratorlari va boshqalar) uzluksiz funksiyalar bilan tavsiflanadigan signallarga ishlov beradi.

Eng keng tarqalgan analog IS operatsion kuchaytirgichlar, shuningdek, o'ta yuqori chastotalar ISlari hisoblanadi.

Signallarni bir shakldan boshqasiga o'zgartiradigan maxsus analog-raqamli mikrosxemalar ham mavjud. Mikroelektronikaning (integral mikrosxemalarning) rivojlanishi yo'nalishlari, birinchi navbatda, sifat jihatidan yaxshilangan xarakteristikalariga ega bo'lgan yangi yarimo'tkazgichli qurilmalarni ishlab chiqish zarurati bilan bog'liq.

Mikroelektronikadagi asosiy tadqiqotlar yo'nalishlari quyidagilar hisoblanadi:

- ISlar elementlarining hajmini kamaytirish va mos ravishda integratsiyalanish darajasini oshirish yo'llarini izlash;
- yangi samarali texnologiyalarni ishlab chiqish;
- ISlarni ishlab chiqarishda yangi materiallarni ishlab chiqish va qo'llash.

1.1.3. IMSlarni belgilashlar tizimi

IMSlar asosida murakkab elektron apparaturalarni ishlab chiqish va yaratish uchun elektron parametrlari o'zaro elektron parametrlari bo'yicha moslashuvchan turli maqsadlardagi ma'lum bir IMSlar to'plami talab qilinadi. Elektron sanoat integral mikrosxemalar turkumini, ya'ni turli funksiyalarni bajaradigan, lekin bir xil konstruktiv-texnologik bajarilishga ega bo'lgan va radioelektron apparaturalarda birgalikda foydalanish uchun mo'ljallangan mikrosxemalar majmuini ishlab chiqaradi. Turkum tarkibiga qo'llanilish sohasi va maqsadiga bog'liq ravishda o'nlab har xil turlardagi mikrosxemalar kirishi mumkin.

Qabul qilingan tizim bo'yicha (17467-88 standart) ISlarni belgilash to'rtta elementlardan tashkil topishi kerak.

Birinchi element - konstruktiv-texnologik guruhga mos keladigan raqam: 1, 5, 7 - yarimo'tkazgichli ISlar (7 raqami korpussiz yarimo'tkazgichli ISlarga beriladi); 2, 4, 6, 8 - gibrid ISlar; 3 - boshqa ISlar (yupqa qatlamli, vakuumli va keramikali va boshqa ISlar).

Ikkinchi element - 2 - 4 raqamlari, mikrosxemalar turkumini ishlab chiqish tartib raqamini bildiradi.

Uchinchi element - ikkita harflar, ular bu mikrosxemaning funksional maqsadini bildiradi.

To'rtinchi element - bu turkumdagi funksional belgilar bo'yicha mikrosxemalarni ishlab chiqish tartib raqami. U bir yoki bir nechta raqamlardan iborat bo'lishi mumkin.

Standartga muvofiq, funksional maqsadlari bo'yicha mikrosxemalar quyidagicha belgilanadi:

a) **Generatorlar** - G: GS - garmonik signallar generatorlari; GG - to'rtburchakli signallar generatorlari (multivibratorlar); GL - chiziqli o'zgaruvchan signallar generatorlari; GF - maxsus shakldagi signallar generatorlari; GM - shovqin generatorlari; GP - boshqa generatorlar.

b) **Detektorlar** - D: DA - amplitudaviy detektorlar; DI - impulslı detektorlar; DS - chastotaviy detektorlar; DF - fazaviy detektorlar; DP - boshqa detektorlar.

c) **Kommutatorlar va kalitlar** - K: KT - tok kalitlari; KN - kuchlanish kalitlari; KP - boshqa kalitlar.

d) **Mantiqiy elementlar**: LA - VA-YO'Q elementi; LE - YOKI-YO'Q elementi; LI - VA elementi; LL - YOKI elementi; LN - YO'Q elementi; LS - VA-YOKI elementi; LB - VA-YO'Q/YOKI-YO'Q elementi; LR - VA-YOKI-YO'Q elementi; LK - VA-YOKI-YO'Q/VA-YO'Q elementi; LM - YOKI-YO'Q/YOKI elementi; LD - kengaytirgichlar; LP - boshqa elementlar.

e) **Modulyatorlar** - M: MA - amplitudaviy modulyatorlar; MS - chastotaviy modulyatorlar; MF - fazaviy modulyatorlar; MI - impulslı modulyatorlar; MP - boshqa modulyatorlar.

f) **O'zgartirgichlar** - P: PS - chastota o'zgartirgichlari; PF - fazaviy o'zgartirgichlar; PD - davomiylık o'zgartirgichlari; PN - kuchlanish o'zgartirgichlari; PM - quvvat o'zgartirgichlari; PU - sath o'zgartirgichlari (moslashtirgichlar); PA - kod-analog o'zgartirgichlari; PV - analog-kod o'zgartirgichlari; PR - kod-kod o'zgartirgichlari; PP - boshqa o'zgartirgichlar.

g) **Ikkilamchi ta'minot manbalari** - E: EV - to'g'rilagichlar; EM - o'zgartirgichlar; EN - kuchlanish stabilizatorlari; ET - tok stabilizatorlari; EP - boshqalar.

h) **Kechiktirish sxemalari** - B: BM - passiv sxemalar; BR - aktiv sxemalar; BP - boshqa sxemalar.

i) **Seleksiya va taqqoslash sxemalari** - C: SA - amplitudaviy (signal sathi); CV - vaqt; SS - chastota; CF - faza; SP - boshqa sxemalar.

j) **Triggerlar** - T: TV- JK-triggerlar; TR– RS-triggerlar (alohida ishga tushirishli); TM- D-triggerlar; TT – T-triggerlar; TD - dinamik triggerlar; TL - SHmitt triggeri; TK – kombinatsiyalangan triggerlar; TP – boshqa triggerlar.

k) **Kuchaytirgichlar** - U: UV - yuqori chastotali kuchaytirgichlar; UR - oraliq chastota kuchaytirgichlari; UN - past chastotali kuchaytirgichlar; UI – impulsli kuchaytirgichlar; UE - takrorlagichlar; UL - o‘qish va ijro etish kuchaytirgichlari; UM – indiksiyalash kuchaytirgichlari; UT – o‘zgarmas tok kuchaytirgichlari; UD - operatsion va differensial kuchaytirgichlar; UP – boshqa kuchaytirgichlar.

l) **Filtrlar** - F: FV – yuqori chastotalar filtrlari; FN - past chastotalar filtrlari; FE – polosali filtrlar; FR – rejektorli filtrlar; FP – boshqa filtrlar.

m) **Shakllantirgichlar** - A: AG - to‘rtburchakli impuls shakllantirgichlari; AA - manzil toklari shakllantirgichlari (kuchlanish va tok shakllantirgichlari); AF - maxsus shakldagi impuls shakllantirgichlari; AR - razryadlash toklari shakllantirgichlari (kuchlanish va tok shakllantirgichlari); AP - boshqa shakllantirgichlar.

n) **Xotirada saqlash qurilmalari elementlari** - saqlash matritsalarlari: RM - OXQ (operativ xotira qurilmasi); RV - DXQ (doimiy xotira qurilmasi); RU - boshqarish sxemasili OXQ; RE- boshqarish sxemasili (niqobli) DXQ; RT -boshqarish sxemasi va bir karrali dasturlashli DXQ; RR- boshqarish sxemasili va ko‘p karrali dasturlashli DXQ; RA - boshqarish sxemasili RP – boshqa qurilmalar.

o) **Arifmetik va diskret qurilmalarning elementlari**: IR - registrlar; IM - summatorlar; IL- yarim summatorlar; IE - hisoblagichlar; IV - shifrorlar; ID - deshifrorlar; IK -birlashtirilgan elementlar; IP - boshqa elementlar.

p) **Ko‘p funksiyali mikrosxemalar** - X: XA - analog mikrosxemalar; XL -raqamli mikrosxemalar; XK - birlashtirilgan mikrosxemalar; XP -boshqa mikrosxemalar.

q) **Mikroto‘plamlar, elementlar to‘plamlari** - N: ND - diodlar to‘plami; NT - tranzistorlar to‘plami; NR – rezistorlar to‘plami; NE - kondensatorlar to‘plami; NK - birlashtirilgan to‘plam; NP –boshqa to‘plamlar.

Masalan, 134LB1 - 34 turkumdagi yarimo‘tkazgichli IS, VA-YO‘Q/YOKI-YO‘Q mantiqiy element. Keng qo‘llaniladigan ISlarni belgilash uchun raqam oldiga “K” harfi qo‘yiladi. Masalan, K140UD1 -

keng qo'llaniladigan 40 turkumdagi yarimo'tkazgichli IS, differensial kuchaytirgich.

Agar turkum raqamidan oldin "K" harfidan keyin "P" yoki "M" harfi ham ko'rsatilsa, u holda bu butun turkum plastmassa korpusda ("P" harfi) yoki keramik korpusda ("M" harfi) ishlab chiqarilganligini bildiradi. Masalan, KM155LA1 - keng qo'llaniladigan 55 turkumdagi keramik korpusli yarimo'tkazgichli IS, VA-YO'Q mantiqiy element. Elektr sxemalarida ISlar D bilan belgilanadi.

Hozirgi vaqtda eng oddiy mantiqiy elementlardan tortib eng murakkab protsessorlar, mikrokontrollerlar va ixtisoslashtirilgan katta integral sxemalargacha (KIS) juda ko'p sonli turli xil raqamli mikrosxemalar ishlab chiqarilmoqda. Ko'pgina kompaniyalar ham O'zbekistonda, ham chet elda ham raqamli mikrosxemalar ishlab chiqarish bilan shug'ullanadi. Shuning uchun, hatto bu mikrosxemalarni tasniflash ham juda qiyin vazifa hisoblanadi.

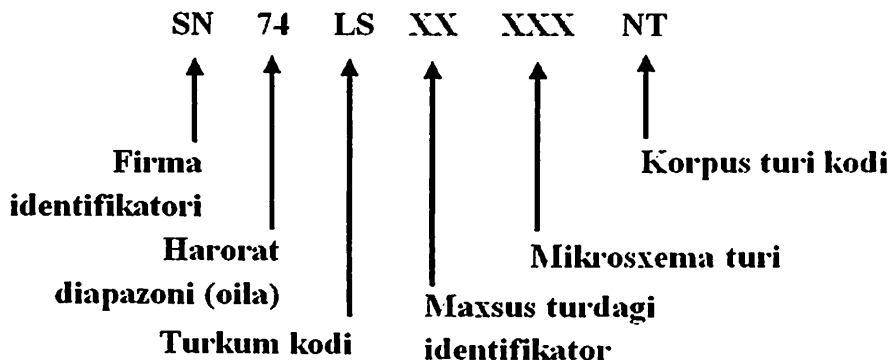
Biroq, raqamli sxematexnikaning asosi sifatida e'tibor asosida bir necha o'n yillar davomida bir qator kompaniyalar, masalan Texas Instruments (TII) amerika kompaniyasi tomonidan ishlab chiqariladigan 74 oilasi turkumidagi TTL yotadigan kichik va o'rta integratsiyalanish darajasili klassik mikrosxemalar to'plamiga qaralmoqda. Bu turkumlarga funksional jihatdan to'liq mikrosxemalar to'plami kiradi, ulardan foydalanish bilan turli xil raqamli qurilmalarni yaratish mumkin. Hatto dasturlashtiriladigan mantiqli (DMIS) zamonaviy murakkab mikrosxemalarni kompyuterda loyihalashda ham 74 oilasining bu turkumdagi eng oddiy mikrosxemalar modellaridan foydalaniladi. Bunda ishlab chiquvchi kompyuter ekranida unga tanish elementlar asosda sxemani chizadi, so'ngra dastur kerakli funksiyani bajaradigan DMIS dasturini yaratadi. 74 oilasi turkumining har bir mikrosxemasi o'z belgilanishiga ega va mavjud belgilash tizimi chet elda qabul qilingan tizimdan ancha farq qiladi. Misol sifatida Texas Instruments belgilash tizimini ko'rib chiqamiz (1.11-rasm). To'liq belgilash oltita elementlardan iborat:

Firmaning SN identifikatori (AC va ACT turkumlarida mavjud emas).

Harorat diapazoni (oilasi turi):

74 - tijorat mikrosxemalari (bipolyar mikrosxemalar uchun atrof-muhit harorati- 0 - 70 ° S, KMOYAO' mikrosxemalari uchun - - 40 -

+85 ° S), 54 - harbiy maqsadlardagi mikrosxemalar (harorat - -55 - +125 ° S).



1.11-rasm. Texas Instrumentsfirmasining belgilashlar tizimi

Turkum kodi (uchta simvollarigacha):

- yo‘q - standart TTMturkumi;
- LS (Low Power Schottki) - past quvvatli TTMSH turkumi;
- S (Schottky) - TTMSH turkumi;
- ALS (Advanced Schottky) - takomillashtirilgan TTMSH turkumi;
- F (FAST) - tezkor turkumlar;
- HC (High Speed CMOS) - yuqori tezlikli KMOYAO‘ turkumi;
- HCT (High Speed CMOS with TTL inputs) –kirish bo‘yichaTTM bilan moslashuvchan NS turkumi;
- AC (Advanced CMOS) - takomillashtirilgan KMOYAO‘ turkumi;
- ACT (ACT (Advanced CMOS with TTL inputs) -kirish bo‘yicha TTM bilan moslashuvchan AS turkumi;
- BCT (BISMOS Technology) - BiKMOYAO‘ texnologiyali turkum;
- ABT (Advanced BISMOS Technology) - BiKMOYAO‘ texnologiyali takomillashtirilgan turkum;
- LVT (Low Voltage Technology) - past ta‘minot kuchlanishli turkum.

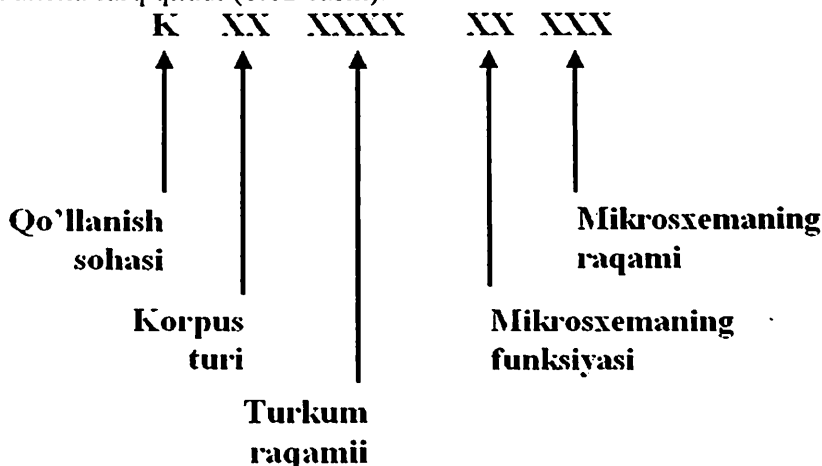
Maxsus turdagi identifikator (2 ta simvollar) - bo‘lmasligi mumkin.

Mikrosxema turi (ikkitadan oltita raqamgacha). Mikrosxemalar ayrim turlarining ro‘yxati ilovada keltirilgan.

Korpus turi kodi (bittadan ikkitagacha simvollar) - bo'lmisligi mumkin. Masalan, N - DIL (DIS) plastmassa korpus, J - DIL (DIP) keramik korpus, T - yassi metall korpus.

Belgilashga misollar: SN74ALS373, SN74ACT7801, SN7400.

Mikroxsxemalarni mavjud belgilash tizimi ko'rib chiqilgan belgilashdan ancha farq qiladi (1.12-rasm).



1.12-rasm. Mikroxsxemalarni mavjud belgilanishi

Belgilashlarning asosiy elementlari quyidagilar:

K harfi keng qo'llaniladigan mikroxsxemalarni bildiradi, harbiy maqsadlar uchun mikroxsxemalarda harf bo'lmaydi.

Mikroxsxema korpusi turi (bitta simvol) - bo'lmisligi mumkin. Masalan, P-plastmassa korpus, M-keramik korpus, B-korpussiz mikroxsxemalar.

Mikroxsxema turkum raqami (uchdan to'rtgacha raqamlar).

Mikroxsxemaning funksiyasi (ikkita harflar).

Mikroxsxemaning raqami (birdan uchgacha raqamlar).

Masalan, KR1533LA3, KR531IE17, KR1554IR47.

Mavjud belgilash tizimining asosiy afzalligi shundaki, mikroxsxemaning belgilanishi bo'yicha uning vazifasini oson tushunish mumkin. Ammo Texas Instruments belgilashlar tizimida uning xususiyatlari bilan turkumning turi ko'rinadi.

Nazorat savollari

1. Mikroelektronikaning asosiy atamalari, ta'riflari va ikki qismi nima?
2. Mikrosxemalarning qanday turlari mavjud va integratsiyalanish darajasi bo'yichaular qanday tasniflanadi?
3. Mikroelektronikaning rivojlanish tarixi qanday?
4. Mur qonuniga binoan mikroelektronika qanday rivojlanishi kerak?
5. Analog va raqamli ISlar uchun qanday belgilashlar tizimlari mavjud?

2 BOB. IZOLYASIYALASH USULLARI, MIKROELEKTRONIKANING ELEMENTLARI VA QURILMALARI

2.1. Elementlarni izolyasiyalash usullari

2.1.1. Elementlarni izolyasiyalash turlari va maqsadi

Yarimo'tkazgichli IMSlar texnologiyasi yarimo'tkazgichli qurilmalarni ishlab chiqarish bo'yicha oldingi barcha tajribani o'zlashtirgan tranzistorlar tayyorlash planar texnologiyasi (planar texnologiyasi - inglizcha planar - tekis) asosida rivojlandi.

Yarimo'tkazgichli ISlarni tayyorlashning **asosiy texnologik jarayonlari** deb, ular yordamida yarimo'tkazgichli materialda lokal hududlar yaratiladigan va o'tishlar, tuzilmalar va sxemaning elementlari shakllantiriladigan jarayonlarga aytiladi. Ularga kremniyga legirlash aralashmalarining lokal diffuziyasi, ionli legirlash va qarama-qarshi elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan kremniy plastinada monokristalli kremniy qatlamlarining epitaksial o'stirish kiradi. Shu munosabat bilan, barcha yarimo'tkazgichli ISlar texnologik belgilari bo'yicha ikki guruhlarga - faqat diffuzion jarayonlar qo'llanishi bilan tayyorlanadigan ISlar va tayyorlanishida epitaksial o'stirish, diffuziya va aralashmalarni ionli kiritish jarayonlari birlashtirilgan ISlarga bo'linadi. Birinchi guruhdagi mikrosxemalarni tayyorlash texnologiyasi planar-diffuzion texnologiya, ikkinchi guruhdagi mikrosxemalarni tayyorlash texnologiyasi planar-epitaksial texnologiya deyiladi.

Yarimo'tkazgichli IMSlarning ko'pchiligi monokristalli kremniy asosida tayyorlanadi, garchi ba'zi hollarda germaniy ishlatiladi. Bu shu bilan tushuntiriladiki, germaniy bilan solishtirganda kremniy IMSlar elementlarini yaratish uchun muhim bo'lgan qator fizik va texnologik afzalliklarga ega. Kremniyda katta ta'qiqlangan zonaning mavjudligi keng haroratlar diapazoni, kichik o'tish toklari va nisbatan yuqori ishchi kuchlanishlarida ishlaydigan ISlarni yaratishga imkon beradi. Texnologik nuqtai nazardan, kremniy sirtida IMSlar elementlarining shakllanishi jarayonida, ularning izolyasiyalanishi va tashqi ta'sirlardan himoyalani-shida muhim rol o'ynaydigan ma'lum bir qalinlikdagi dioksid (SiO_2) qatlamini olish oson.

Odatda, sxemaning har bir yarimo'tkazgichli elementiga yarimo't-

kazgichli materialning lokal qismiga to'g'ri keladi, uning xususiyatlari va xarakteristikalarini diskret elementlarning (tranzistorlar, rezistorlar, kondensatorlar va boshqalarning) funksiyalarini bajarilishini ta'minlaydi. Muayyan elementning funksiyalarini bajaradigan har bir lokal soha boshqa elementlardan izolyasiyalashni talab qiladi. Elektr sxema bo'yicha elementlar orasidagi ulanishlar odatda metall o'tkazgichlarning sirtiga sepiladigan yoki yuqori legirlangan yarimo'tkazgichli tutashmalar yordamida amalga oshiriladi. Bunday kristal germetik korpusga joylashtiriladi va mikrosxemaning amaliy qo'llanishi uchun chiqishlar tizimiga ega.

Shunday qilib, yarimo'tkazgichli IMSlar to'liq tugallangan konstruksiyaga ega. Yarimo'tkazgichli ISlarning konstruksiyalari quyidagilar orqali aniqlanadi:

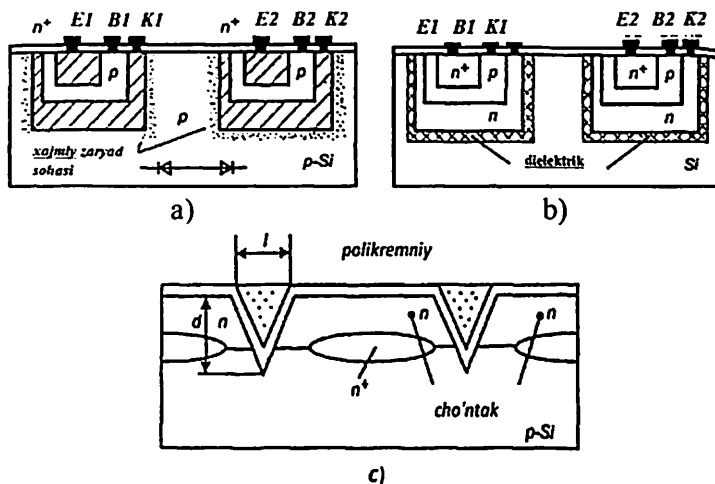
- yarimo'tkazgichli material;
- lokal sohalarni yaratish va ularda elementlarni shakllantirishning texnologik usullari;
- kristallda elementlarni izolyasiyalash usullari;
- ishlatiladigan tranzistorlarning turi va tuzilmasi.

Yarimo'tkazgichli IMSlarda ham bipolyar, ham MDYAO'-tuzilmalar ishlatiladi. Tuzilmalardagi, shuningdek, elementlarni elektr izolyasiyalash usullaridagi farqlar elektr xarakteristikalarining funksional imkoniyatlarini farqlanishiga olib keladi.

Bipolyar va MDYAO'-tranzistorlarni tayyorlash texnologiyalari, garchi ba'zi o'ziga xos xususiyatlar mavjud bo'lsada, bipolyar sxemalarda elementlarni izolyasiyalash uchun maxsus jarayonlarning zarurati va MDYAO'-sxemalardagi zatvor osti dielektrigining yupqa qatlamlarini olish jarayonlari o'xshash bo'ladi. IMSlarni ishlab chiqarish texnologik jarayoni ko'p operatsiyali va uzoq muddatli jarayon hisoblanadi. Texnologik operatsiyalarning umumiy soni 500 dan oshadi, texnologik siklning davomiyligi 50 kungachani tashkil qiladi.

Qisqa tutashuvlar va ko'zda tutilmagan ulanishlarning hosil bo'lishini oldini olish uchun ISlarning alohida elementlari izolyasiyalanadi. Quyidagi izolyasiyalash turlari ma'lum (2.1-rasm):

1. Teskari yo'nalishda aralash p-n-o'tishni yaratish yo'li bilan izolyasiyalash. Bu yerda kollektor qarama-qarshi elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan taglikga botiriladi. Bunda taglik va har bir kollektor orasida (p -turdagi taglikdagi n - p - n -tranzistorlar ishlatiladi) tranzistorni izolyasiyalaydigan p - n -o'tish paydo bo'ladi (2.1,a-rasm).



2.1-rasm. Tranzistorli bipolyar tuzilmalarni izolyasiyalash usullari: a - $p-n-o'$ tish bilan izolyasiyalash; b – dielektrik bilan izolyasiyalash; c- kombinatsiyalangan izolyasiyalash

2. **Dielektrik izolyasiyalash.** Uni yaratish uchun izoplanar jarayon qo'llaniladi, bu ma'lum darajada oldingi jarayonga o'xshaydi, lekin qimmatroq bo'lsada, elementlarni joylashtirishning yuqori zichligiga erishishga imkon beradi. Shuningdek, kimyoviy ishlov berishda kristallning korroziyon anizotropiyasiga asoslangan jarayon ham ishlatiladi, bu usul yordamida yuqori integratsiyalanish darajasiga erishish mumkin (2.1,b-rasm).

3. **To'liq izolyasiyalash yoki kombinatsiyalangan izolyasiyalash** o'zida dielektrik izolyasiyalash va teskari aralash o'tishli izolatsiyalashni birlashtiradi. U kichik parazit sig'im yoki yuqori nurlanishga barqarorlikni ta'minlash zarur bo'lganda ishlatiladi. Bu yerda ISning har bir elementi umumiy taglikda texnologik sikl davomida izolyasiyalanadi (2.1,s-rasm).

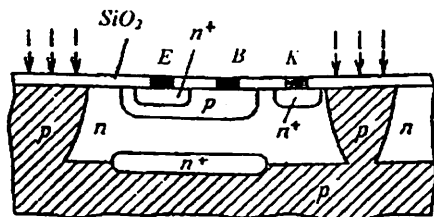
Kichik va o'rta integratsiyalanish darajasili yarimo'tkazgichli ISlarni yaratishda teskari ulangan $p-n-o'$ tishli va kremniy dioksidning dielektrik yupqa qatlamlari bilan izolyasiyalash usullari keng qo'llaniladi. KIS uchun bir vaqtda $p-n-o'$ tish va dielektrik yupqa qatlamlardan foydalanish bilan kombinatsiyalangan izolyasiyalash texnologiyasi ishlab chiqilgan.

2.1.2. *p-n-o*'tish bilan izolyasiyalash usullari

Teskari aralash *p-n-o*'tish bilan izolyasiyalash usuli bunday o'tishning teskari yo'nalishda juda yuqori solishtirma qarshilikka ega bo'lish xususiyatiga asoslangan. *p-n-o*'tish bilan izolyasiyalash bir fazali usul hisoblanadi, chunki har ikkala tomondan va izolyasion qatlam chegaralaridagi material bir xil bo'ladi. *p-n-o*'tish bilan izolyasiyalash, mazmunan, izolyasiyalanadigan elementlar orasida qarama-qarshi ulangan ikkita diodlarning hosil bo'lishiga keltiriladi (2.1,a-rasm).

Izolyasiyalaydigan diodlar teskari yo'nalishda bo'lishi uchun taglikka ta'minot manбайдan maksimal manfiy potensial beriladi. *p-n-o*'tish bilan izolyasiyalash kremniyli integral mikrosxemalarni ishlab chiqarishning asosiy texnologik sikliga organik ravishda mos keladi. Izolyasiyalovchi diffuziya, uchtalik diffuziya, qarama-qarshi diffuziya usullari qo'llaniladi. Bu izolyasiyalash usulining kamchiliklariga *p-n-o*'tishlarda teskari toklarning mavjudligi va to'siq sig'implarining mavjudligini kiritishi kerak bo'ladi.

2.2-rasmda *p-n-o*'tish bilan izolyasiyalangan integral *n-p-n*-tranzistorning tuzilmasi keltirilgan. Bu tranzistorda taglik *p*-turdagi kremniy hisoblanadi, unda epitaksial *n*-qatlam va yashirin *n*-qatlam hosil qilingan. Izolyasiyalaydigan *p-n-o*'tish akseptor aralashmasini diffuziyada hosil bo'ladigan *p*-sohalarni *p*-taglik bilan bog'lanishini ta'minlaydigan chuqurlikka diffuziyalash yo'li bilan yaratiladi. Bunday holda, epitaksial *n*-qatlam alohida *n*-sohalarga (izolyasiyalovchi "cho'ntaklar"ga) bo'lindi, ularda keyin tranzistorlar yaratiladi. Agar hosil bo'lgan *p-n-o*'tishlar teskari ulanishga ega bo'lsa, bu sohalar elektr izolyasiyalanadi.



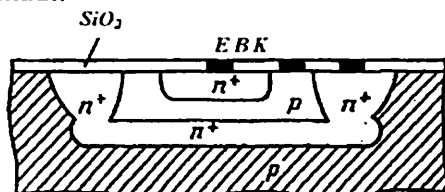
2.2-rasm. *p-n-o*'tish bilan izolyasiyalangan integral *n-p-n*-tranzistorning tuzilmasi

Bunga agar *n-p-n* tranzistor tagligining potentsiali tuzilma nuqtalari potentsiallarining eng kichigi bo'lsa erishiladi. 2.2-rasmdan farqli ravish-

da p -baza va n -emitterni yaratish uchun p -turli choʻntak hosil boʻladi. Yashirin n -qatlami va yon n -sohalar toʻplami tranzistorda sirtga K chiqishli kollektor sohasi funksiyasini bajaradi. n -sohalar va taglik orasidagi oʻtish, agar taglik eng kichik potensialga ega boʻlsa, ISning boshqa elementidan izolyasiyalashni taʼminlaydi.

Bu holda p - n -oʻtish orqali teskari tok sezilarsiz boʻladi va qoʻshni tranzistorlarning n -sohalari (choʻntaklari) orasidagi aloqa deyarli boʻlmaydi.

Kollektor diffuziyasi bilan izolyasiyalash. Bu usulda (2.3 -rasm), dastlab p -Si taglikda bir tekis epitaksial p -qatlami, uning ostidagi maʼlum joylarda esa yashirin n^+ qatlami hosil qilinadi. Keyin niqob orqali donorlar difuziyasi amalga oshiriladi va yashirin n -qatlami tutash yon n^+ sohalar hosil qilinadi.



2.3-rasm. Kollektorli diffuziyali izolyasiy

2.1.3. Dielektriklar qoʻllanishi bilan izolyasiyalash usullari

Dielektrik bilan izolyasiyalash usuli tranzistorlar tuzilmasi joylashgan dielektrikdan choʻntak hosil qilishgacha keltiriladi. Bu oldingi usulga qaraganda, avvalo, p - n -oʻtishlardagi teskari toklarga qaraganda 3-5 tartibga kichik boʻlgan oʻtish toki juda pastligi tufayli mukammal usul hisoblanadi. Dielektrikning qalinligini oshirish va kichik dielektrik singdiruvchanlikli materialni tanlash bilan parazit sigʻimlarning qiymatini ham kamaytirish mumkin. 2.1, b-rasmda tranzistorli tuzilmalarni dielektrik bilan izolyasiyalash usullaridan biri tasvirlangan. U **DK** – **dielektrikdagi kremniy** nomini oldi. Toʻliq dielektrik izolyasiyalash texnologik jarayonlaridan biri elementlarni oksidli SiO_2 qatlami bilan izolyasiyalashni taʼminlaydigan epik-jarayon hisoblanadi.

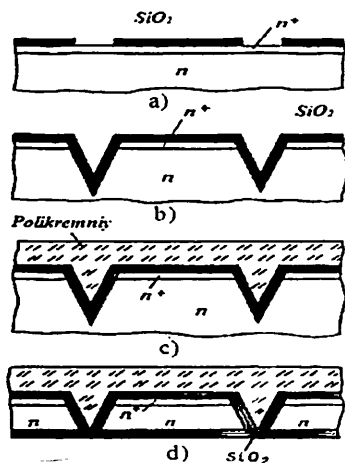
Dielektrik yupqa qatlamlar bilan izolyasiyalash. 2.4-rasmda yupqa dielektrik qatlami bilan elementlarni izolyasiyalash operatsiyalari ketma-ketligi tasvirlangan. Dastlabki n -kremniy plastinada epitaksial p^+ -qatlami oʻstiriladi (2.4,a-rasm). Plastina sirtida 20-30 mikron chuqurlikka anizotrop usulda ishlov berish orqali uchburchakli (V-simon)

shakldagi ariqchalar o'yiladi (2.4, b-rasm). Rel'ef sirt termik oksidlanadi, shuning uchun qalinligi taxminan 1 mkm bo'lgan SiO_2 izolyatsion yupqa qatlam olinadi.

Keyin SiO_2 yuzasiga qalinligi 200 - 250 mkm bo'lgan yuqori omli polikristalli kremniy qatlami yotqiziladi (2.4, s-rasm).

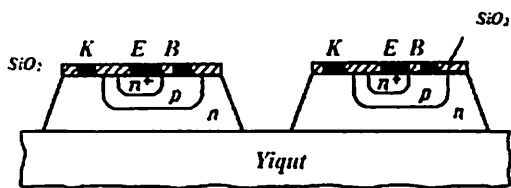
n-kremniy dastlabki monokristali pastdan o'yilgan ariqchalarning tepalari ochilguncha silliqilnadi (2.4, d-rasm), buning natijasida bir-birlaridan SiO_2 qatlami bilan ajratilgan monokristalli sohalar (cho'ntaklar) hosil bo'ladi. Keyin bu cho'ntaklarda integral mikro sxemaning elementlari yaratiladi.

Dielektrik taglikdagi tranzistorli tuzilmalar - DK–dielektrikdagi kremniyni yaratish bilan bog'liq jarayonlar eng keng tarqalgan. Dielektrik taglik sifatida ko'pincha yoqut (saffir) ishlatiladi va bu izolyasiyalash usuli YOK – yoqutdagi kremniy nomini oldi.



2.4-rasm. Dielektrik yupqa qatlamlar bilan elementlarni izolyasiyalash operatsiyalari ketma–ketligi

Yoqutda qalinligi 1 - 3 mkm bo'lgan epitaksial *n*-kremniy qatlami o'stiriladi (2.5 -rasm). "Orolchalar" kremniyni yoqut taglikka lokal ishlov berish natijasida hosil qilinadi. Orolchalarda tranzistorlar tuzilmalari yaratiladi. Shundan so'ng, orolchalar orasidagi havo bo'shliqlari izolyasion polikristalli kremniy bilan to'ldiriladi, uning sirtida sxema elementlarining ulanishlari hosil qilinadi.



2.5-rasm. “Yoqutdagi kremniy” tuzilmasi

Dielektrik bilan izolyasiyalash ikki bosqichli usulga kiradi, chunki ikkita bosqichlar - dielektrik va yarimo‘tkazgich bir vaqtning o‘zida ishlatiladi.

Dielektrik izolyasiya p - n -o‘tishga qaraganda o‘tish toklarini bir necha tartiblarga va solishtirma sig‘imni bir tartibga kamaytirishga imkon beradi. Dielektrik izolyasiyalashning muhim kamchiligi aniq sil-liqlash zarurati hisoblanadi. Dielektrik ariqchalar to‘rtburchakli shaklda ham bo‘lishi mumkin.

Bu izolyasiyalash usulining kamchiliklariga turli jinsli bir necha texnologik jarayonlarni birlashtirish zarurligini kiritish kerak bo‘ladi.

Dielektrik bilan izolyasiyalash va n - p -o‘tish bilan izolyasiyalash bir-lashtiradigan kombinatsiyalangan usul tranzistorli tuzimalarni izolyasiya-lashning eng keng tarqalgan usuli hisoblanadi. Bu variantda n - p -o‘tish bilan izolyasiyalash tuzilmaning pastki qismida va SiO_2 qatlami bilan to‘rtburchakli yoki V-simon ariqchalar sirtlarida amalga oshiriladi.

Asosiy texnologik jarayon asosida yupqa epitaksial kremniy qatla-mining lokal oksidlanishi yotadigan izoplanar texnologiya hisoblanadi. Buning natijasi yon tomondan dielektrik bilan izolyasiyalangan va tag-likdan n - p -o‘tish bilan izolyasiyalangan cho‘ntaklarning paydo bo‘lishi hisoblanadi. Bunday cho‘ntaklarda tranzistorlar tuzilmalar, shuningdek, integral sxemalarning elementlari joylashadi.

Izoplanar jarayonda lokal oksidlanish uchun kremniy nitridan ni-qoblar ishlatiladi. Bu texnologik jarayon kristalldagi elementlarning yuqori joylashtirish zichligini ta‘minlash va tranzistorlar tuzilmalarining yuqori chastotaviy va o‘tish xarakteristikalarini olishga imkon beradi.

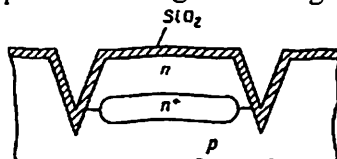
V-ariqchalar bilan yon dielektrik izolyasiyalash usuli keng tarqal-gan (2.6-rasm). Bu texnologik jarayonda epitaksial qatlamni oksidlanishi o‘rniga (100) tekislik bo‘ylab yo‘naltirilgan kristall sirtining lokal anizotrop ishlov berish qo‘llaniladi.

Bu holda, ishlov berish (111) tekislikda o‘tkaziladi, (111) qirralar epitaksial qatlam chegarasi ostida yaqinlashishadi. Hosil bo‘lgan F-

simon ariqchalar kremniy dioksidi yoki polikristalli kremniy bilan to'ldiriladi (2.1,s-rasm).

Ionli reaktiv ishlov berish usulidan foydalanish bilan ariqchanning kengligini toraytirish va uni V-simon shakldan U-simon shaklga o'zgartirish mumkin.

Bu izolyasiyalash usulining kamchiligi (100) tekislikdan foydalanish hisoblanadi, bu sirt nuqsonlari zichligini ortishiga bog'liq.



2.6-rasm. n - p -o'tish va yupqa dielektrik qatlam bilan birgalikda izolyasiyalash

MDYAO'-tranzistorlar tuzilmalari va integral sxemalar elementlarini izolyasiyalashga talablar ularning ishlashi fizik o'ziga xos xususiyatlari tufayli unchalik qat'iy emas. Xuddi shu izolyasiyalash usullari bir qutbli (unipolyar) integral sxemalarda qo'llaniladi.

2.2. Integral tranzistorlar va diodlar

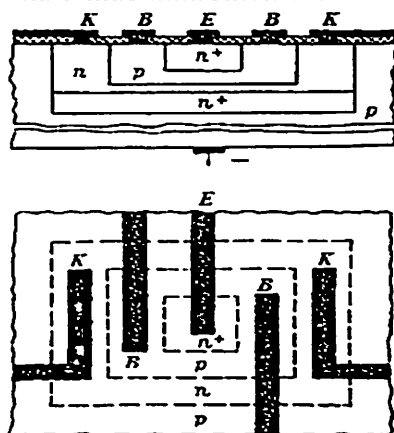
2.2.1. Integral tranzistorlar

Yarimo'tkazgichli IMSlarni konstruksiyalashning (loyihalashning) asosini tizimga kiradigan barcha aktiv va passiv elementlarni amalga oshirish uchun asos bo'lgan tranzistorlar tuzilmasi hisoblanadi. Yarimo'tkazgichli IMSlar tuzilmasining o'ziga xos xususiyati shundaki, barcha elementlar yagona texnologik jarayonda ishlab chiqariladi. Shuning uchun turli elementlarning sohalarini tashkil etadigpn epitaksial va diffuzion qatlamlar bir xil parametrlarga ega bo'ladi. Masalan, rezistorlar yaratish uchun, odatda, bipolyar tranzistorning emitterini yoki bazasini tashkil etadigan qatlamlar ishlatiladi, diodlar va kondensatorlarni yaratish uchun esa tranzistor tuzilmasidagi kabi o'sha o'tishlar ishlatiladi. Tranzistorlar tuzilmasi mikrosxemaning konstruksiyasidagi eng murakkab va aniqlovchi hisoblanadi, boshqa elementlarni amalga oshirish uchun mo'ljallangan barcha qatlamlar va o'tishlar qaysi elementda ishlatilishidan qat'iy nazar, tranzistorning sohalariga muvofiq nomlanadi.

Tranzistorlar ISlarning asosiy elementlari hisoblanadi. Mikrosxe-
 maning tuzilmasini amalga oshirish uchun uni ishlab chiqarish jarayo-
 nida ko'p sonli operatsiyalar bajarilishi kerak. Boshqa elementlar -
 diodlar, rezistorlar va kondensatorlar umumiy texnologik jarayonning
 alohida bosqichlarida yaratilishi mumkin.

Ko'pincha ***n-p-n* turdagi tranzistorlar** ishlatiladi, chunki ularning
 parametrlarini ishlab chiqarishda nazorat qilish osonroq va ularning
 chastotaviy xarakteristikalari yaxshiroq.

Integral bipolar tranzistorlar planar yoki planar-epitaksial texno-
 logiya bo'yicha ishlab chiqariladi. Kristalda diffuziya usuli bilan kollek-
 tor, baza va emitter sohalari yaratiladi (2.7-rasm). Rasmda tranzistor
 kesim va rejada ko'rsatilgan. Tranzistorning tuzilmasi kristallga 15
 mkmdan oshmaydigan kiritiladi, sirdagi tranzistorning chiziqli
 o'lchamlari esa bir necha o'nlab mikrometrlardan oshmaydi.



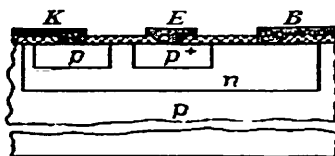
2.7-rasm. *n-p-n* turdagi bipolar tranzistor

Odatda *n-p-n* turdagi tranzistorlar ishlab chiqariladi. Kollektorda
 oshirilgan *n* aralashmalar konsentratsiyasili ichki (yashirin) qatlam qar-
 shilikni kamaytirish va demak kollektor sohasidagi quvvat yo'qotilishini
 kamaytirish uchun xizmat qiladi. Ammo kollektor o'tishda kollektor
 sohasi o'tish katta qalinlikka ega bo'lishi uchun past aralashmalar
 konsentratsiyasiga ega bo'lishi kerak. U holda uning sig'imi kichikroq
 bo'ladi, teshilish kuchlanishi katta bo'ladi. Emitterlar sohasi ham
 qarshilikni kamaytirish va injeksiyani kuchaytirish uchun ko'pincha n^+ -
 turga ega bo'ladi. Tranzistorning yuqorisida SiO_2 oksidining himoya
 qatlami hosil bo'ladi. Bu tranzistorni ulash chiziqlarini kesib o'tmasdan

qo'shni elementlar bilan ulanishi imkoniyatiga ega bo'lish uchun ko'pincha kollektor va baza sohalaridan ikkita chiqishlar chiqariladi (2.7-rasm). Yarimo'tkazgichli ISlarda doimo ba'zi parazit elementlar shakllanishiga e'tibor qaratish lozim. Masalan, 2.7-rasmdan ko'rinib turibdiki, p -turdagi kristallda yaratilgan $n-p-n$ turdagi tranzistor bilan bir qatorda, kristall, tranzistorning kollektor sohasi va sohasi orqali hosil bo'ladigan parazit $p-n-p$ tranzistor mavjud. Yarimo'tkazgichli ISlarning bipolyar tranzistorlarining asosiy parametrlari quyidagicha: baza tokini kuchaytirish koeffitsienti - 200, chegaraviy chastota- 500 MGsgacha, kollektor sig'imi 0,5 - pFgacha, kollektor o'tish uchun teshilish kuchlanishi - 50 Vgacha, emitter o'tish uchun teshilish kuchlanishi - 8 V gacha. n - va p - qatlamlarning solishtirma qarshiligi bir necha yuzlab, n^+ - qatlamlarning solishtirma qarshiligi esa 20 Om/mdan oshmaydi.

$n-p-n$ tranzistor esa kristall bilan birgalikda $n-p-n-p$ parazit tiristorni hosil qiladi. Izolyasiyalovchi o'tishda teskari kuchlanishning mavjudligi tufayli parazit tranzistorlar va tiristor yopiq bo'ladi, lekin ularga qandaydir halaqitlar impulslari tushsa, bu elementlarning keraksiz ochilishi va ishlab ketishi bo'lib o'tishi mumkin. Planar texnologiya bo'yicha ishlab chiqarilgan bipolyar tranzistorlarda emitter va kollektor o'tishlar orqali asosiy tok vertikal oqib o'tadi (agar ISning o'zi gorizontal holatda bo'lsa). Vertikal tranzistorlar deyiladigan bunday tranzistorlar asosan $p-n-p$ turda bajariladi. Ba'zi hollarda $n-p-n$ turdagi tranzistorlar kerak bo'ladi.

Ular odatda shunday tuzilmaga ega bo'ladiki, o'tishlar orqali tok gorizontal yo'nalishda oqib o'tadi (2.8-rasm). Bu tranzistorlar **gorizontal tranzistorlar** deyiladi. Ularda baza vertikal tranzistorlardagiga qaraganda qalinroq olinadi va shunga mos ravishda chegaraviy chastotasi past bo'ladi.

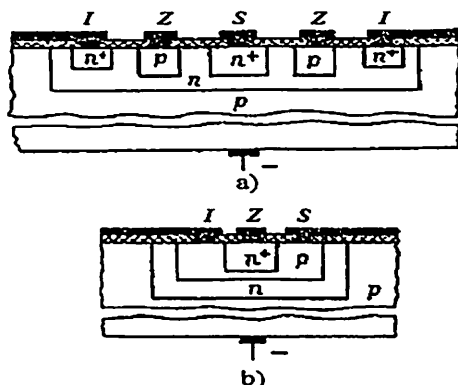


2.8-rasm. $p-n-p$ gorizontal tranzistor

$p-n$ -o'tishli maydon tranzistorlar. Bu tranzistorlar bitta kristallda bipolyar tranzistorlar bilan birgalikda ishlab chiqarilishi mumkin. 2.9, a-rasmdan-kanalli planar maydon tranzistorning tuzilmasi tasvirlangan. n -

turdagi “choʻntak”da stok va istok (n-turli) va zatvorning (p-turdagi) sohalari yaratiladi. Stok markazda joylashgan, uning atrofida zatvor joylashgan. Kanalning dastlabki qalinligini kamaytirish uchun baʼzida ichkariga yashirin p^+ qatlami qoʻyiladi, lekin bu texnologik jarayonlarning murakkablashishiga bogʻliq boʻladi.

Maydoniy tranzistorning boshqa varianti p -turdagi kanalli tranzistor 2.9, b-rasmda tasvirlangan. Uning tuzilmasi oddiy n - p - n -tranzistorning tuzilmasiga mos keladi. Kanal sifatida baza qatlami ishlatiladi. **MOYAOʻ-tranzistorlar.** ISlardagi bipolyar tranzistorlar tobora MOYAOʻ (yoki MDYAOʻ) tranzistorlar bilan surib chiqarilmoqda. Bu MOYAOʻ-tranzistorlarning muhim afzalliklari, xususan, ularning yuqori kirish qarshiligi va tuzilishining soddaligi bilan tushuntiriladi.



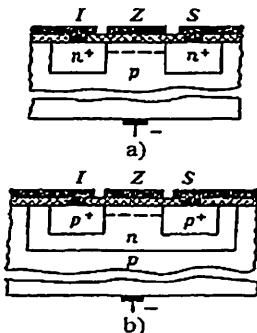
2.9-rasm. n -turdagi (a) va p -turdagi (b) kanalli yarim oʻtkazgichli IS maydon tranzistori

MDYAOʻ-tranzistorlar bipolyar tranzistorlarga qaraganda konstruksiyasi boʻyicha (ularning oʻlchamlari va egallaydigan yuza nisbatan kichik, ularni izolyasiyalash zarurati yoʻq) va elektr fizik parametrlari boʻyicha (past shovqin sathi, tok boʻyicha oʻta yuklanishlarga barqarorlik, yuqori kirish qarshiligi va halaqit bardoshligi, kichik sochilish quvvati, past narxi) sezilarli afzalliklarga ega.

MDOOʻ-tranzistor MDP-mikrosxemalarining asosiy va yagona elementi boʻlishi mumkin. U ham aktiv qurilmalarning (invertorlardagi kalit tranzistor, kuchaytiruvchi tranzistor), ham passiv elementlarning (invertordagi yuklama tranzistori, xotira elementidagi kondensator) funksiyalarini bajarishi mumkin. Shuning uchun, MDYAOʻ-mikrosxemalarni loyihalashda faqat bitta element – MDYAOʻ-tranzistor bilan cheklanish

mumkin, uning konstruktiv o'ldamlari va ulanish sxemasi bajariladigan funksiyaga bog'liq bo'ladi. Bu holat integratsiyalanish darajasida sezilarli yutuqlarni beradi.

Induksiyalangan kanalli MOYAO'-tranzistorlarni ishlab chiqarish ayniqsa oson. Ular uchun p -turdagi kristallda faqat diffuziya usuli bilan n^+ istok va stok sohasini yaratish kerak (2.10,a-rasm). Bu sohalar va taglik orasidagi o'tishlarda teskari kuchlanish saqlanib qoladi va shu tariqa tranzistorlarni kristalldan va bir-birlaridan izolyasiyalash amalga oshiriladi.



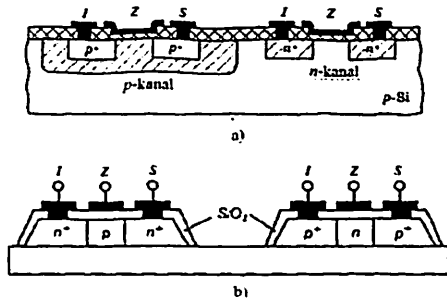
2.10-rasm. n -turdagi (a) va p -turdagi (b) induksiyalangan kanalli yarim o'tkazgichli IS MOYAO'-tranzistori

Kanalni kristalldan izolyasiyalash shunga o'xshash amalga oshiriladi. p -turdagi taglikda p -kanalli MOYAO'-tranzistorni ishlab chiqarish biroz qiyinroq, chunki bunday tranzistor uchun avval n -turdagi "cho'n-tak"ni bajarish kerak bo'ladi (2.10,b-rasm). Ba'zi ISlarda n va p -kanalli MOYAO'-tranzistorlar juftligi qo'llaniladi. Bunday juftliklar komplementar tranzistorlar (KMOYAO' yoki KMDYAO') deyiladi. "Komplementar" so'zi "to'ldiruvchi" (ingl. complementary) degan ma'noni anglatadi. Komplementar tranzistorlar kalit (raqamli) sxemalarda ishlatiladi va ular juda past tok iste'moli va yuqori tezkorlik bilan ishlalib turadi. Bundan tashqari, bipolyar va MOYAO'-tranzistorlar bitta umumiy kristallda ishlab chiqarilgan ISlar uchraydi. Bunday tuzilmalarda induksiyalangan kanalli tranzistorlar ishlatiladi.

Komplementar tuzilmalarning o'ziga xos xususiyati ta'minot va boshqarish kuchlanishlarining qarama-qarshi qutbliligi hisoblanadi (2.11-rasm). Tranzistorlarning bunday kombinatsiyasi yuqori tezkorlik va ta'minot manbaidan juda past quvvat sarfini birlashtirishga imkon beradi. Tranzistorlardan biri taglik turiga bog'liq ravishda izolyasiya-

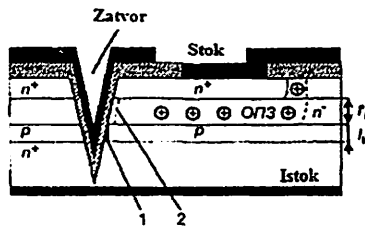
lovchi choʻntakda bajariladi. MDYAOʻ-tranzistorlar orasidagi oʻtish toklari va parazit aloqalarni yoʻqotishga imkon beradigan himoya zonarlari ham yaratiladi.

Ishonchliligi va mashhurligi boʻyicha dielektrik taglikda, masalan, yoqutda amalga oshirilgan KMOYAOʻ-tranzistorlarga ustunlik beriladi. Bu tranzistor va taglik sohalari orasida parazit sigʻimli aloqalar boʻlmaydigan oʻtish tokisiz tranzistorlarni olish imkonini beradi. Bunday texnologiya tranzistorlarning tezkorligini oshirish, ularning asosida nurlanishga chidamli integral sxemalarni yaratish imkonini beradi. Yuqorida koʻrib chiqilgan tuzilmalar planar konstruksiyaga ega, ulardagi tashuvchilari toki gorizontal yoʻnalishda oqadi. V-MDYAOʻ turdagi tranzistorlar taglikda joylashgan istokdan yuqori stokka vertikal tok oqib oʻtadigan tranzistorlar turiga kiradi.



2.11-rasm. Yarimoʻtkazgich kristallida (a) va dielektrikda (b) tayyorlangan komplementar tranzistorlar tuzilmalari

Bu turdagi tranzistorlar dastlabki kremniy tuzilmasida V-simon ariqchalarni tanlab oʻyish yoʻli bilan amalga oshiriladi (2.12-rasm).



2.12-rasm. V-MOYAOʻ-tranzistorning tuzilmasi: 1 - kanal sohasi; 2 - elektronlarning siljish sohasi

V-MDYAO'-tuzilma juda ixcham hisoblanadi. Istok sohasi yer shinasi rolini o'ynaydi va yerga ulash qo'shimcha kristall yuzasini talab qilmaydi. O'tkazuvchi kanal p -qatlamda hosil bo'ladi va uning uzunligi mikronning o'lchamlarida, kengligi esa V-simon chuqurlashishning butun perimetri orqali aniqlanadi.

Katta kanal kengligi katta tokli va katta kuchaytirishli tranzistorlarni olish imkonini beradi. Hajmiy fazoviy zaryad (HFZ) sohasi tranzistorning teshilish kuchlanishini oshirishga va "zatvor-stok" parazit sig'imining qiymatini kamaytirishga imkon beradi. V-MDOO' tranzistorlarning uch o'lhovlilik kristallda joylashtirish zichligi yuqori bo'lgan hajmiy integral sxemalarni yaratishda katta afzallik hisoblanadi.

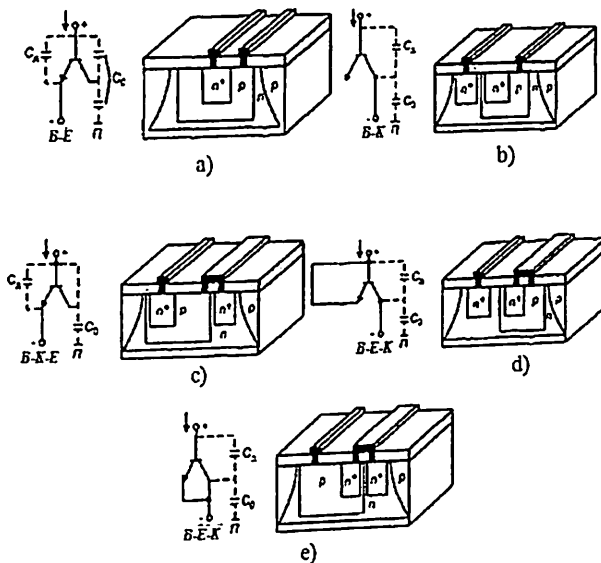
2.2.2. Integral diodlar

Integral mikrosxemalardagi diodlar elektr signallarini qayta ulash, elektr tokini to'g'rilash va signallarni detektorlash bir qancha mantiqiy funksiyalarni bajarishga mo'ljallangan. Oldin IS diodlari turli elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan ikkita sohalarning tuzilmasi shaklida, ya'ni oddiy p - n -o'tish ko'rinishida bajarilgan. So'nggi yillarda diodlar sifatida diodli ulanishdagi bipolyar tranzistorlar ishlatila boshlandi. Tranzistorlar tuzilmasining istalgan p - n -ulanishlari, shuningdek, ularning kombinatsiyasi integral diod sifatida ishlatilishi mumkin. Bu ishlab chiqarish uchun oson bo'lib chiqdi. Tranzistorni diodli ulanishining beshta variantlari mavjud. Ular 2.13-rasmda tasvirlangan va parametrlar bo'yicha bir-birlaridan biroz farq qiladi.

B - K - E variantda baza va kollektor qisqa tutashgan. Bunday diodda qayta tiklanish vaqti, ya'ni ochiq holatdan yopiq holatga o'tish vaqti, eng kichik bo'ib, necha nanosekundga teng. B - E variantda faqat emitter o'tishi ishlatiladi. Bu holda qayta ulanish vaqti bir necha baravar katta bo'ladi. Bu variantlarning har ikkalasi minimal sig'imga (pikofaradning o'ndan bir qismi) va minimal teskari tokka ($0,5 - 1,0$ nA) ega, lekin minimal teshilish kuchlanishiga ham ega. Bu past kuchlanishli ISlar uchun sezilarli emas. Baza va emitter qisqa tutashgan B - E - K variant va B - K variant (bitta kollektor o'tishidan foydalanish bilan) qayta ulanish vaqti va sig'imi bo'yicha taxminan B - E variantga teng, lekin kattaroq teshilish kuchlanishi ($40 - 50$ V) va kattaroq teskari tokka ($15 - 30$ nA) ega. Har ikkala o'tishlar parallel ulangan B - E - K variant varianti eng katta o'tish vaqtiga (100 ns), eng katta teskari tokka (40

nAgacha), bir oz kattaroq sig'imga va birinchi ikkita variantlarda bo'lganidek past teshilish kuchlanishiga ega.

Tranzistorli tuzilmalarni diodlar sifatida ulanishi ekvivalent sxemalari diodning xarakteristikalariga sezilarli ta'sir ko'rsatadigan diodning o'z sig'imi va parazit sig'imga ega bo'ladi.

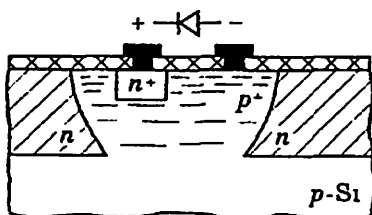


2.13-rasm. Diodli ulanish sxemasi va quyidagi turlardagi integral bipolyar diodlarning konstruksiyalari: a - baza-emitter (B - E); b - baza-kollektor (B - K); s – baza-kollektor-emitter (B - K - E); d – baza-emitter-kollektor (B-E - K); e - baza-emitter-kollektor (B - E - K); S_0 - diodning anod va katod orasidagi sig'imi; C_g - taglikdagi parazit sig'imi; T – taglik

Diodlarning teshilish kuchlanishi ishlatiladigan o'tish turiga bog'liq. Agar kuchli legirlangan emitterli sohaga ega bo'lgan kichik emitterli o'tish ishlatilsa, u holda teshilish kuchlanishlari kichik bo'ladi. Aksincha, kengaytirilgan, kuchsiz legirlangan kollektor o'tishidan foydalanilsa, teshilish kuchlanishlari yetarlicha katta bo'ladi. Umuman olganda, integral sxemalar uchun optimal variant bazaga qisqa tutashtirilgan kollektorli "baza-emitter" o'tish asosidagi B - K - E turdagi va kollektor zanjiri uzilgan "baza-emitter" o'tish asosidagi B - E tuzilmalar hisoblanadi.

Integral stabilitron alohida to'xtalamiz (2.14-rasm). U talab qilinadigan stabillash kuchlanishiga va uning harorat koeffitsientiga

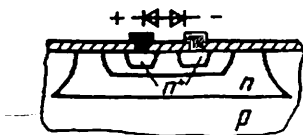
bog'liq ravishda turli xil variantlarda integral tranzistor tuzilmasi asosida yaratilishi mumkin. B - E diodning teskari ulanishi $\pm (2 - 5) \text{ mV}/^\circ\text{C}$ harorat koeffitsientiga ega bo'lgan 5 - 10 V kuchlanishni olish uchun ishlatiladi. Diod ko'chkili teshilish rejimida ishlaydi.



2.14-rasm. Integral stabilitron

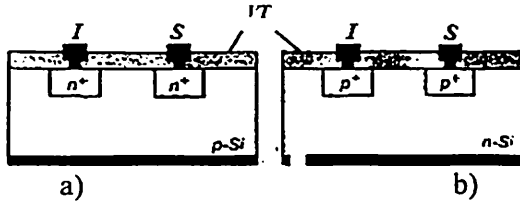
B - E - K diodning teskari ulanishi $(2 - 3) \text{ mV}/^\circ\text{C}$ harorat koeffitsientida 3 - 5 V kuchlanishni (bazaning "teshilishi" hodisasi ishlatiladi) olish uchun ishlatiladi. To'g'ri yo'nalishda ketma-ket ulangan bir yoki bir nechta B - E - K diodlar 0,7 V kuchlanishni yoki unga karrali $2\text{mV}/^\circ\text{C}$ harorat bo'yicha sezgir kuchlanishni olish imkonini beradi.

Baza va emitter qatlamlari asosida shakllantirilgan harorat bo'yicha kompensatsiyalangan stabilitronlarda (2.15-rasm) n^+ -qatlamlar orasiga kuchlanish berilganda, bitta o'tish ko'chkili teshilish rejimida, ikkinchi o'tish to'g'ri ulanish rejimida ishlaydi. Bu ikkita o'tishlarning harorat bo'yicha sezgirliги ishorasi bo'yicha qarama-qarshi, shuning uchun bunday stabilitronning harorat bo'yicha sezgirliги $\pm 2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ dan kichik bo'ladi.



2.15-rasm. Integral harorat bo'yicha kompensatsiyalangan stabilitron

Integral MDYAO'-tranzistorli diodlar ham turli elektr o'tkazuvchanlikli tagliklardagi induksiyalangan kanalli tranzistorlarning $p-n$ - o'tishlari asosida shakllantiriladi (2.16-rasm). Ko'plab ISlarda Shottki to'sig'ili diodlarga ustunlik beriladi, ular $p-n$ -o'tishlar asosidagi integral diodlarga qaraganda kichik o'lchamlar va katta tezkorlikka ega.

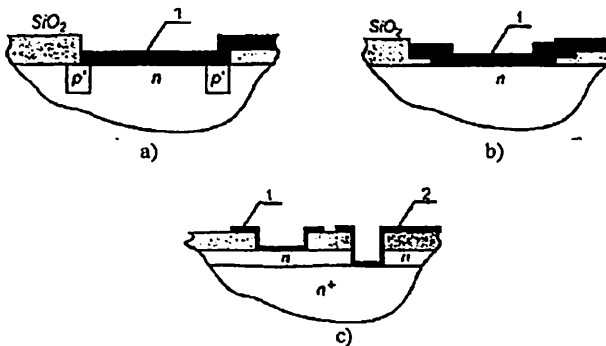


2.16-rasm. Integral MDYAO'-tranzistorli diodlar: a) istok-taglik asosidagi, b) stok-taglik asosidagi

Shottki diodlari donor aralashmasi (10^{17} sm^{-3} dan kam) bo'lgan legirlangan kremniy bilan qoplangan metall kontakt hisoblanadi. 2.17-rasmda planar shottki diodlarining quyidagi konstruktiv yechimlari tasvirlangan:

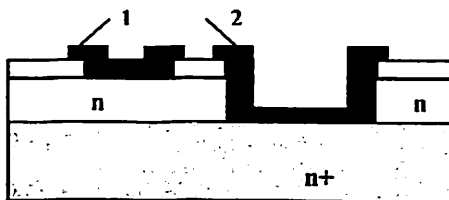
- kremniyning *p*-sohasidan tayyorlangan himoya halqasili konstruktsiya chetlarida kuchli elektr maydonlarni oldini olishga imkon beradi (a);
- kengaytirilgan elektrodlil Shottki diodi teshilishni oldini olishga imkon beradi (b);
- to'g'rilovchi va omik kontaktli konstruktsiya (c).

To'siq balandligi ishlatiladigan metallga bog'liq. Alyuminiy odatda elementlararo ulanishlar uchun ishlatilganligi sababli, uni Shottki diodli integral tranzistorlarda bo'lganidek, Shottki diodlarini shakllantirish uchun ishlatish maqsadga muvofiq. Bu diodlar taxminan 0,7 V ga teng potensial to'siq balandligiga ega, lekin ularning parametrlarining takrorlanuvchanligi past.



2.17-rasm. Shottki planar diodlari uchun konstruktiv yechimlar:
1 - Shottki to'sig'ini hosil qiluvchi metall; 2 – omik kontaktni hosil qiluvchi metall

2.18-rasmda tasvirlangan Shottki diodining kesimi quyidagi elementlarni ifodalaydi: 1 - n -yarimo'tkazgich bilan Shottki to'sig'ini hosil qiluvchi metall; 2 - n^+ -soha bilan omik kontaktni ta'minlovchi metall. 1- va 2-kontaktlar Shottki diodining chiqishlari hisoblanadi.



2.18-rasm. Shottki to'sig'ili diodlar: 1 - Shottki to'sig'ini hosil qiluvchi metall; 2 - omik kontaktni hosil qiluvchi metall

Yuqori sifatli Shottki diodlari uchun alyuminiy o'rniga Ni_xPt_{1-x} platina vaikel qotishmasi ishlatiladi, u kremniy bilan silitsid qatlamini hosil qiladi.

x qiymatlarini o'zgartirish bilan to'siqlarning balandligini $x = 0$ bo'lganda 0,64 eVdan (yoki 100% Ni) $x = 100\%$ bo'lganda (yoki 100% Pt) 0,84 eVgacha olish mumkin. To'siq balandligi ancha past bo'lgan (0,53 dan 0,59 Vgacha) diodlar tantal va volfram qotishmasidan foydalanishda olinadi.

2.3. Maxsus maqsadlardagi tranzistorlar tuzilmalari

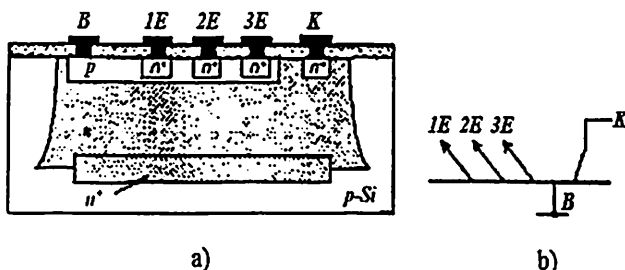
2.3.1. Ko'p emitterli tranzistorlar

Raqamli yarimo'tkazgichli ISlarda oddiy tranzistorlardan tashqari, ko'p emitterli tranzistorlar (KET) ham ishlatiladi.

Ko'p emitterli $n-p-n$ tranzistorlari yuqorida ko'rib chiqilgan bitta emitterli tranzistorlardan farq qiladi, chunki ularda avvalo, baza sohasida bir nechta (odatda 4-8 ta) emitterli sohalar yaratilgan.

Bunday tranzistorlarning qurilish prinsipi va ularning sxemalardagi tasviri 2.19-rasmda keltirilgan. Misol uchun uch emitterli tranzistor olingan. Bunday tranzistorni uchta emitterli istalganiga to'g'ri kuchlanish impulsini berish orqali ochish mumkin. Har bir emitterga ochish impulsining o'z manbai ulanadi. Bunda bunday kuchlanish impulsi boshqa kirish impulslarining manbalariga kirib ketmasligi juda

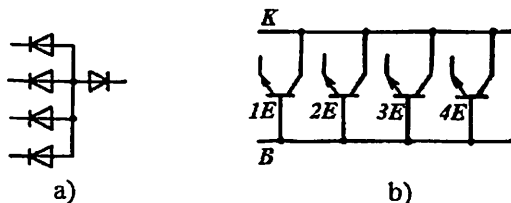
muhim, chunki bu momentda ishlayotgan emitter o'tishlar teskari kuchlanish ostida bo'ladi.



2.19-rasm. Ko'p emitterli tranzistorning tuzilmasi (a) va shartli grafik belgilanishi (b)

Shunga e'tibor berish kerakki, ko'p emitterli tranzistorda ishlayotgan emitter baza va boshqa qo'shni emitter bilan birgalikda parazit tranzistorni hosil qiladi. Parazit tranzistorning ta'sirini kamaytirish uchun qo'shni emitterlar orasidagi masofa kamida 10 μm ni tashkil qiladi, ya'ni bunday parazit tranzistorda nisbatan qalin baza olinadi.

KETlarning asosiy qo'llanishig sohasi tranzistor-tranzistor mantiq'i (TTM) raqamli mikrosxemalari hisoblanadi. Bu mikrosxemalarda ular kirishda qo'yiladi va $m + 1$ diodlardan tashkil topgan diodli mantiqiy yacheyka vazifasini bajaradi, bu yerda m - TTL sxemasining kirishlari bo'lgan emitterlar soni. Ko'p emitterli tranzistorni alohida n - p - n tranzistorlar to'plami sifatida taqdim etish mumkin (2.20-rasm), ularning soni emitterlar soniga teng bo'ladi. Bu tranzistorlarning barcha bazaviy chiqishlari, shuningdek, kollektorlar chiqishlari o'zaro ulanadi.

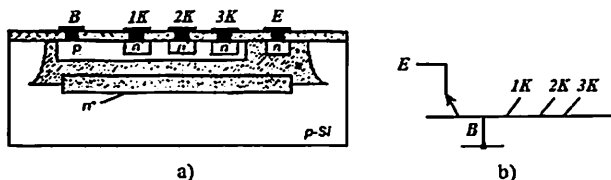


2.20-rasm. Ko'p emitterli tranzistorning diodli mantiqiy yacheykasi (a) va ekvivalent sxemasi (b)

TTL sxemalarida KETlardan foydalanishning asosiy o‘ziga xususiyati shundaki, sxemaning istalgan holatida uning kirishiga ulangan KETning kollektor o‘tishi to‘g‘ri yo‘nalishda surilgan bo‘ladi. Shunday qilib, alohida tranzistorlar mos emitterdagi kuchlanishga bog‘liq ravishda invers rejimda yoki to‘yinish rejimida bo‘ladi.

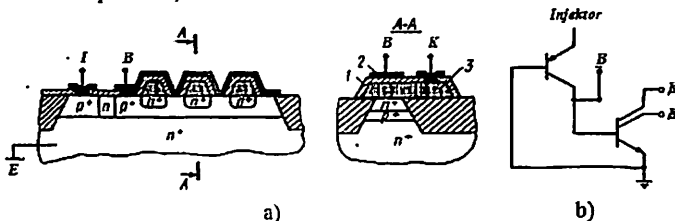
2.3.2. Ko‘p kollektorli tranzistorlar

Ko‘p emitterli tranzistorlar kabi ko‘p kollektorli tranzistorlar (KKT) ishlatiladi. Ularning tuzilishi va shartli grafik belgilanishi 2.21-rasmda tasvirlangan. Ko‘p kollektorli tranzistorning (KKT) tuzilishi “o‘ta integratsiyalangan” IMSlar nomini olgan injeksion mantiqli (I^2L) IMSlarning asosiy tuzilmaviy birligi hisoblanadi, chunki ularda $p-n-p$ va $n-p-n$ tranzistorlarining tuzilmalari bir-birlari bilan birlashtirilgan. Bitta tranzistorning kollektori bir vaqtning o‘zida boshqa tranzistorning bazasi vazifasini bajaradi.



2.21-rasm. Ko‘p kollektorli tranzistorning tuzilishi (a) va shartli grafik belgilanishi (b)

Bu konstruktsiya tufayli sirt maydonini sezilarli tejash ta‘minlanadi, chunki qo‘shimcha izolyatsiyalash sohalari va elementlararo ulanishlar zarurati bo‘lmaydi. I^2L sxemasidagi KKTning tuzilishi 2.22-rasmda tasvirlangan va invers rejimda ulangan KETni ifodalaydi, ya‘ni umumiy emitter epitaksial qatlam, kollektorlar esa kichik n^+ sohalari hisoblanadi.



2.22-rasm. I^2L elementning tuzilishi (a) va ekvivalent elektr sxemasi (b):

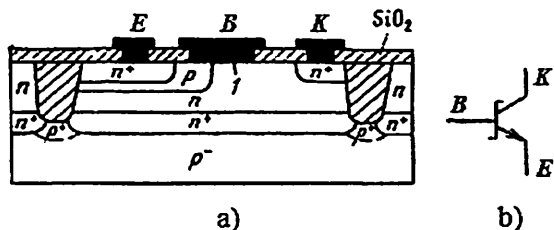
1 - kremniy oksidi, 2 - metall o‘tkazgichlar, 3 – polikremniy yupqa qatlami

Bu holda tuzilmaning muhim elementi gorizontaal $p-n-p$ tranzistor hisoblanadi. Shuni ta'kidlash kerakki, uning bu sxemadagi emitteri p -turli tuzilmaning baza sohasi yaqinida joylashgan. Injektorga (I) siljitish kuchlanishi berilganda gorizontaal $p-n-p$ tranzistor KKT bazasiga injeksiyalaydigan teshiklar, agar bu baza toki elektrod (B) orqali chiqarilmasa, uni to'yinish holatiga keltiradi. Shunday qilib, bu element ikkita barqaror holatlarga ega bo'ladi, elektrod (B) orqali tok borligi yoki yo'qligiga bog'liq ravishda KKT tranzistor kesish rejimida yoki to'yinishi rejimida bo'ladi.

Bu tranzistorni konstruksiyalashdagi asosiy muammo umumiy n -emitterdan n -kollektorlardan har biriga yetarlicha yuqori tokni uzatish koeffitsientini ta'minlash hisoblanadi. Bunga yashirin n^+ qatlamni iloji boricha bazaviy qatlamga yaqinlashtirish va n^+ qatlamlarni iloji boricha bir-birlariga yaqinlashtirish orqali erishiladi

2.3.3. Shottki to'siqli tranzistorlar

Shottki to'siqli tranzistor kollektor o'tishi Shottki diodi bilan shuntlangan bipolyar tranzistor hisoblanadi. Shottki diodi (SHD) metallni yarimo'tkazgich bilan kontaktiga ega va to'g'rilash xususiyatlarga ega. Uning afzalligi diffuzion sig'imning yo'qligi hisoblanadi va shuning hisobiga diodning ishchi chastotalari 15GGsgacha yetadi. 2.23-rasmda Shottki to'sig'ili tranzistorning sxemasi va yarimo'tkazgichli ISda bunday tranzistorning tuzilmasi tasvirlangan.

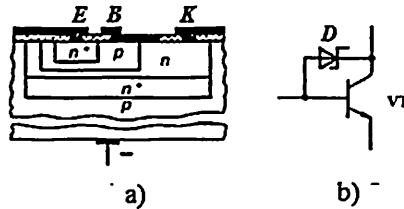


2.23-rasm. Shottki to'siqli tranzistorning tuzilmasi (a) va uning tenglashtirilgan elektr sxemasi (b)

Unda alyuminiy metallashtirish p -turdagi baza bilan to'g'rilanmaydigan kontakti ta'minlaydi, lekin n -turdagi kollektorli Shottki diodi

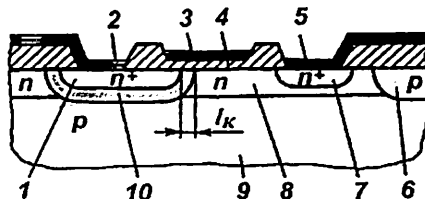
to'g'rilaydigan kontaktni hosil qiladi. Bunday tranzistor kalit rejimida ishlaganda tezkorlik sezilarli oshadi. Tranzistor ochiq holatdan yopiq holatga tezkor o'tadi.

Shottki diodli tranzistorning konstruksiyasi 2.24,a-rasmda keltirilgan. Shottki diodi tranzistorning kollektor o'tishini shuntlaydi. Oddiy tranzistordan farqli ravishda bu yerda bazaviy kontakt teshigi n -turdagi kollektor sohasi tomoniga kengaytiriladi. Natijada, alyuminiy metallashtirish bazaning p -sohasi va kollektor qatlaminin n -sohasi bilan kontaktni ta'minlaydi.



2.24-rasm. Shottki diodli tranzistorning tuzilmasi (a) va uning shartli belgilanishi (b)

Prinsipial elektr sxemalarda Shottki diodli tranzistor uchun 2.24, b-rasmda tasvirlangan maxsus grafik belgilash ishlatiladi. p -turdagi baza qatlamida joylashgan alyuminiy qatlam u bilan omik kontakt hosil qiladi. Nisbatan yuqori omli kollektor sohasiga ega bo'lgan chegaradagi alyuminiy qatlami to'g'rilovchi kontakt - Shottki o'tishini ta'minlaydi. Shottki diodi tranzistorning kollektor o'tishiga parallel ulangan bo'lib qoladi.



2.25-rasm. Epitaksial-planar D-MDYAO⁴ tranzistorning tuzilmasi:
 1, 7-stok va istokning diffuzion sohalari; 2, 5 - alyuminiy metallashtirish shinalari; 3 - zatvor; 4 -zatvor osti yupqa oksidi, 6 - izolyasion soha, 8 - epitaksial qatlam, 9 - taglik; 10 - kanalni shakllantirish uchun diffuziya usuli bilan olingan p -turdagi soha

SHDli tranzistorlarni qo'llanishining asosiy sohasi oshirilgan tezlikli raqamli mikrosxemalar hisoblanadi. Ta'kidlaymizki, SHDli tranzistorlardan foydalanish, faqat tranzistor to'yinish rejimida bo'lsa, masalan, TTL sxemalarida ishlasa, ijobiy samara beradi.

Diffuzion D-MOYAO' tranzistorlarning konstruksiyasi (2.25-rasm) kanal uzunligini submikron o'lchamlarga qisqartirish hisobiga yuqori tezkorlikni ta'minlash uchun maxsus ishlab chiqilgan.

Qisqa kanal sekin, yaxshi nazorat qilinadigan va boshqariladigan diffuziya jarayoni hisobiga bipolyar tranzistorda yupqa bazani shakllantirish prinsipi bo'yicha olinadi (shuning uchun D-MOYAO', ya'ni diffuzion MOYAO' tranzistor deyiladi). Bu tranzistorda p -turdagi kanalning sohalari, n -turdagi istok o'sha bir oksidni qobig'dagi oynada ikkita diffuziya jarayonlarida shakllantiriladi. D-MOYAO' tranzistorning konstruksiyasi induksiyalangan kanalli D-MOYAO' tranzistorda bo'lganidek, stok va istok sohalari bilan zatvorni birlashning yuqori aniqligini talab qilmaydi. Shunga ko'ra, hatto ruxsat etish qobiliyati bo'yicha fotolitografik jarayonning cheklangan imkoniyatlarida 0,4 - 1 mm kanal uzunligi MOYAO'-tuzilmalarini amalga oshirish ham mumkin bo'ldi.

Qisqa kanal ikki p - n -o'tishlar oralig'idagi p -turdagi elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan kremniyning sirtga yaqin sohasida shakllanadi. To'yinish rejimida kanal va istok orasidagi siyrak n -sohada kanal orqali o'tadigan elektronlar stokning n^+ -sohasiga tutash hajmiy fazoviy zaryad sohasiga injeksiyalanadi va kuchli elektr maydonda istok tomon siljiydi. Xuddi shunday siljish sohasi $U_c > U_{c0'y}$ bo'lganda oddiy MOYAO'-tranzistorlarida kuzatiladi.

Shunday qilib, konstruksiyalardagi farqlarga qaramay, D-MOYAO' tranzistorlarning ishlash prinsipida ham bipolyar texnologiyalardagi yutuqlar (ikkita p - n -o'tishlar orasidagi kichik masofa) va MOYAO'-tuzilmalarni ishlab chiqarish texnologiyasi yutuqlaridan (kichik qalinlik, past nuqsonlilik va sirt holatlarining zichligiga ega bo'lgan yupqa zatvor osti dielektrigining hosil bo'lishi) foydalanilgan. Epitaksial tuzilmalardan foydalanish bilan D-MOYAO' tranzistorlarini yaratish o'sha bir taglikda bipolyar va p - n -tranzistorlar va ulardan izolyasiyalangan D-MOYAO' tranzistorlarini shakllantirishga imkon beradi, bu ham analog (masalan, operatsion kuchaytirgichlar), ham mantiqiy mikrosxemalarni ishlab chiqarish uchun alohida ahamiyatga ega.

Bu tuzilmaning kamchiligi kristallda elementlarning past zichligi hisoblanadi, lekin o'zining noyob o'ziga xos xususiyatlari tufayli bu turdagi tranzistorlar yuqori ishchi kuchlanishli yuqori tezlikli qayta ulash qurilmalarida va yuqori quvvatli qurilmalarda ishlatilishi mumkin.

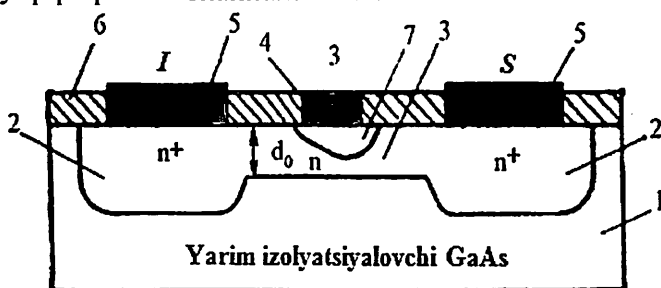
2.3.4. Metall - yarimo'tkazgich boshqarish o'tishiga ega bo'lgan maydon tranzistorlar

Metall-yarimo'tkazgich boshqarish o'tishiga ega bo'lgan maydon tranzistorlar (qisqacha MEP, PTSH yoki chet el adabiyotlarida MESFET - metal-semiconductor field effect transistor) gallyiy arsenidli mikroshemalarining asosiy aktiv elementlari hisoblanadi.

Ularning ishlab chiqishdan asosiy maqsad tezkorlikni oshirish bo'ldi. Raqamli gallyiy arsenidli mikroshemalar o'ta yuqori tezlikli mikroshemalar sinfiga kiradi, analog mikroshemalar esa o'ta yuqori chastotalar diapazonida ishlash uchun mo'ljallangan. MEP-tranzistorning eng oddiy tuzilmasi 2.26-rasmda tasvirlangan.

Tranzistor 1 taglikda legirlanmagan gallyiy arsenididan yaratiladi. Legirlanmagan gallyiy arsenidi kuchsiz ifodalangan p -turdagi o'tkazuvchanlikka ega. Monokristallarni o'stirishda uni kamaytirish uchun ba'zan akseptorlarning ta'sirini kompensatsiyalaydigan xrom atomlari oz miqdorda kiritiladi. Bunday materialdan tayyorlangan tagliklar oshirilgan solishtirma qarshilikka ega bo'ladi va ular yarim izolyatsiyalovchi materiallar deyiladi.

Taglik sirtida ionli legirlash usulida n^- -turdagi stok va istokning 2 ta kuchli legirlangan sohalari, keyin qalinligi 0,1 mkm bo'lgan n -turdagi 3 kanalning yupqa qatlami shakllantiriladi.



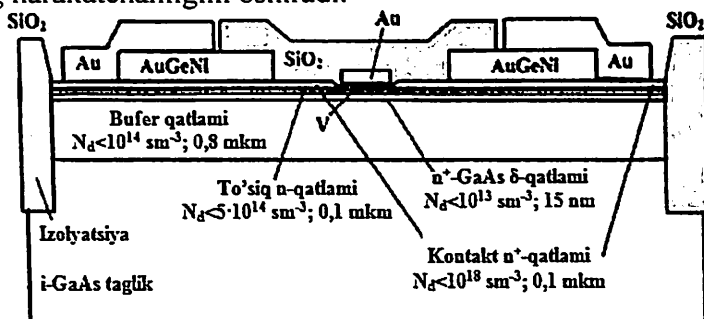
2.26-rasm. MEP-tranzistorning tuzilmasi: 1 - taglik, 2 - istok va stoking diffuziya sohalari, 3 - kanal sohasi, 4 - zatvor chiqishi, 5 - istok va stoking chiqishlari, 6 - izolyasion qatlam, 7 - fazoviy zaryad sohasi

Kanalidagi donordir konsentratsiyasi 10^{17} sm^{-3} ni tashkil qiladi. Legirlash aralashmalari (donordir) sifatida odatda kremniy, selen, oltingugurt va boshqalar ishlatiladi.

3 qatlam ustidagi taglik sirtiga 4 zatvorning metall elementi masalan, titan-volfram qotishmasi ko'rinishida yuritiladi, 5 elektrodlar uchun stok va istok sohasiga omik kontaktni ta'minlaydigan oltin-germaniya kompozitsiyasi ishlatiladi. Kontaktlar uchun ishlatilmaydigan taglik sirtiga 6 dielektrik qatlam, masalan, kremniy dioksidi yuritiladi.

Zatvorning metall elektrodi 3 qatlam bilan 0,8 V kontakt potentsiallar farqiga ega bo'lgan SHottki to'g'rilash kontaktini hosil qiladi. Stok va istok orasidagi o'tkazuvchi kanal 3 qatlamda joylashadi va yuqoridan SHottki to'sig'ining siyrak sohasi bilan, pastdan esa taglik bilan chegaralangan.

Induksiyalangan kanalli kremniyli MDOO'-tranzistorlardan farqli ravishda MEP-tranzistorda zatvor - istok va zatvor - stok parazit sig'imi juda kichik, chunki zatvor 2 sohani qamrab olmaydi. Bundan tashqari, istok-taglik va istok-taglik to'siq sig'imlari kichik bo'ladi. Taglik yarim izolyatsiyalovchi hisoblanadi, undagi aralashmalarning konsentratsiyasi juda past, o'tishlarning siyrak sohasining qalinligi katta bo'ladi. Kremniyli raqamli mikrosxemalarga qaraganda gallyi arsenidli raqamli mikrosxemalarning tezligini oshirish asosan ularda ishlatiladigan MEP-tranzistorlarning qiyaliklarining oshishi, shuningdek, oraliq vaqt va tranzistorlarning parazit sig'imlarni kamayishiga bog'liq. Chegaraviy chastotaning ma'lum ortishiga legirlanmagan aktiv qatlam va taglik orasida joylashgan kuchli legirlangan yupqa n^+ -GaAs qatlami bo'lgan maxsus δ -qatlamdan foydalanish bilan erishiladi (2.27-rasm). Bunday tuzilmada kanalidagi elektronlar yupqa legirlangan qatlam atrofida guruhlanadi, bu ularning harakatchanligini oshiradi.



2.27-rasm. Zamonaviy MEP-tranzistorining tuzilmasi

MEP-tranzistorlarning chastotaviy xususiyatlarining yaxshilanishi nafaqat kanalidagi elektronlarning yuqori harakatchanligi, balki yarim izolyasiyalovchi GaAs taglikning yuqori dielektrik xossalariga ham bog'liq.

Kremniyli MDOO'-tranzistorlarga qaraganda, MEP-tranzistorlarda bo'sag'aviy kuchlanishining o'zgarishi, taglik bo'yicha boshqarish, kanalning yopilishi, shuningdek, chiqish o'tkazuvchanligining oshishi kabi qisqa kanalning zararli ta'siri sezilarli kam namoyon bo'ladi.

MEP-tranzistorlarning asosiy kamchiligi (MDOO'-tranzistorlar bilan taqqoslaganda) komplementar juftlarni amalga oshirish uchun p -kanalli tranzistorlarni yaratishning qiyinligi hisoblanadi.

Boshqaruvchi $n-p$ o'tishli p -kanalli tranzistorlarni yaratish mumkin, lekin ular GaAsda kovaklarining past harakatchanligi tufayli sezilarli yomon chastotaviy xususiyatlarga ega. Yana bir kamchilik zatvor-istok to'siq o'tishining ochilishi tufayli V musbat kuchlanishni 0,8 - 1 V darajasida cheklanishidan iborat.

2.4. Yarimo'tkazgichli doimiy xotira qurilmalarining elementlari va zaryadli aloqa qurilmalar

2.4.1. MDYAO'-tranzistorlaridagi DXQ

Yuqori integratsiyalanish darajasiga erishish imkoniyati va mos ravishda katta axborot sig'imi, shuningdek, past energiya sarfi tufayli MDYAO' tranzistorlardagi DXQlar eng keng tarqalgan. Mikroprotsesorli tizimlar uchun qayta dasturlanadigan xotira qurilmalariga - ma'lumotlar yillar davomida saqlanishi va bu ma'lumotlarni to'liq yoki qisman o'chirib, yangisini qo'shish mumkin bo'lgan qayta dasturlanadigan doimiy xotira qurilmalariga (QDDXQ) ega bo'lish kerak.

QDDXQlarni amalga oshirish uchun dielektrikka kiritilgan zaryadni o'zgartirish hisobiga bo'sag'aviy kuchlanishni teskari yo'nalishda o'zgartirish mumkin bo'lgan MDYAO' tranzistor zarur bo'ladi. QDDXQ KISlarning elementlar bazasi bo'lib quyidagilar xizmat qiladi:

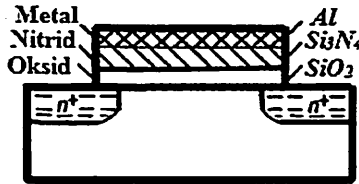
- metall-nitrid-oksit-yarimo'tkazgich tuzilmasiga ega bo'lgan MDYAO' tranzistorlar (MNOYAO'-tranzistor);

- suriladigan zatvorli ko'chki-injeksion MDYAO'-tranzistorlari (LIPZMDP tranzistorlar);

- suriladigan va boshqariladigan zatvorli MDYAO' tranzistorlar (ikki zatvorli MDYAO'-tranzistor).

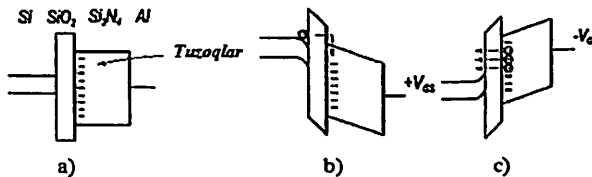
2.4.2. MNOYAO'-tranzistor

MNOYAO'-tranzistorda (2.28-rasm) zatvor osti dielektrigi sifatida ikki qatlamli qoplama, birinchi dielektrik sifatida kremniy dioksidning tunnelli-shaffof qatlami ($d_{ox} < 50 \text{ \AA}$) ishlatiladi. Ikkinchi dielektrik sifatida qalin ($d \approx 1000 \text{ \AA}$) kremniy nitrid qatlami ishlatiladi. Si_3N_4 kremniy nitrid ta'qiqlangan zonada chuqur tuzoqqa ega va dielektrik doimiysining qiymati kremniy dioksidi dielektrik doimiysining qiymatidan ikki barobar katta bo'ladi. Si_3N_4 nitrid ta'qiqlangan zonasining kengligi SiO_2 dioksidning ta'qiqlangan zonasi kengligidan kichikroq bo'ladi.



2.28-rasm. MNOYAO'-tranzistorning konstruksiyasi

Xotirada saqlash qurilmasi rejimida ishlashda MNOYAO'-tranzistorda kechadigan asosiy fizik jarayonlarni ko'rib chiqamiz. 2.29-rasmda MNOYAO'-tranzistor zonaviy diagrammasi keltirilgan.



2.29-rasm. MNOYAO'-tranzistor zonaviy diagrammasi: a - zatvordagi kuchlanish nolga teng, tuzoqlar to'ldirilmagan; b - axborot zaryadini yozish; c - axborot zaryadini o'chirish

Zatvorga $+V_{GS}$ musbat kuchlanish impulsi berilganda oksid va nitridning dielektrik doimiylari qiymatlaridagi farq tufayli oksidda kuchli elektr maydoni paydo bo'ladi, u elektronni yarim o'tkazgichdan oksid orqali nitridga tunnelli injeksiyalanishini keltirib chiqaradi. Injeksiyalan-

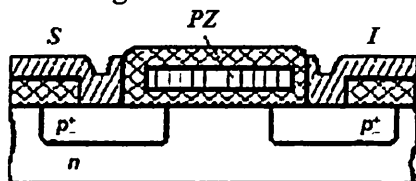
gan elektronlar kremniy nitridining ta'qiqlangan zonasida tuzoqlar orqali ushlanadi.

Zatvordan kuchlanishni olingandan so'ng, injeksiyalangan zaryad tuzoq markazlarida uzoq vaqt saqlanadi, bu o'rnatilgan inversion kanalning mavjudligiga mos keladi.

Zatvorga - V_{GS} manfiy kuchlanish impulsi berilganda, kremniy nitrididagi tuzoqlardan elektronlar yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanlik zonasiga tunellashtirish bo'lib o'tadi (2.29, s-rasm). Zatvordan kuchlanish olingandan so'ng inversion kanali yo'qoladi.

2.4.3. Suriladigan zatvorli MDYAO'-tranzistor

Suriladigan zatvorli tranzistorlarda injeksiyalangan zaryad birinchi va ikkinchi zatvor ostidielektrik qatlamlari orasida joylashgan suriladigan zatvorda saqlanadi. Suriladigan polikremniy zatvorli ko'chki-injection MDYAO'-tranzistorning tuzilmasi 2.30-rasmda tasvirlangan.



2.30-rasm. Suriladigan zatvorli MDYAO'-tranzistor

Suriladigan zatvorni zaryadlash mexanizmi quyidagi samaralarga asoslangan. p -kanalli MDYAO'-tranzistorning stok sohasiga manfiy potensial beriladi. Manfiy siljitish kuchayishi bilanundagi siyrak qatlam va elektr maydon ortadi. Siyrak qatlamning elektr maydoni ta'siri ostida stok p^+ -sohasidan noasosiy tashuvchilar - elektronlar taglikning n -sohasiga o'tkaziladi.

Maydon kuchlanganligining ma'lum chegaraviy qiymatida n -sohada elektronlarning ko'chkisimon ko'payishi mumkin bo'ladi. Shunday qilib, teskari surilgan stok n - p -o'tishning siyrak sohasidagi elektr maydon-zatvor osti oksidi orqali suriladigan zatvorga o'tish uchun yetarli energiya zaxirasiga ega bo'lgan ko'p sonli yuqori energiyali ("qaynoq") elektronlarni shakllantiradi, chunki unga oldindan ularning tortadigan musbat siljitish kuchlanish beriladi.

Suriladigan zatvorni elektronlar bilan zaryadlashdan so'ng, p -turdagi MDYAO' - tranzistorning kanali sohasida invers qatlam paydo bo'ladi,

tranzistor ochiq holatga o'tadi, ya'ni "0" ni saqlaydi.

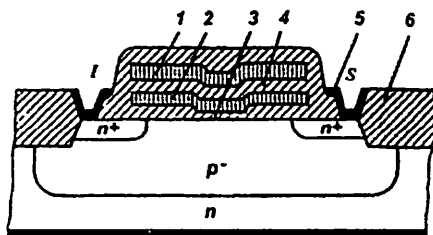
Binobarin, suriladigan zatvor har tomondan kremniy dioksidi bilan o'ralgan, suriladigan zatvordagi zaryad uzoq vaqt saqlanadi. Zaryadning barqarorligi bo'yicha tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, hatto 10 yil davomida 125 °C haroratda ham, zaryad faqat dastlabki qiyma-tidan 30% ga kamayishi mumkin.

QDDXQda saqlanadigan ma'lumotlarni o'chirish axborot maydonini ultrabinafsha nurlar bilan nurlantirishda amalga oshiriladi. Bunda nurlanish to'liq uzunligi fotonlar taglikka qaytishda teskari yo'nalishda o'tish uchun zarur bo'ladigan energiyani elektronlarga berishi uchun yetarli bo'lishi kerak. O'chirish uchun elektron qurilmadan xotira mikrosxemasini olish kerak.

2.4.4. Ikki zatvorli MDYAO'-tranzistor

Katta axborot sig'imili va yuqori tezkor ESPDXQO' KISlarning xotira elementlari har ikkala zatvorlar uchun polikremniyli yupqa plyonkalar yordamida kombinatsiyalangan texnologiya asosida ishlab chiqariladigan suriladigan va boshqarishi zatvorli n -kanalli MDYAO'-tranzistorlar hisoblanadi. 2.31-rasmda O'KISning bunday xotirada saqlash MDYAO'-elementi tuzilmasining varianti tasvirlangan.

Bu turdagi tranzistorlarning asosiy farqli o'ziga xos xususiyati elektr impuls yordamida ma'lumotlarni o'chirish (suriladigan zatvordan to'plangan zaryadni olib tashlash) jarayonining mumkinligi hisoblanadi. Ma'lumotlarni elektr o'chirishga ega bo'lgan doimiy xotira qurilmalari ma'lumotlarni hammasini emas, balki faqat bir qismini qayta yozishga imkon beradi, bunda uni elektron tizimdan olish talab qilinmaydi.



2.31-rasm. Elektr o'chiriladigan QTDXQning ikkita zatvorli MDYAO'-tranzistori: 1-boshqarish zatvori, 2 – suriladigan zatvor, 3 - yupqa tunnelli dielektrik, 4 – zatvorlararo dielektrik, 5 - alyuminiy metallashtirish, 6 - elementlararo izolyasiyalash

Xotirada saqlash elementini boshqarish suriladigan zatvor – boshqarish zatvori va suriladigan zatvor - taglik sig‘imli aloqa orqali amalga oshiriladi. Maksimal sig‘imli aloqaga erishish uchun zatvorlararo dielektrikning qalinligi zatvor osti dielektrining qalinligi bilan mutanosib bo‘lishi kerak.

Tranzistorning turli holatlari suriladigan zatvordagi zaryad bilan aniqlanadi. Suriladigan zatvorni quyidagi ikki usullarda zaryadlash mumkin:

- zatvor osti dielektrik qatlami orqali “qaynoq” elektronlarni injeksiyalash;

- zatvorosti yupqa dielektrik qatlami orqali tashuvchilarni tunnellaritirish.

Birinchi holda, suriladigan zatvorni zaryadlash rejimida bir vaqtning o‘zi dastok va zatvorga tranzistor kanalida zarbali ionlanishni keltirib chiqarishga yetarli bo‘lgan katta musbat kuchlanish beriladi. Qaynoq elektronlar soni MDYAO‘-tranzistor kanalidagi tok orqali aniqlanadi.

Qaynoq elektronlarni suriladigan zatvorga injeksiyalash boshqarish zatvori tomonidan tortuvchi maydon ta‘sirida amalga oshiriladi. Ikkinchi holda, tashuvchilarni tunnelli o‘tkazishli IMSda suriladigan va boshqarish zatvorlarida, yupqaroq tunnelli dielektrikka o‘tish sohalarida zinalar mavjud (2.31-rasm). Yuqori zatvorga musbat qutbli kuchlanish berilganda qolgan elektrodlardagi kuchlanish nolga teng bo‘lganda musbat suriladigan zatvorga sig‘imli aloqa orqali musbat kuchlanish uzatiladi.

Bunda elektronlar tunnelli dielektrikdan o‘tadi va suriladigan zatvorni zaryadlaydi. Va, aksincha, boshqarish zatvoridagi kuchlanish nolga teng bo‘lganda stok, istok va taglik sohalariga musbat kuchlanish berilganda suriladigan zatvorning razryadlanishi bo‘lib o‘tadi. Shuni ta‘kidlash kerakki, bu tuzilmada ma‘lumotlarni tanlab o‘chirishni amalga oshirish qiyin bo‘ladi.

Agar tunnelli o‘tish sohasi stok sohasining ustida joylashgan bo‘lsa, tanlab (baytlab) yozishdan tashqari, suriladigan zatvor va stok orasidagi potentsiallar farq ta‘sirida tanlab o‘chirishni amalga oshirish mumkin. Matritsali to‘plagich va boshqarish sxemasi orasida ajratish maqsadida xotirada saqlash elementi n -turagi taglikda shakllantirilgan p -cho‘ntakka joylashtiriladi.

Shunday qilib, tunnelli dielektrikli tuzilmalar ham dasturlashni, ham xotira elementini o‘chirishni oddiy va takrorlanadigan tarzda bajarishga imkon beradi. To‘plangan zaryad qiymati xotira yacheykasining geomet-

rik parametrlari va yacheykaning boshqarish zatvori va stokiga qo‘yiladigan yozish impulsLARining amplitudasi orqali aniqlanishi juda muhim.

2.4.5. Zaryadli aloqa qurilmalar

Zaryadli aloqali qurilmalar (ZAQ yoki inglizcha CCD- Charge Coupled DevISe) funksional elektronika qurilmasiga (FEQ) misol hisoblanadi. CCD 1970 yilda Bell Laboratoriesda ixtiro qilingan. U dastlab xotira va ma’lumotlarga ishlov berish qurilmasi sifatida ishlatilgan. Hozirgi vaqtda ZAQLar asosan yorug‘likni elektr signalga o‘zgartirgichlar hisoblanadi. Bunday o‘zgartirgichlar videokamera va raqamli kameralarda (digital camera - «photosmart») ishlatiladi.

ZAQLarda ma’lumotlarni uzatish zaryadni uzatish hisobiga bo‘lib o‘tadi. Aktiv muhit yarimo‘tkazgichli yupqa qatlam hisoblanadi. Ma’lumotlarni tashuvchi bo‘lib an’anaviy integral elektronikadagi ma’lumotlarni tashuvchi bo‘lgan tok yoki potentsiallar farqidan farqli ravishda zaryad to‘plamlari (zaryad paketlari) xizmat qiladi. Zaryad to‘plamlari yarimo‘tkazgichli plastina yuzasiga yaqin joylashgan sohada qo‘zg‘aladi, boshqarish ostida harakatlanadi va talab qilinadigan tarzda o‘zgartiriladi.

Masalan, kechikitirish liniyalarida ma’lumotlarni yozish quyidagi shaklda o‘tkaziladi: “1” - zaryadlar to‘plami bor, “0”- zaryadlar to‘plami yo‘q.

ZAQLar quyidagi o‘ziga xos xususiyatlar bilan ajralib turadi:

- raqamli va analogli ma’lumotlar bilan ishlash imkoniyati, demak, ular asosida raqamli va analog qurilmalarni yaratish imkoniyati;

- ma’lumotlarni saqlash va ishlov berish funksiyalarining kombinatsiyalanishi;

- yorug‘lik oqimini keying o‘qish bilan elektr zaryadiga o‘zgartirish imkoniyati, demak, televizion tasvir o‘zgartirgichlarini yaratish imkoniyati;

- elementlarning topologik oddiyligi, bir xilligi va muntazamligi, demak yuqori tezkorligi.

2.32-rasmda ZAQLarning turlari keltirilgan, binobarin, sirtki ZAQLar zaryadlar paketlarni uzatish sirtki kanalili ZAQLar, hajmiy ZAQLar hajmiy uzatish kanalli ZAQLar hisoblanadi.

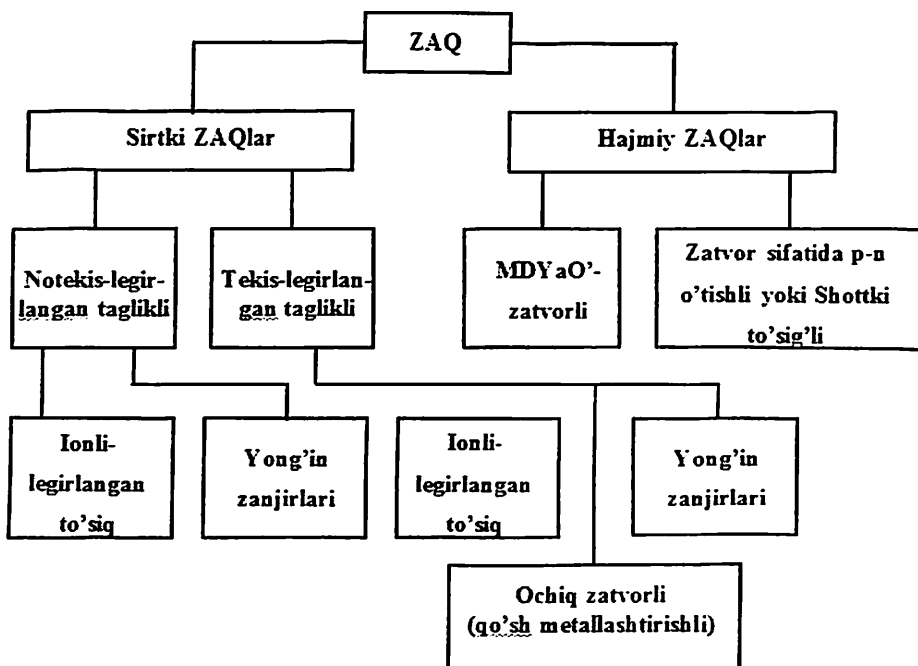
ZAQlar elektr maydonlarining o‘zaro ta’sirlashishi tufayli bir-birlariga ta’sir qiladigan tarzda umumiy yarimo‘tkazgichli taglikda bajarilgan oddiy MDYAO‘-tuzilmalar to‘plami hisoblanadi.

ZAQlarning ishlash prinsipi elektrodلarga tashqi boshqarish kuchlanishi qo‘yilganda yarimo‘tkazgich yuzasida hosil bo‘ladigan chuqurlarda zaryadlar paketلarning paydo bo‘lishi, saqlanishi va uzatilishiga asoslangan.

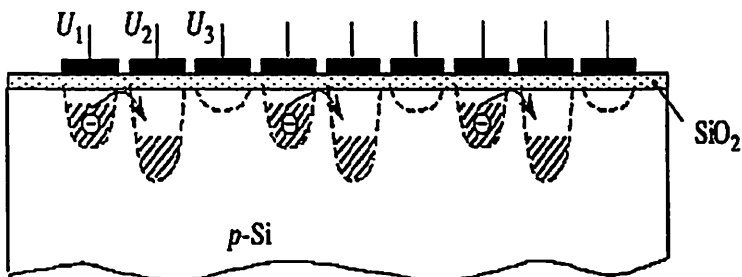
ZAQlarning eng oddiy tuzilmasi 2.33-rasmda tasvirlangan bo‘lib, unda chiziqli ajratilgan bo‘laklar elektronlar to‘plami, ya’ni manfiy hajmiy zaryad bilan to‘ldirilgan potensial chuqurlar hisoblanadi.

ZAQlarda sodir bo‘ladigan jarayonlar sxematik tarzda quyidagicha ifodalanishi mumkin:

1. $U_1 > 0$ qo‘yilganda asosiy zaryad tashuvchilar sirdan taglikka chuqur suriladi va birinchi elektrod ostida siyrak qatlam hosil bo‘ladi, bu noasosiy zaryad tashuvchilar uchun potensial chuqurni hosil bo‘lishiga teng.



2.32-rasm.ZAQlarning turlari



2.33-rasm.ZAQLarning eng oddiy tuzilmasi

2. Potensial chuqurni elektronlar bilan to'lishi jarayoni boshlanadi:

- siyrak qatlamda tashuvchilarning termogeneratsiyalanishi jarayoni hisobiga (1 - 100 s tartibdagi uzoq jarayon);

- $p-n$ o'tish yordamida zaryadlarni injeksiyalanishi bilan;

- yorug'lik bilan.

Shunday qilib, birinchi elektrod ostida zaryadlar to'plami olindi.

3. $U_2 > U_1$ qo'yilganda ikkinchi elektrod ostida chuqurroq potensial chuqurcha hosil bo'ladi va ikkinchi elektrodning tortuvchi elektr maydoni ta'sirida zaryadlarni bu chuqurchaga oqishi bo'lib o'tadi.

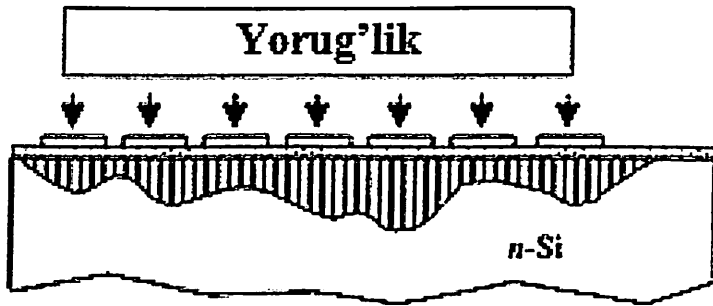
Uchinchi elektrod ostida zaryadlar to'plamini saqlash uchun $U_3 > U_1 \sim U_2$ nisbat bajarilishi kerak.

Ma'lumotlar shu tarzda saqlanadi va uzatiladi.

ZAQLarga ma'lumotlarni kiritish asosiy usullari optik kiritish va $p-n$ o'tish yordamida zaryadlarni injeksiyalanishi hisoblanadi.

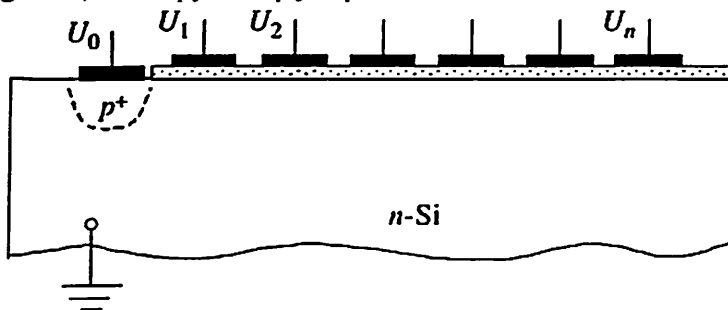
Ma'lumotlarni optik kiritish (2.34-rasm) "yorug'lik - elektr signal" o'zgartirgichlarida amalga oshiriladi. Bu o'zgartirgichlar videokameralarda va raqamli kameralarda ishlatiladi. Bu qurilmalardagi elektrodlar polikristalli kremniy, molibden (Mo), qalay dioksididan (SnO_2) tayyorlanadi. Bunday elektrodlar yorug'likka shaffof hisoblanadi.

Yorug'lik oqimi yarimo'tkazgichda elektron-kovak juftlarini generatsiyalaydi, potensial chuqurchada esa ular ajraladi. Elektrodlarda $U_1 = U_2 - U_n < 0$ manfiy potensial o'rnatilgan, shuning uchun elektronlar chiqib ketadi, kovaklar esa elektrodlarning manfiy potentsiali ostida qoladi. To'plangan musbat fazoviy zaryad yutiladigan kvantlar soniga proporsional, ya'ni yorug'lik intensivligiga va ekspozitsiyaning davomiyligiga proporsional (fotografiyada bo'lganidek).



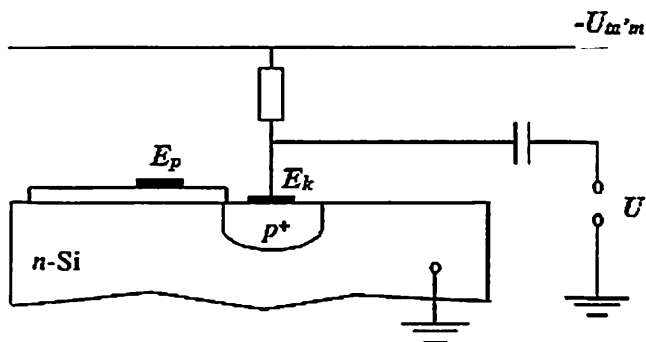
2.34-rasm. ZAQlarga ma'lumotlarni optik kiritish usuli

$p-n$ -o'tish yordamida zaryadlarni injeksiyanishi orqali ma'lumotlarni kiritish usuli 2.35-rasmda tasvirlangan. Agar $U_0 > 0$ bo'lsa, $p-n$ -o'tish ochiq bo'ladi, tok oqib o'tadi va kovaklar qo'shni elektrod ostiga p -sohadan injeksiyanadi. Shunday qilib, elektrod ostida zaryadlar to'plami yig'iladi, mantiqiy "1" qayd qilinadi.



2.35-rasm. $p-n$ o'tish yordamida zaryadlarni injeksiyanishi bilan ma'lumotlarni kiritish usuli

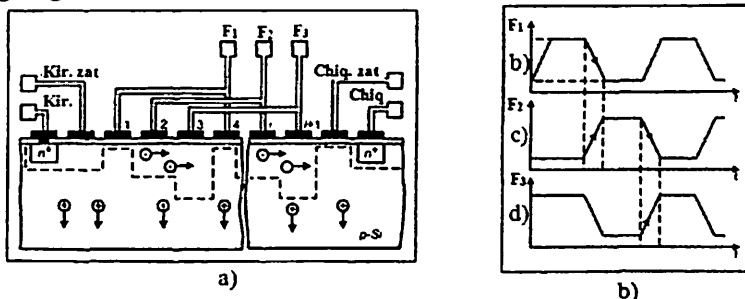
ZAQlardagi ma'lumotlarni o'qish $p-n$ -o'tish yordamida zaryadlarni ekstraksiyalash orqali amalga oshiriladi. Agar $U_k < 0$ bo'lsa, $p-n$ -o'tish yopiladi. E_p elektrod ostida zaryadlar to'plamining paydo bo'lishi E_k elektrodning ostidagi kovaklarning tortilishiga olib keladi (bu holda diffuziya emas, tortish maydonining ta'sirida zaryad tashuvchilarning siljishi bo'lib o'tadi). E_k orqali tok impulsi oqib o'tadi, "1" ni o'qish bo'lib o'tadi (2.36-rasm).



2.36-rasm. ZAQLardan ma'lumotlarni o'qish

Agar $U_0 = 0$ bo'lsa, injeksiyananish yo'q, zaryadlar to'plami yo'q va mantiqiy nol "0" yoziladi.

Zaryadli-bog'langan MOYAO' kondensatorlarning zatvorlaridagi kuchlanishni boshqarish orqali zaryadlarni uzatish jarayonini boshqarish mumkin. Bosqichlar sonida farq qiladigan ZAQ-registrlarning bir nechta turlari mavjud. 2.37-rasmda uch bosqichli ZAQda zaryadlar paketlarini to'plash va uzatish sxemasi tasvirlangan. 1B, 2B bosqichlarda impuls ketma-ketligi davriy xarakterga va trapetsiyasimon shaklga ega bo'ladi. Ularning vaqt diagrammalari 2.37, c, d, e-rasmda keltirilgan. Impuls vaqti bo'yicha keyingi impuls oldingi bosqich impulsining tushishi boshlanishidan oldin ortmasligi uchun birmuncha vaqt bo'yicha qoplanish bilan keladi. Ta'kidlaymizki, impuls sirdagi asosiy tashuvchilarning doimiy siyraklashishini ta'minlaydigan ma'lum bir U_{sm} (1-3 V) doimiy siljishga ega.



2.37-rasm. Uch bosqichli ZAQda zaryadlar paketlarini yig'ish va uzatish (a) va 1B (b), 2B (c), 3B (d) bosqichlardagi boshqarish impulsining diagrammalari

Bunday siljitish kuchlanishning bo'lmashligi elektronlarning kovaklari bilan rekombinatsiyalanishi tufayli zaryadlar paketining qiymatini yo'qotilishiga olib kelar edi. ZAQ-tuzilmaning bosqichlaridagi kuchlanish 10 dan 20 V gacha chegaralarda o'zgaradi.

Tuzilmaning simmetrik yoki assimetrik topologiyalarini shakllantirish bilan bir, ikki, to'rt taktli siljitish registrlarini ham yaratish mumkin. Ko'rib chiqilgan uch taktli ZAQ-registr birinchi turga kiradi, unda zaryadlar paketini uzatish yo'nalishi induksiyanadigan potensial to'siqlar orqali ta'minlanadi. Bu to'siqlar zaryadlar paketining uzatilishiga qarama-qarshi tomondan elektr maydonlar orqali shakllantiriladi.

Zaryadlar paketlarini uzatishning yo'naltirilganligi texnologik o'rnatilgan zaryadlar to'siqlari yordamida ta'minlanishi mumkin. Bunday konstruksiyalar siljitish registrlarining ikkinchi turiga kiradi. Zaryad paketlarining yo'nalishini va boshqariladigan uzatilishini ta'minlaydigan potensialni assimetrik taqsimlanishini aralashmalarni elektrodlar ostida bir jinsli bo'lmagan taqsimlanishi, shuningdek, dielektrik qatlamining qalinligini o'zgartirish orqali olish mumkin. Zaryadli aloqali qurilmalar raqamli va analog ma'lumotlarni saqlash va ishlov berish turli tizimlarida qo'llaniladi. ZAQLar raqamli va analog ma'lumotlarga ishlov berishga, ya'ni analog va raqamli qo'shish, signallarni bo'lish va kuchaytirish, zarur vazn koeffitsientlari bilan buzmaydigan o'qish, zaryadlar paketlarini ko'p karrali kiritish va chiqarishni amalga oshirishga imkon beradi.

Raqamli, analog va fotosezgir ZAQLarga ajratiladi.

Analog ZAQLarga kechiktirish liniyalari (KL), filtrlar, analog protessorlar kiradi. Fotosezgir ZAQLar (FZAQLar) juda istiqbolli protessorlar hisoblanadi. FZAQ optik tasvirni elektr signaliga o'zgartirish uchun mo'ljallangan funksional elektronika jihozi bo'lib, uning ishlashi yorug'lik ta'sirida yarimo'tkazgich sirtida yoki ichida zaryadlar paketlarini shakllantirish va uzatishga asoslangan. Chiziqli va matritsali FZAQLarga ajratiladi.

Chiziqli FZAQLarda fotosezgir elementlar bitta qatorda joylashgan. Bir integrallash davrida chiziqli FZAQ tasvirni qabul qiladi va optik tasvirning bitta satrini elektr (raqamli) signalga o'zgartiradi. Matritsali FZAQLar zaryadlar uzatiladigan fotosezgir qurilmalar bo'lib, ularda fotosezgir elementlar matritsada qatorlar va ustunlar bo'yicha joylashtirilgan.

Raqamli ZAQLar signallarni diskret funksiyalar ko'rinishida ishlov berish uchun mo'ljallangan bo'lib, ularni ma'lumotlarga arifmetik-manti-

qiy ishlov berish uchun tuzilmalarga va ma'lumotlarni saqlash - xotira qurilmalari uchun tuzilmalarga bo'lish mumkin. Raqamli ZAQLarga siljitish registrarlari, mantiqiy va arifmetik qurilmalar, xotira qurilmalarini kiritish mumkin. Ularda ma'lumotlar zatvor ostidagi potensial chuqurchada lokallashtirilgan yoki potensial ikki sathli zaryadlar bilan ifodalanadi. Mantiqiy bir holati chuqurchadagi maksimal zaryadlar paketi, mantiqiy noli holati zaryadlar paketining yo'qligi yoki fon zaryadining qiymati orqali aniqlanadi. ZAQLar raqamli qurilmalari dinamik turdagi qurilmalar hisoblanadi, chunki ma'lumotlarni regeneratsiyalash zarur bo'ladi.

2.5. Integral sxemalarning passiv elementlari

2.5.1. Integral rezistorlar

Yarimo'tkazgichli mikrosxemalarda eng keng tarqalgan passiv elementlar rezistorlar hisoblanadi. Yarimo'tkazgichli qatlamlarning past solishtirma qarshiligi tufayli ular kristallda katta yuzani egallaydi. Shuning uchun, mikrosxemalar rezistorlar soni minimal bo'ladigan, ularning qarshiligi kichik (odatda 10 kOmdan kichik) bo'ladigan tarzda loyihalanadi. Analog mikrosxemalar odatda raqamli mikrosxemalarga qaraganda kattaroq qarshilikka ega. Ko'plab raqamli mikrosxemalarda (masalan, maydon tranzistorlarda) rezistorlar yo'q, ularning o'rniga tranzistorlar ishlatiladi.

Integral rezistor berilgan elektr qarshiligi va topologiyasiga ega bo'lgan integral sxemalarning elementi bo'lib, u elektr zanjirlarda zanjirning alohida oraliqlari orasida tok va kuchlanishlarni talab qilinadigan taqsimlanishini ta'minlash uchun ishlatiladi.

Yarimo'tkazgichli IMSlarda rezistorlar rolini tranzistorlar tuzilmasi sohalaridan birining legirlangan yarimo'tkazgichi oraliqlari bajaradi. Rezistorlar integral tranzistorlar va diodlar bilan birgalikda bitta texnologik jarayonda ishlab chiqariladi.

Yarimo'tkazgichli IMSlarning rezistorlari tranzistorlar tuzilmasining diffuzion qatlamlari asosida (diffuzion rezistorlar) va ionli legirlash (ionli legirlangan rezistorlar) yordamida tayyorlanadi.

Bipolyar tuzilmalardagi integral rezistorlar diffuzion rezistorlar, pinch-rezistorlar, ionli legirlangan rezistorlar, polikristalli kremniy asosidagi yupqa qatlamli rezistorlarga bo'linadi (2.38-rasm).

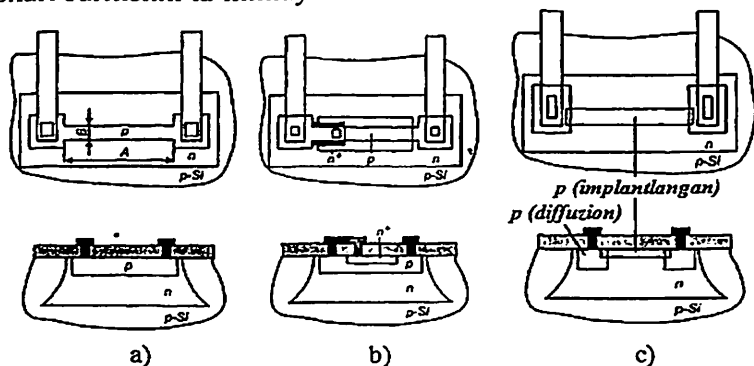
Rezistorning nominal qiymati topologik parametrlar, shakl koeffitsienti yoki rezistor korpusining uzunliginig kengligiga nisbati, shuningdek, texnologik parametrlar - rezistorning materiali va qalinligini tanlash orqali olish mumkin.

Diffuzion rezistorlar tranzistorlar tuzilmasining epitaksial qatlamida ishlab chiqariladi. Talab qilinadigan nominal va ishlab chiqarish aniqligiga bog'liq ravishda diffuzion rezistorlar emitter, baza yoki kollektor sohaslarida ishlab chiqarilishi mumkin.

Ko'pincha diffuzion rezistor tranzistorlar bipolyar tuzilmasining baza sohasida shakllantiriladi. Bu qatlamni tanlash emitter sohasida tayyorlashda kerak bo'ladigan katta geometrik o'lchamlar va agar rezistor yengil legirlangan kollektor sohasida bajarilsa, rezistorning qarshiligi yuqori harorat bo'yicha koeffitsienti orasidagi kelishtirish (2.38,a-rasm) hisoblanadi.

Bipolyar tranzistorlardagi yarimo'tkazgichli mikrosxemalarda texnologiyani soddalashtirish uchun rezistorlar sifatida $K_{SI} = 100 - 300 \text{ Om/m}$ qarshilikli *p*-turdagi baza qatlamlari keng qo'llaniladi.

Agar zarur nominallar 60 kOmdan ohsa, pinch-rezistorkonstruksiyasi yoki kanal rezistorlaridan foydalaniladi (2.38,b-rasm). Katta solishtirma qarshilikka kuchsiz legirlangan *p*-sohaning pastki qismidan foydalanish hisobiga erishiladi. Bu turdagi rezistorlar tuzilmasida *n*- va *p*-qatlamlar metallashtirish bilan shuntlangan va tuzilmaning boshqa sohaslariga qaraganda katta musbat potensial ostida bo'lgan rezistorning chiqishiga ulangan. Bunday ulanish pinch-rezistorning barcha o'tishlarida teskari surilishni ta'minlaydi.



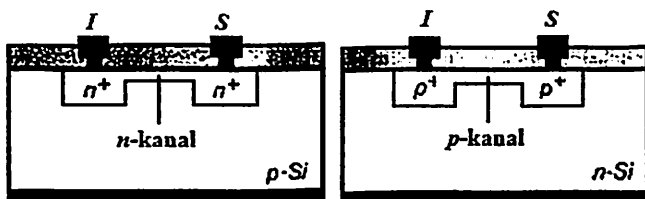
2.38-rasm. Bipolyar tranzistorlar tuzilmalari asosidagi integral rezistorlar: a - diffuzion rezistor; b - pinch-rezistor; c - ionli legirlangan rezistor

Pinch-rezistorning maksimal qarshiligi oddiy tasmali konfiguratsiyasida 200-300 kOmga yetishi mumkin. Pinch-rezistorlarning kamchiliklari ishlab chiqariladigan konstruksiyalar parametrlarining katta og'ishlari, shuningdek, qarshilikning katta harorat bo'yicha koeffitsienti hisoblanadi. Pinch-rezistorning tuzilmasi maydoniy tranzistorning tuzilmasiga o'xshaydi va aynan shu fakt katta qarshilik qiymatlarini olish imkonini beradi. Emitterning kuchli legirlangan past qarshilikli sohasi 0,01 - 0,02% gacha bo'lgan harorat bo'yicha koeffitsientga ega bo'lgan bir necha omli qarshiliklarni olish imkonini beradi.

Yuqori solishtirma qarshiliklar ionli legirlangan rezistorlar konstruksiyasi bilan ta'minlanishi mumkin (2.38s-rasm). Ularning tuzilmasi diffuzion rezistorning tuzilmasiga o'xshaydi. Bazaning shakllanishi bilan bog'liq bo'lmagan ionli legirlash operatsiyasi yordamida qarshilik 20 kOm/mgacha bo'lgan juda nozik (0,1 - 0,2 mkm) rezistiv qatlamni hosil qilish mumkin. Qatlamning qarshiligi legirlash dozasi bilan aniqlanadi. Omik kontaktlarni olish uchun uning uchlarida qalinroq p -turdagi diffuzion sohalar shakllantiriladi. Ionli legirlangan rezistorlar qarshiligi-ning texnologik og'ishlari taxminan 6%, $TKS = 0,1\% / K$.

MDYAO'-tranzistorlar tuzilmalari integral rezistorlari istok va stok o'rtasida o'rnatilgan kanallar hisoblanadi (2.39-rasm). Rezistorning nominallari ham rezistiv tuzilmalar topologiyasi, ham uni ishlab chiqarish texnologiyasi orqali aniqlanadi. Odatda, kanal ionli implantatsiyalash usuli bilan qurilgan, o'z xossalari bo'yicha yuqorida ko'rib chiqilgan ionli legirlangan rezistorga o'xshaydi.

Gibrid mikrosxemalarda qarshiliklari bir necha omdan bir necha megomgacha bo'lgan yupqa qatlamli rezistorlar keng qo'llaniladi. Agar taglikda rezistorlarning yuqori zichligi zarur bo'lsa, yupqa qatlamli texnologiya qo'llaniladi, agar mikrosxemalarning past narxi talab qilinsa, elementlarning zichligi unchalik ahamiyatga ega bo'lmasa, qalin yupqa qatlamli texnologiya qo'llaniladi.

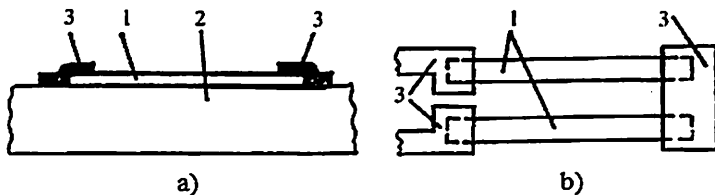


2.39-rasm. Istok - kanal - stokga asosidagi integral MDYAO' rezistorining tuzilmasi

Gibrid mikrosxema rezistorining tuzilmasi 2.40-rasmda tasvirlangan.

Talab qilinadigan qarshilikka bog'liq ravishda yupqa qatlamli rezistor quyidagi turli konfiguratsiyalarga ega bo'lishi mumkin:

- tasmali;
- metall tutashtirgichli parallel polsali;
- meandrli.



2.40-rasm. Yupqa qatlamli rezistorning tuzilmasi (a) va topologiyasi (b):
1 - rezistiv qatlam, 2 - taglik, 3 - metall kontaktlar

Qalinligi 0,1 mkmdan kichik bo'lgan yupqa plyonkali rezistiv qatlamlar vakuumli bug'lanish yo'li bilan olinadi va 300 Om/m gacha R_{si} qarshilikni ta'minlaydi, TKS = - 0,01%/K bo'ladi.

TKS < 0,02%/K bo'lganda kvadratga bir necha kiloomgacha bo'lgan qatlamli qarshiligiga katodli changlantirish yo'li bilan olingan tantal yupqa qatlamlari ega bo'ladi.

Katta R_{si} qarshilikka (10 kOm/mgacha) yupqa rezistiv qotishmalarining yupqa qatlamlari, masalan, turli foizlar nisbatlaridagi kremniy va xrom ega.

Yanada katta R qarshilikka (50 kOm/mgacha) kermetlar - dielektrik materialning metall bilan aralashmalari (masalan, SiO va Cg) yupqa qatlamlari ega, ulardagi TKS 0,2%/°S atrofida bo'ladi.

Yupqa plyonkali rezistorlar nafaqat gibrid mikrosxemalarda, balki ba'zi yarimo'tkazgichli mikrosxemalarda, xususan, yarimo'tkazgichli bipolyar integral mikrosxemalarda, asosan, O'YUCH dipazon mikrosxemalarida, shuningdek, galliy arseniddagi sxemalarda qo'llaniladi. Rezistiv qatlam to'g'ridan-to'g'ri legirlanmagan taglik yuzasiga surtiladi.

Kremniyli raqamli KISlarda qarshiligi legirlash aralashmalarining konsentratsiyasiga bog'liq ravishda 10 MOm/mgacha keng chegaralarda o'zgaradigan qalinligi 0,2 - 0,3 mkm bo'lgan polikristalli kremniy rezistiv qatlamlari ham ishlatiladi. Bunday rezistorlar kristallning yuzasini kamaytirish uchun tranzistorlar ustiga joylashtiriladi. Bunday rezistor-

larning qarshiligi yuqori $TKS = - 1\%/K$ bilan haroratning oshishi bilan kamayadi.

Texnologik og'ishlar ham juda katta (20-30%), lekin bu qator sxemalar uchun ruxsat etiladi. Kichik uzunlikdagi (bir necha mikrometrlar) polikremniyli rezistor alohida polikremniy donalari orasidagi (0,1 mkmga yaqin) elektronlarning o'tishiga to'sqinlik qiladigan potensial to'siqlar (balandligi taxminan 0,1 mkm) mavjudligiga bog'liq bo'lgan noxiziqli VAXga ega. Qalin yupqa qatlamli rezistorlarni olish uchun funksional bosqich sifatida Pd va Ag_2O zarralariga ega bo'lgan pastalar ishlatiladi. Qalinligi 15-20 mkm bo'lgan qatlamning qarshiligi 50 Om/mdan 1 MOm/mgacha chegaralarda yotadi, unda $TKS = 0,1\%K$ ga teng bo'ladi. Texnologik og'ishlarni 1 - 10% gacha kamaytirish uchun rezistorlarni individual sozlash ishlatiladi.

2.5.2. Integral kondensatorlar va induktivliklar

Integral kondensatorlar dielektrik bilan ajratilgan o'tkazuvchi elektrodlardan (plastinalardan) tashkil topgan va zanjirning alohida elementlari orasidagi tok va kuchlanishning talab qilinadigan taqsimlanishini ta'minlash uchun elektr zanjirlarda ishlatishga mo'ljallangan integral sxemalarning elementlari hisoblanadi. Yarimo'tkazgichli mikro-sxemalarning asosiy qismi katta yuzaga ega bo'lgani uchun kondensatorlarni o'z ichiga olmaydi. Masalan, atigi 50 pF sig'imli yarimo'tkazgichli yoki yupqa qatlamli kondensator taxminan 10 bipolyar yoki 100 ta MDYAO'- tranzistorlari bilan bir xil maydonni egallaydi. Shuning uchun, agar sig'im 50 - 100 pFdan yuqori talab qilinsa, tashqi diskret kondensatorlar ishlatiladi, ularning ulanishi uchun mikrosxemalarda maxsus chiqishlar ko'zda tutiladi.

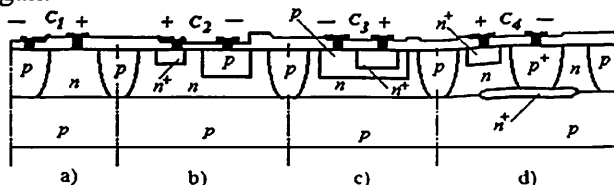
Kichik sig'imli kondensatorlar sifatida boshqa elementlar ishlatiladi. Yarimo'tkazgichli integral mikrosxemalarda kondensatorlar rolini yagona texnologik jarayonda tranzistorlar tuzilmasi asosida bajarilgan teskari surilgan *p-n*- o'tishlar o'ynaydi.

Bipolyar tranzistorlar tuzilmalarida integral kondensator konstruksiyasida "kollektor – taglik", "baza – kollektor", "emitter–baza" o'tishlardan biri ishlatiladi. Bu o'tishlar diffuziya orqali shakllantiriladi va shuning uchun ular ko'pincha diffuzion kondensatorlar deyiladi. DK tuzilmalarining bir nechta variantlari 2.41-rasmda tasvirlangan.

Kondensatorning sig‘imi diffuziya va to‘siq tashkil etuvchilariga ega bo‘lgan o‘tish sig‘imi orqali aniqlanadi. Asosiy rolni to‘siq sig‘imi o‘ynaydi.

“Kollektor-taglik” o‘tish asosida shakllantirilgan kondensatorlar (2.41,a-rasm) cheklangan qo‘llanishga ega, chunki taglik odatda tokning o‘zgaruvchan tashkil etuvchisi bo‘yicha yerga ulanadi. Biroq, bu turdagi kondensator p - n -o‘tish bo‘yicha izolyasiyalangan integral mikrosxemalarning ajralmas qismi hisoblanadi. “Baza-kollektor” o‘tish asosida shakllantirilgan kondensatorlar (2.41,b-rasm) yuqori teshilish kuchlanishiga (taxminan 50 V) ega. Odatda “baza-kollektor” o‘tishning past teskari siljirilishida, lekin bir vaqtda “kollektor-taglik” o‘tishning yuqori teskari siljirilishida ishlatiladi.

Eng katta C_0 solishtirma to‘siq sig‘imiga “emitter-baza” o‘tish ega (2.41,s-rasm). Bu o‘tishning past teshilish kuchlanishi uning keng qo‘llanishi imkoniyatlarini cheklaydi. Ba’zida integral sxemalarda kobinatsiyalangan kondensatordan foydalaniladi. 2.41,d-rasmda parallel ulangan emitter va kollektor o‘tishlari sig‘imlari asosidagi kondensatorning tuzilmasi tasvirlangan.



2.41-rasm. Integral diffuzion kondensatorlarning tuzilmalari:
a - kollektor-taglik (C_1); b – baza-kollektor (C_2); c – emitter-baza (C_3); d - izolyasion diffuziya p -sohasidan yashirin p^+ -qatlama o‘tish (C_4)

Bipolyar tranzistorali tuzilmasi asosida shakllantirilgan integral kondensatorlar qator kamchiliklarga ega. Dastlabki taglikning 10 Om/m, bazaning 200 Om/m va emitter qatlamining 2 Om/m solishtirma qarshiliklarida, shuningdek, emitter-baza n - p -o‘tishining 2,3 mkm chuqurligida, baza-kollektor n - p -o‘tishining 2,7 mkm chuqurligida va kollektor-taglik o‘tishining 12,5 mkm chuqurligida n - p -o‘tishlarning solishtirma sig‘imlari taxminan quyidagi qiymatlarga ega:

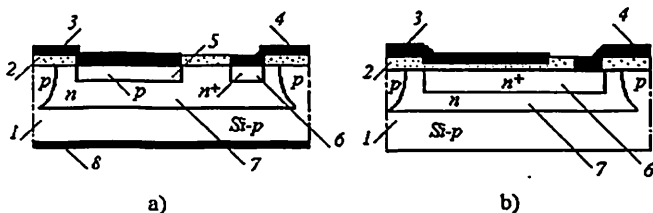
- kollektor-taglik 100 pF/mm², yon devori sig‘imi 250 pF/mm², o‘tishning teshilish kuchlanishi 100 Vgacha; 30 ... 70 V teshilish kuchlanishili baza-kollektor n - p -o‘tishining solishtirma sig‘imi 350 pF/mm²;

-emitter-baza $p-n-o$ -tishining solishtirma sig'imi 600 pF/mm^2 , yon devori sig'imi 1000 pF/mm^2 , teshilish kuchlanishi 7 V .

Avvalo, bunday tuzilmalar asosida katta sig'imli kondensatorni yaratish mumkin emas. Buning uchun taglikning katta sohasini ishlatish kerak. Bu konstruksiyadagi kondensatorlar past asllikka ega. Asllik ham $n-p-o$ -tishga teskari qarshiligining ta'siri tufayli past chastotalarda, ham plastinalarning qarshiligi MDYAO' kondensator tuzilmasidagiga qaraganda katta bo'ladigan yuqori chastotalarda past bo'ladi. Bunday kondensatorlar faqat $n-p-o$ -tishdagi teskari kuchlanishga mos keladigan qo'yilgan kuchlanishning bitta qutbida ishlay oladi va ularning sig'imi qo'yilgan kuchlanishga sezilarli bog'liq bo'ladi.

Diffuzion kondensatorlarining kamchiliklari, agar MDYAO' kondensatorining konstruksiyasidan foydalanilsa, sxemada bartaraf etilishi mumkin (2.42-rasm).

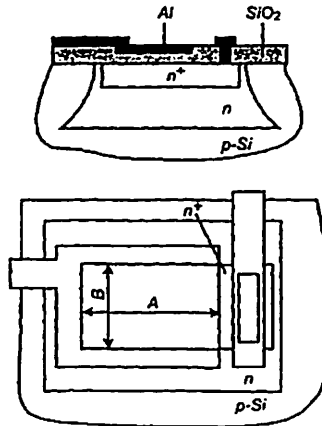
MDYAO'-kondensator plastinalaridan biri qalinligi $0,3 - 1 \text{ mkm}$ bo'lgan emitter n^+ -qatlami, ikkinchisi metall qatlam, dielektrik esa kremniy dioksidli qatlami hisoblanadi.



2.42-rasm. MDYAO' ISlarda integral kondensatorlarning tuzilmalari: a - stok-istoksohalaridan foydalaniladigan diffuzion; b - stok (istok) sohasidan foydalaniladigan; 1 - taglik; 2 - dielektrik; 3 - yuqori plastinadan chiqish; 4 - pastki plastinadan chiqish; 5 - r -turdagi soha; 6 - n^+ - turdagi soha; 7 - kollektor sohasi (epitaksial qatlam); 8 - taglik bilan kontakt

Kondensatorning pastki qoplamasi bo'lib xizmat qiladigan emitter n^+ -qatlami ustida yupqa kremniy SiO_2 qatlami o'stiriladi, u kondensatorning pastki qoplamasi bo'lib xizmat qiladi, keyin esa ustki metall qoplama yuritiladi. Bunday kondensator texnologik jarayonni sezilarsiz murakkablashishida yarimo'tkazgichli mikrosxemalarda qo'llaniladi (dielektrik qatlamni yaratish uchun qo'shimcha litografiya va oksidlanish operatsiyalari talab qilinadi). n^+ qatlam bipolyar tranzistorlar emitterlari

yoki n -kanalli MDYAO⁺ tranzistorlarining istoklari va stoklarini legirlash kabi legirlash operatsiyasi yordamida shakllantiriladi. Kondensatorning topologik konfiguratsiyasi kvadrat yoki to'rtburchaklar shaklida bo'ladi (2.43-rasm).



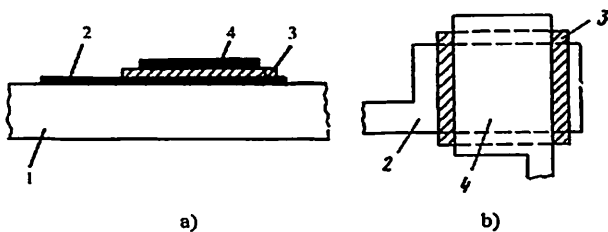
2.43-rasm. Integral MOYAO⁺-kondensatorning tuzilmasi va topologiyasi

MDYAO⁺ tuzilmalari asosidagi 10 pF tartibdagi sig'imli kondensatorlar signallarni chastotaviy tanlovchanlikka ega bo'lgan ayrim analog mikrosxemalarda (masalan, aktiv filtrlarda) ishlatiladi. MOYAO⁺-kondensatorlarining muhim afzalligi plastinalardagi istalgan qutbli kuchlanishlarda ishlash imkoniyati hisoblanadi.

Yana bir muhim o'ziga xos xususiyat sig'im nominal qiymatining qo'yiladigan kuchlanishga bog'liq emasligi hisoblanadi. MDYAO⁺-kondensatorlarining aslligi bipolyar tranzistorlar tuzilmalarida bajarilgan integral kondensatorlarning aslligidan sezilarli katta bo'ladi.

Gibrid mikrosxema yupqa qatlamli kondensatorning tuzilmasi va uning yuqoridan ko'rinishi 2.44-rasmda keltirilgan. Eng ilg'or dielektrik material kremniy oksidi hisoblanadi. Bor va alyumosilikat shisha yaqin parametrlarni beradi. Kremniy dioksid yuqori elektr puxtalikka ega va katta solishtirma quvvatni beradi ($4 \sim 10^{-4}$ pF/mkm²).

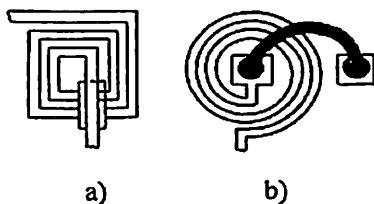
Biroq, uni yuritish uchun yanada murakkab reaktiv purkash usuli talab qilinadi. Ko'rsatilgan dielektrikli kondensatorlarning plastinalari sifatida alyuminiy yupqa qatlamlar ishlatiladi. Tantalli kondensatorlari katta solishtirma sig'imga ega (10^{-3} pF/mkm²gacha), ularda pastki plastina Ta dan bajariladi, dielektrik anodli oksidlanish natijasida olinadigan Ta₂O₅ qatlami, yuqori plastina esa Al qatlam hisoblanadi.



2.44-rasm. Yupqa qatlamli kondensatorning tuzilmasi (a) va yuqoridan ko‘rinishi (b): 1 - taglik, 2 va 4 - metall plastinalar, 3 - dielektrik qatlam

Kremniyli yarimo‘tkazgichli mikroshemalarda yupqa qatlamli kondensatorlar SiO_2 qatlami bilan qoplangan plastinalar yuzasida, gally arsenidli mikroshemalarda esa to‘g‘ridan-to‘g‘ri legirlanmagan taglik yuzasida shakllantiriladi. Dielektrik sifatida gaz bosqichidan kimyoviy bug‘lanish natijasida yuritiladigan SiO_2 yoki Si_3N_4 qatlamlari qo‘llanadi.

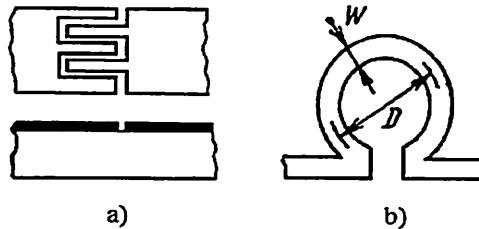
Yupqa qatlamli induktiv elementlar yassi to‘rtburchakli (2.45,a, -rasm) yoki yumaloq spirallar (2.45,b -rasm) hisoblanadi, o‘tkazgichlar kabi yupqa qatlamlar asosida shakllantiriladi. Yupqa qatlamli g‘altakning ichki uchidan chiqishni amalga oshirishda ba‘zi qiyinchiliklar paydo bo‘ladi. G‘altakning mos joyiga dielektrik yupqa yuritish, so‘ngra bu yupqa qatlam ustidan metall yupqa qatlam chiqishni yuritishga to‘g‘ri keladi.



2.45-rasm. IMSlar induktiv elementlarining tuzilmalari

Analog yuqori chastotali mikroshemalarda sig‘imi 100 pFdan kichik bo‘lgan va induktivligi 1 mkgandan kichik bo‘lgan yupqa qatlamli reaktiv elementlar ishlatiladi. O‘YUCH santimetrli diapazonida yuqori aniqlikda takrorlanishi kerak bo‘ladigan kichik o‘lchamdagi elementlar (to‘lqin uzunligidan ancha past) talab qilinadi. Buning ingichka yupqa qatlamli texnologiya talab qilinadi. Bundan tashqari, u qalin plyonkali texnologiyaga qaraganda o‘tkazuvchi qatlamlarining kichikroq qarshiligini va elementlarning yuqoriroq aslligini ta‘minlaydi.

O'YUCH gibril mikrosxemalarida talab qilinadigan pikofaradning o'ndan bir qismigacha sig'imli kondensatorlar taroqsimon tuzilma shaklida tayyorlanadi (2.46,a-rasm). Taroqning o'lchami to'lqin uzunligidan kichik bo'lishi kerak. Bunday turdagi kondensatorlar mikrotasmali liniyaning uzilishiga ulash uchun qulay hisoblanadi. O'YUCH-mikrosxemalarda talab qilinadigan 0,1 - 1 nGn induktivlik elementlari halqali tuzilmaga ega (2.46,b-rasm).



2.46-rasm. O'YUCH IMSlari yupqa qatlamli kondensatorining (a) va induktiv elementining tuzilmasi (b)

Pastroq chastotalarda induktiv elementlar ishlatilmaydi. Ayrim hollarda induktivlik samarasi sxemaviy usulda (teskari aloqa *RS*-zanjirlariga ega bo'lgan operatsion kuchaytirgichlar, aktiv filtrlar va boshqalar) olinadi. Induktivlik zarur bo'ladigan boshqa qo'llanishlar uchun mikrosxema korpusidan tashqaridagi g'altaklar ishlatiladi.

2.5.3. Kommutatsion bog'lanishlar

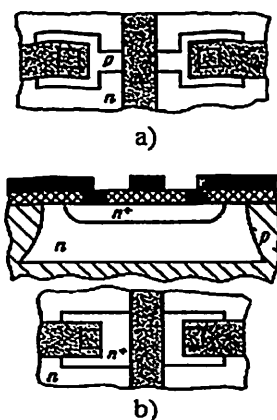
Mikroelektron qurilmalarning passiv elementlariga IMSlarning alohida elementlarini ulaydigan kommutatsion zanjirlarning o'tkazgichlari kiradi.

Odatda yarimo'tkazgichli mikrosxemalarda elementlararo ulanishlar sifatida alyuminiy yupqa qatlamli o'tkazgichlar ishlatiladi. O'tkazgichlarning kesishishlarini oldini olish uchun quyidagi uchta asosiy usullardan foydalaniladi:

- ko'p qatlamli metallashtirish;
- SiO₂ qatlami bilan himoyalangan rezistorlar kanallari ustidan metallashtirish shinalarini yotqizish (2.47,a-rasm);
- SiO₂ qatlami ostida o'tkazuvchan diffuzion tutashtirishlarni o'tkazish (2.47,b-rasm). Ko'p qatlamli metallashtirishda mikrosxemadagi birinchi metall qatlam dielektrik qatlam bilan yopiladi, unga keyin ikkinchi

metall qatlam yotqiziladi. Metall qatlamlar orasidagi kontaktlashish ajratuvchi dielektrikning kovaklari orqali amalga oshiriladi. Qatlamlararo dielektrik sifatida SiO , SiO_2 va Al_2O_3 eng keng tarqalgan. Alyuminiy oksidi anodli oksidlanish orqali tayyorlanadi. Talab qilinadigan izolyaiyalashni ta'minlash va g'ovakliklarni oldini olish uchun dielektrik yupqa qatlamlarning minimal qalinligi 0,5 mkmni tashkil qiladi.

Hozirgi vaqtda uchta yoki hatto to'rtta metallashtirish qatlamlarini ishlatish mumkin bo'lsa-da, faqat ikkita metallashtirish qatlamlari keng qo'llaniladi. Ko'p qatlamli metallashtirish metallashtirilgan yo'llarning uzunligini qisqartirish va konfiguratsiyasini soddalashtirish imkonini beradi. Diffuzion tutashtirgichlar yarimo'tkazgichlarning kesishishlarini oldini olish zaruratida ikki qatlamli metallashtirishdan foydalanmaslikka imkon beradi.



2.47-rasm. Rezistorlar kanallari ustidan metallashtirish shinalarini yotqizish (a) va n^+ -tutashtirgich orqali (b)

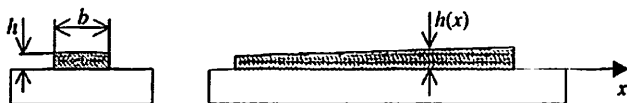
2.47,b-rasmda n -turdagi kanalli MDYAO' tranzistorlardagi sxemalarda bir qatlamli metallashtirish uchun ishlatiladigan diffuzion tutashtirgich tasvirlangan. p -kanalli MDYAO' tranzistorlardagi sxemalarda tutashtirgichlarni tayyorlash uchun n -tutashtirgich qatlamining solishtirma qarshiligiga qaraganda katta solishtirma qarshilikli p -turdagi diffuzion soha ishlatiladi.

Bipolyar tranzistorlardagi mikrosxemalarda, tutashtirish uchun alohida sohada joylashgan n^+ -qatlam ishlatiladi. Tutashtirgich egallaydigan yuza taxminan minimal geometrik o'lchamli tranzistor sohasiga teng. Tutashtirgichning geometrik o'lchamlariga bog'liq ravishda kiritiladigan qarshilik qiymati 5 - 15 Omga teng.

O'tkazgichlarning IMSlarning ishlash parametrlariga ta'siri, birinchi navbatda, signal uzatish tezligining chekli qiymatiga bog'liq, buning natijasida o'tkazgichning bir uchiga qo'yiladigan kuchlanish uning uzunligi bo'yicha barcha nuqtalarga oniy uzatilishi mumkin emas.

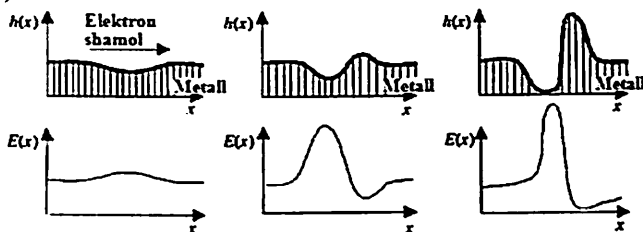
O'tkazgich bo'ylab signalning tarqalish tezligi nafaqat uning parametrlari orqali, balki o'tkazgichni o'rab turgan atrof-muhitning nisbiy dielektrik singdiruvchanligi orqali ham aniqlanadi. Agar muhit havo bo'lsa, undagi signalning tarqalish tezligi yorug'lik tezligiga teng. Birdan katta singdiruvchan dielektrik muhitning bo'lishi signallarni tarqalish tezligini dielektrik singdiruvchanlikning kvadrat ildiziga taxminan teskari proporsional kamayishiga olib keladi. Natijada, yarimo'tkazgichli va yupqa plyonkali IMSlarda signallarni tarqalish tezligi vakuumdagiga qaraganda taxminan ikki-uch baravar past bo'ladi.

Tezkor IMSlarda alohida mantiqiy elementlarning qayta ulanish vaqti bir necha nanosekundlarga etadi va elementlararo ulanishlardagi kechikishlar qurilmalarning tezkorligini sezilarli kamaytirishi mumkin. Shunday qilib, loyihalashda IMSlar elementlarini joylashtirishning maksimal zichligiga erishishga intilishadi. Metallashtirilgan yo'lakchalar parazitlar elementlar - sig'im va induktiv qarshilikni kiritadi. Qo'shni o'tkazgichlar orasida ularning o'zaro induktivligi va sig'imi orqali aniqlanadigan aloqa bo'lishi mumkin. Bu aloqa hisobiga bitta o'tkazgichda signal mavjud bo'lganda, bu signal qo'shni o'tkazgichda shovqin sifatida paydo bo'ladi. IMSlarni loyihalashda bunday aloqalarni oldini olish kerak, chunki, aks holda halaqitlar asosiy signalning sathiga etishi mumkin va qurilma ishlash qobiliyatiga ega bo'lmasligi mumkin. Katta tok zichligida (100 A/mm^2 dan ortiq) metall atomlarining elektrodlardan biri tomoniga siljishi bo'lishi mumkin (2.48-rasm). Bu ionlarning o'z-o'zidan diffuziyalanishi jarayoni hisoblanadi. Elektronlarning siljishlari bo'lganda ular ionlarni itaradi. Ionlarning yo'naltirilgan harakati sodir bo'ladi. Elektronlarning siljishi bilan ionlarning tutilishi "elektron shamol", elektronlar oqimi ta'sirida metall ionlarining yo'naltirilgan harakati esa "elektr migratsiyalanish" deyiladi.



2.48-rasm. Metall atomlarining o'tkazilishi hisobiga izolyasiyalangan taglikdagi metall shina o'lchamlarini o'zgarishi

Migratsiyalanish musbat elektrod tomonga bo'lib o'tadi. Migratsiyalanish jarayonlari shinalar qalinligi notekis bo'lganda kuchayadi. "Elektron shamol" ta'sirida shinning ingichka qismi buzilishgacha kichrayadi (2.49-rasm).



2.49-rasm. Atomlarning migratsiyalanishi natijasida metall shina profilining o'zgarishi: $h(x)$ – tok o'tkazadigan shinning qalinligi, $E(x)$ elektr maydon kuchlanganligi

Nazorat savollari

1. Elementlarni izolyasiyalash usullari qanday tasniflanadi?
2. Elementlarni izolyasiyalashning maqsadi nima?
3. p - n -o'tish bilan izolyasiyalash usulining o'ziga xos xususiyati nimada?
4. Dielektriklarning qo'llanishi bilan izolyasiyalash usulining o'ziga xos xususiyati nimada?
5. Integral maydon tranzistorlar?
6. Bipolyar tranzistor asosidagi integral diodlar?
7. Integral shottki?
8. Integral MDYAO'-tranzistorli diodlar?
9. Integral SHottki diodlari?
10. Ko'p emitterli tranzistorlar nima va ularning xususiyatlari?
11. Ko'p kollektorli tranzistorlar nima va ularning xususiyatlari?
12. Shottki to'sig'ili tranzistor nima?
13. Shottki diodli tranzistorning konstruksiyasi?
14. Diffuzion D-MDOO'-tranzistorlarning konstruksiyasi?
15. Metall-yarimo'tkazgichli boshqarish o'tishiga ega bo'lgan maydon tranzistorlarning o'ziga xos xususiyatlari nimada?
16. Metall-nitrid-oksid-yarimo'tkazgich tuzilmali MDYAO'-tranzistorlar (MNOYAO'-tranzistor) nima?
17. Suriladigan zatvorli ko'chkili-injeksion MDYAO'-tranzistorlari?
18. Suriladigan zatvorli MDYAO'-tranzistorlar nima?

19. Ikki zatvorli MDYAO' tranzistor nima?
20. Zaryadli aloqali qurilmalarning o'ziga xos xususiyati nimada va ularning qo'llanilishi?
21. ZAQLarda ma'lumotlarni kiritish va o'qish asosiy usullari qanday?
22. Bipolyar tranzistorlar tuzilmalari asosidagi integral rezistorlar nima?
23. Istok - kanal - stok asosidagi integral MDYAO' rezistorlar nima?
24. Integral diffuzion kondensatorlarning tuzilmasini tushuntiring?
25. MDYAO' IMSlarda integral kondensatorlar tuzilmasining o'ziga xos xususiyatlari?
26. Gibrid mikrosxema yupqa qatlamli kondensatorining tuzilmasi?

3 BOB. MIKROELEKTRONIKANING RIVOJLANISHIDAGI ZAMONAVIY YO‘NALISHLAR

3.1. O‘YUCH diapazoni IMSlari

3.1.1. O‘YUCH elektronikasining elementlar bazasi

O‘YUCH texnikasi kundalik hayotda, ilmiy tadqiqotlarda, aloqa tizimlarida va ma‘lumotlarga ishlov berishda, ayniqsa, maxsus qo‘llanishdagi tizimlarda keng qo‘llaniladi. O‘YUCH-qurilmalaridan keng foydalanish, birinchi navbatda, yuqori chastotali nurlanishni tor nurda to‘plash imkoniyatiga bog‘liq. Istiqbolda bu tejamkor aloqa tizimlari, nishonlarni aniqlash va kuzatish radiolokatsion stansiyalarini yaratishga imkon beradi. O‘YUCH-diapazonning katta axborot imkoniyatlari aloqa kanallari sonini zichlashtirish, televizion kanallarning ko‘p kanalli uzatishini tashkil qilish imkonini beradi. Bu sanab o‘tilgan muammolarning ko‘pchiligi mikroelektronika usullari va texnologiyalari bilan samarali yechilishi mumkin. So‘nggi paytlarda qattiq jisimli O‘YUCH elektronika-ga, xususan, O‘YUCH-diapazon monolit IMSlarga qiziqish sezilarli osh-di. Bu qiziqishni sun‘iy yo‘ldoshli uzatish va aloqa elektron qurilmalari, samolyotlar va raketalarning bort elektronikasi (ham fuqarolik, ham maxsus qo‘llanadigan), radiorel‘eli liniyalar, aloqa qurilmalari, harakatdagi ob‘ektlar va boshqalarning rivojlanishiga ehtiyojga bog‘liq. Monolitik O‘YUCH mikroelektronikani rivojlantirish uchun jiddiy rag‘batlardan biri fazalashtirilgan antennalar panjaralari (FAP) texnikasini rivojlantirishga oshgan qiziqish hisoblanadi, ularni yaratish uchun ko‘p sonli (minglab va o‘n minglab) bir xil turdagi arzon qabul qilish/uzatish modullari talab qilinadi.

Hozirgi vaqtda monolitik O‘YUCH mikrosxemalarning (M^3IS) aso-siy materiali galliy arsenid hisoblanadi. Shu bilan birga, galliy arsenid va uning asosidagi tranzistorlar texnologiyalari yetarlicha rivojlanmagan, O‘YUCH qattiq jisimli integral elektronikasi sohasidagi birinchi ishlan-malar qalin plyonkali yoki yupqa plyonkali, kremniyli bipolyar tranzistorli, ko‘pincha korpussiz bajarilgan gibrid integral sxemalar bo‘lgan.

O‘YUCH texnikasidagi qalin plyonkali texnologiya faqat raqamli texnikada o‘rnatilgan integral mikrosxemalar (KIS yoki O‘KIS) orasida platada bog‘lanishlarni ta‘minlash uchun ishlatiladi. Shu bilan bir vaqtda,

bunday bog‘lanishlarning parazit parametrlarini tezkorlikka salbiy ta‘sirini ta‘kidlamay bo‘lmaydi.

O‘YUCH texnikada qalin yupqa qatlamli texnologiya nisbatan past chastotali va tor polosalili (20%gacha) qurilmalar uchun ishlatilishi mumkin.

O‘YUCH ISlarning ko‘pchiligi keng polosali (1: 2 yoki 67% yoki undan yuqori diapazondagi chegaraviy chastotalar nisbatili), shuning uchun gibril variantda ingichka yupqa qatlamli O‘YUCH qurilmalar afzalroq hisoblanadi.

Qalin yupqa qatlamlarning qalinligi diapazonning past chastotasida teri qatlamining uch-besh qalinligi orqali aniqlanadi (teri qatlamining qalinligi sirdan hajm chuqurligiga tok zichligining 2,7 martaga kamayishi bo‘yicha aniqlanadi). Natijada, bunday yupqa qatlamlar 7,5 mkmgacha qalinlikka ega bo‘ladi.

Agar yupqa qatlamli gibril va monolit texnologiyalar taqqoslansa, monolit texnologiyalar afzalroq hisoblanadi. Biroq, monolit texnologiya ko‘p mehnat talab qiladi.

Kutilayotgan afzalliklardan biri gibril ISlarga qaraganda, monolit ISlarning nisbatan arzonligi bo‘lishi kerak. Bu omil, bir tomondan, sezilarli ishlab chiqarish ob‘ektlari, ikkinchi tomondan, gibril texnologiyasida ko‘p mehnat talab qiladigan va qimmat “individual” yig‘ish operatsiyalarining katta qismi orqali aniqlanadi.

Natijalarning takrorlanuvchanligi ham jiddiy muammo hisoblanadi. Sig‘imlarning qiymatidagi og‘ish kuchaytirish koeffitsientining qiymatiga sezilarli ta‘sir ko‘rsatadi. Gibril texnologiyada bu muammo yetarlicha sermashaqqat sozlash jarayonlari hisobiga yechilishi mumkin. Monolit texnologiyada texnologik jarayonlarni qat‘iy nazorat qilish, masalan, sig‘imlarning nominaldan og‘ishlarini 3%dan oshmaydigan qiymatga yetkazish imkonini beradi.

Natijalarning takrorlanuvchanligi muammosi juda jiddiy hisoblanadi. Bu muammoni faqat sxematik yechimlarni konstruksiya va texnologiya bilan uzviy bog‘lash orqali yechish mumkin.

Radiotexnik aloqa tizimlarini rivojlanishining birinchi bosqichlarida elektr vakuumli qurilmalar - lampalar, magnetronlar, klisotronlar va boshqalar keng qo‘llanilgan. Ular O‘YUCH diapazonni o‘zlashtirishga imkon bergan, lekin har doim ham kichik o‘lchamlilik, ishonchlilik, optimal energiya iste‘moli kabi parametrlar bo‘yicha qoniqtirmagan. Radiomuhandislarning qarashlari ko‘pincha mikroelektronikaga qaratilgan. Aynan

mikroelektron qurilmalar kam energiya iste'molida yuqori ishonchlilik, kichik o'lchamlari va bir bit ma'lumotlarga ishlov berishning past narxini olishga imkon berdi.

Ma'lumki, istalgan elektron apparaturada passiv va aktiv elementlarni o'zaro bog'lanish liniyalari ajratib turadi. An'anaviy mikroelektronikada o'zaro bog'lanish liniyalari alyuminiy chiziqlar ko'rinishida amalga oshiriladi va ularni integral sxemalarda yaratish muammolari yuqori integratsiyalanish darajasigacha vujudga kelmaydi. O'YUCH-diapazondagi o'zaro bog'lanishlar boshqa masala. Mikroelektron apparaturalarda bog'lanishlarning ierarxik darajalari ajratiladi.

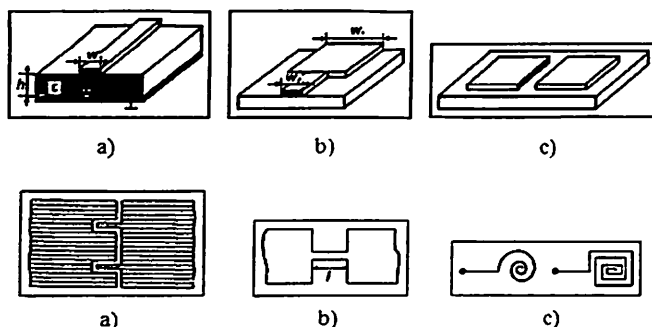
Nolinchi konstruktiv-texnologik daraja elementlararo ulanishlardan iborat. Ular ma'lum funksiyalarga ega bo'lgan sxemada passiv va aktiv elementlarni birlashtiradi.

Birinchi darajani platada korpussiz mikrosxemalar, o'sma aktiv va passiv elektr radioelementlarni bog'laydigan O'YUCH-diapazon gibrid mikrosxemalaridagi bog'lanishlar tashkil etadi.

O'zaro bog'lanishlarning **ikkinchi darajasiga** gibrid mikrosxemalar, korpussiz mikrosxemalar, diskret elektr radioelementlarni yacheykalarga yoki mikroto'plamlarga ulaydigan o'tkazgichlar kiradi. O'z navbatida, bu darajalarning o'zaro bog'lanishlari mikrotasmali tutashtirgichlar yoki tasmali-koaksial o'tishlar hisoblanadi. Yacheykalar yoki mikroto'plamlar, shuningdek, elektr radioelementlar O'YUCH bloklariga mikrotasmali tutashtirgichlar yoki yarim qattiq kabellar shaklida tayyorlangan uchinchi darajali o'zaro bog'lanishlar yordamida kommutatsiyalanadi. O'zaro bog'lanishlarning keyingi darajalarida mikroelektronika uchun qiziqish uyg'otmaydigan O'YUCH kabellar ishlatiladi.

Mikrotasmali liniyalar (MTL) fizik elektronika nuqtai nazaridan juda qiziqish uyg'otadi. MTL yuqori ϵ dielektrik singdiruvchanlikli h qalinlikdagi taglikda joylashgan to'g'ri burchakli kesimli W kenglikdagi tasmalimon turdagi o'tkazgich hisoblanadi. Taglikning teskari tomoni metallashtirilgan va yerga ulangan (3.1,a-rasm). Bunday konstruksiyadagi mikrotasmali liniya W/h nisbatga va ϵ qiymatga, shuningdek, yo'qotish koeffitsienti, dispersiya va uzatiladigan chegaraviy quvvatga bog'liq bo'lgan to'lqin qarshiligiga ega. O'YUCH-diapazon qurilmalarini loyihalashda MTLning geometrik o'lchamlarini o'zgartirish zarurati paydo bo'ladi, bu MTLning bir jinslimasligi nomini oldi.

O'YUCH-diapazonning passiv elementlariga rezistorlar, kondensatorlar va induktivliklar kiradi. O'YUCH-diapazonda tok o'tishiga elektr qarshilik samarasi havo bo'shliqlarida, dielektrik materiallarda, kristallar orasidagi oksidli yupqa qatlamlarda hosil bo'ladigan sig'implardagi mikrotasmali liniyalarning bir jinslimasligida vujudga keladi (3.1,b-rasm).



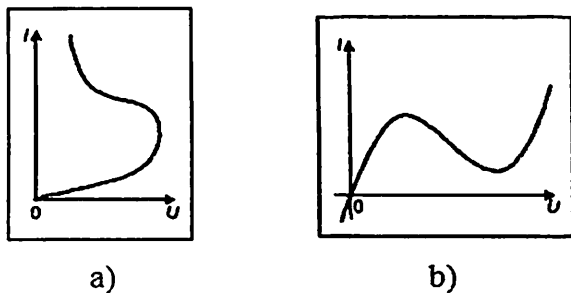
3.1-rasm. Mikrotasmali liniya (a) va uning asosidagi passiv elementlar: rezistor (b), kondensator (c, d), induktivlik (e, f)

O'YUCH-diapazon mikrosxemalarining kondensatorlari ham MTL asosida ishlab chiqariladi. Kichik nominallarni (bir necha pF) MTL uzilishlarida olish mumkin (3.1, c-rasm), katta sig'implar esa taroqsimon kondensator turidagi konstruktsiya ko'rinishida amalga oshiriladi (3.1,d-rasm). Sig'imi 10 pFdan yuqori bo'lgan kondensatorlarni olish uchun ko'p qatlamli tuzilmalar ishlatiladi.

Induktivlik O'YUCH-sxemalar elementi sifatida MTLning to'rtburchakli qismi shaklida, kenglik bo'yicha sakrashli yoki dumaloq va kvadrat spiral shaklida amalga oshirilishi mumkin (3.1,e,f-rasm).

Passiv elementlarga shartli ravishda tebranishlarni generatsiyalaymaydigan O'YUCH-diapazon diodlari kiradi. S-simon (3.2,a-rasm) yoki N-simon (3.2,b-rasm) volt-amper xarakteristikalariga ega bo'lgan diodlar konstruktsiyalari mavjud.

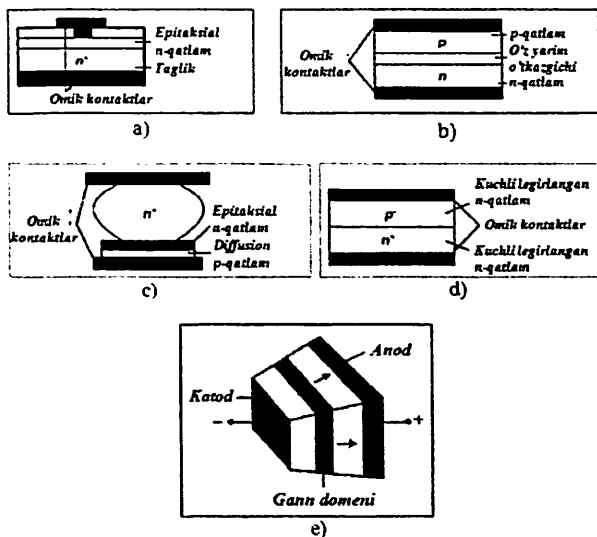
Bunday diodlar volt-amper xarakteristikasining ma'lum oraliqlarida manfiy differensial qarshilikka ega va shunga mos ravishda elektromagnit tebranishlarni generatsiyalay oladi. Bu diodlar va triodlar tuzilmalari O'YUCH-mikrosxemalarning aktiv elementlariga kiradi.



3.2-rasm. S-simon(ko'chkili diod) (a) yoki N-simon (tunnelli diod) (b) volt-ampér xarakteristikalar

Shottki to'sig'ili diod "metall – yarimo'tkazgich" to'g'rilovchi kontakt hisoblanadi (3.3,a-rasm). U asosiy zaryad tashuvchilarda ishlaydi, bunda noasosiy zaryadlar to'planmaydi. Teskari qarshilikni qayta tiklanishi vaqti taxminan 10^{-8} sekundni tashkil etadi, bu esa 300 GGs chastotalargacha bunday tagliklardan foydalanishga imkon beradi.

p-i-p -tuzilmadagi diod *p*- va *n*-sohalar orasidagi siyrak *i*-qatlam asosida shakllantiriladi. U yuqori teshilish kuchlanishiga ega (3.3, b-rasm) va 1 kVdan yuqori kuchlanishlarda va 10 kVt tartibdagi impulsli quvvatda ishlay oladi.



3.3-rasm. O'YUCH-diapazon diodlari va triodlari: a - Spottki to'sig'ili diod; b - *p-i-p* diod; c - ko'chkili diod; d - tunnelli diod; e - Gann diodi

Ko'chkili diod yuqori teskari kuchlanishlarda n - p - o 'tishning ko'chkili teshilishi asosida ishlaydi (3.3, c-rasm). Uning asosida gigagersli chastotalar diapazonida ishlaydigan etarlicha quvvatli diodlarni yaratish mumkin.

Tunnelli diodlar tunnelli samarali n - p - o 'tishlar (3.3, d-rasm) hisoblanadi. Ular keng polosali, past shovqinli, yuqori haroratga chidamlilikka ega.

O'z konstruksiyasi asosidagi Gann diodi "metall – yarimo'tkazgich" to'g'rilamaydigan kontaktga ega (3.3,e-rasm). U gigagersli chastotalar diapazonida sezilarli impulsli quvvatlarda ishlaydi.

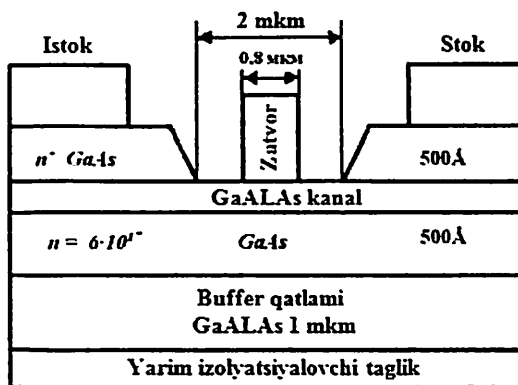
Biroq, aktiv elementlar sifatida O'YUCH maydoniy va bipolyar tranzistorlar katta qiziqish uyg'otadi. Mikroelektronikaning an'anaviy tranzistorlar tuzilmalaridan ularning asosiy farqi material hisoblanadi. Agar an'anaviy mikroelektronikada barcha tuzilmalar u yoki bu turdagi o'tkazuvchanlikdagi kremniyli tagliklarda yasalgan bo'lsa, u holda O'YUCH mikroelektronikasida $A^{III}V^V$ yoki $A^{II}V^{VI}$ turdagi yarimo'tkazgichli birikmalar ishlatiladi.

3.1.2. O'YUCH-diapazonintegral tranzistorlari haqida tushunchalar

O'YUCH-tranzistorlarning asosiy turi galliy arsenid texnologiyasi bo'yicha bajarilgan zatvor sifatida **Shottki to'sig'iga ega bo'lgan maydoniy tranzistorlar** hisoblanadi. 3.4-rasmda n -turdagi kanalli galliy arsenidagi maydoniy tranzistorning tuzilmasi keltirilgan. Zatvor va kanal qatlami orasiga qalinligi 300 \AA bo'lgan legirlanmagan GaAlAs qatlami kiritilgan, uning vazifasi "zatvor–stok" teshilish kuchlanishini oshirishdan iborat.

Har xil turlardagi maydoniy tranzistorlarini tashuvchilarni o'tkazish mexanizmi bo'yicha tasniflash mumkin. Elektronlarning istokdan stokga siljishida ular ko'p sonli to'qnashuvlarga duch keladi. Maydoniy tranzistorlar kanalidagi maydon kuchlanganligi odatda 10 kV/smdan oshadi, barqaror rejimda elektronlar energiyasining o'rtacha qiymati 3 eVdan oshadi. Bu holda to'qnashuvlar chastotasi 10^{13} s^{-1} dan sezilarli katta bo'ladi. Binobarin, uchish vaqti 10^{-12} sekund, u holda tashuvchilar uchish vaqtida o'nlab yoki yuzlab to'qnashuvlarga uchraydi. Ikkita to'qnashuvlar orasidagi 10^{-12} sekund davomida tashuvchilar 400 \AA dan oshmaydigan masofani bosib o'tadi.

Maydon tranzistorlarni loyihalashda kichik kanal uzunligida zarur bo‘ladigan kanalda tashuvchilar konsentratsiyasining ortishida harakatchanlikning pasayishi muammosi bilan to‘qnashishga to‘g‘ri keldi. Bino-barin, tashuvchilar konsentratsiyasining oshishi legirlash darajasining oshishiga bog‘liq, u holda donorlar konsentratsiyasining oshishi tashuvchilarning donor ionlari bilan to‘qnashish ehtimolligini oshiradi va harakatchanlikni pasaytiradi.



3.4-rasm. Shottki to‘sig‘ili tranzistorning tuzilmasi

Getero‘tishlardan foydalanish bu qarama-qarshilikni bartaraf etishga imkon berdi: ikki o‘lchovli elektron gaz donorlar va erkin elektronlar konsentratsiyasini oshirmasdan tashuvchilarning oshirilgan konsentratsiyasili qatlamni olish imkonini beradi, bu esa yuqori konsentratsiyalarni olish imkonini beradi.

Bu tranzistorlar tuzilmalarida legirlash darajasining o‘zgarishi ularning “modulyasion legirlash” yoki “selektiv legirlash” nomida aks etadi.

Elektronlarning yuqori harakatlanuvchanligi tranzistorlar tuzilmalarining boshqa variantlari (HEMT, High Electron Mobilitu Transistor) ham bo‘lishi mumkin, masalan, GaAs stor zonali yarim o‘tkazgich asosidagi qatlamli kanalli va “elektronlarni etkazib beruvchi” qatlami – AlTnAs keng zonali yarim o‘tkazgichli variant bo‘lishi mumkin.

300 K bo‘lganda GaTnAs kanalidagi harakatchanlik $10000 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ga etadi. Ikki o‘lchovli elektron gaz $(3 \div 4,5) \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ qatlamida yuqori zaryad zichligi ta‘minlanadi.

Shuni ta‘kidlash kerakki, elektronlarning yuqori harakatlanuvchanlik tranzistordagi barcha bu xususiyatlar past haroratlarda sezilarli katta

darajada namoyon bo'ladi. Elektronlar yuqori harakatlanuvchan tranzistorlarning imkoniyatlarini amalga oshirishda jiddiy to'siqlardan biri bu AlGaAs tarkibida alyuminiy miqdori yuqori darajada bo'lgan elektronlar uchun chuqur tuzoqlarning bo'lishi hisoblanadi. Ikki o'lchovli elektron gazli qatlamni olish uchun AlGaAs tarkibidagi alyuminiy miqdori $x > 0,2$ qiymatdan oshishi kerak, lekin bu qiymatlarda chuqur tuzoqlar stok VAXining buzilishiga, generatsion-rekombinatsion shovqinlar sathining oshishiga va hatto fotosezgirlik samarasining paydo bo'lishiga olib keladi.

Qarama-qarshi choralar sifatida AlGaAs / TnGaAs bo'linish chegasida ikki o'lchovli elektron gaz qatlamini hosil qilish taklif etiladi. Boshqacha aytganda, tranzistorning bu modifikatsiyasi AlGaAs qatlam (30 - 40 A) va legirlanmagan GaAs (1 mkm) qatlami orasiga 200 A qalinlikdagi TnGaAs qatlami kiritilishi bilan ajralib turadi.

Bu modifikatsiya elektronlarning yuqori harakatlanuvchanlikli psevdomorfik tranzistor nomini oldi. TnGaAs qatlamining ta'siri shu bilan tushuntiriladiki, bu material galliy arseniddagiga qaraganda kichikroq ta'qiqlangan zonaning kengligiga ega. Aynan shu u bilan juftlikda alyuminiy miqdori past bo'lgan AlGaAs qatlamdan muvaffaqiyatli foydalanishga imkon beradi ($x = 0,15$).

O'YUCH-diapazon maydoniy tranzistorlarini ishlab chiqarishning ayrim o'ziga xos xususiyatlarini ko'rib chiqamiz. Texnologik jarayonda molekulyar-nurli epitaksiyadan foydalaniladi. Taglik sifatida galliy arsenid plastinalari ishlatiladi.

Zatvorlarning volfram elektrodleri elektron-nur litografiya va reaktiv ionli ishlov berish yordamida ishlab chiqariladi. Kengligi 0,25 mkmdan kichik va balandligi 1 mkmdan yuqori bo'lgan elektrodleri olish mumkin. Stoklarning aktiv sohalari ionli implantatsiyalash yordamida kremniy bilan legirlanadi. Taglikning har ikki tomonlaridan (zatvor va istok) qurilma elementlarini birlashtirish infraqizil nurda amalga oshiriladi. Bu konstruksiyadagi tranzistorning ikkita variantlari bo'lishi mumkin: kanalning bir jinsli aktiv sohasida va geteroo'tishli va ikki o'lchovli elektron gaz qatlamli (HEMT turi bo'yicha).

Maydon tranzistorlarning ikki zatvorli variantli alohida ta'kidlash kerak bo'ladi. Bu konstruksiya ayniqsa, kuchaytirishni avtomatik rostdash sxemalarida yoki boshqariladigan kuchaytirishli kaskadlarida, masalan, talab qilinganidek, aktiv fazaviy antennalar modullarida foydalanish uchun qulay hisoblanadi.

3.1.3. Monolit galliy arsenidli ISlar

Monolit galliy arsenidli integral sxemalar (MIS) 1 dan 100 GGgacha bo'lgan chastotalar diapazonini qamrab oladi. Bu ularning radiolokatsion stansiyalar, sun'iy yo'ldoshli navigatsiya tizimlari, aloqa vositalari va boshqalarda keng qo'llanishi imkonini beradi.

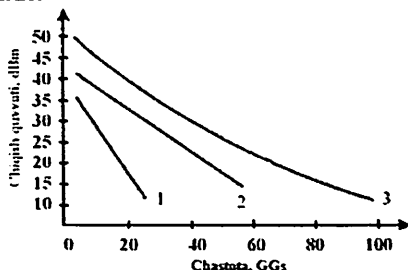
GaAs MISlarga bo'lgan talabning o'sishi tez rivojlanayotgan simsiz aloqa tizimlari bozori bilan rag'batlantiriladi.

Galliy arsenidli integral mikrosxemalarda asosan quyidagi tranzistorlar tuzilmalar ishlatiladi:

- Shottki to'sig'ili (MESFET) maydoniy tranzistor;
- qaynoq elektronlardagi tranzistorlar (HEMT);
- bipolyar geterotranzistorlar (NVT).

3.5-rasmda har xil turlardagi galliy arsenidli tranzistorlarining chiqish quvvatini chastotaga bog'liqligi tasvirlangan.

Galliy arsenidli ISlar uchun tranzistorlar turini tanlash fundamental ishlash mexanizmlariga, texnologiyani takomillashtirish darajasiga bog'liq. Zamonaviy GaAs ISlarning asosiy aktiv elementi MESFET tuzilmalari hisoblanadi.



3.5-rasm. Har xil turlardagi galliy arsenidli tranzistorlarining chiqish quvvatini chastotaga bog'liqligi: 1 - GaAs MESFET; 2 - AlGaAs/GaAs NVT; 3 - GaAs HEMT

Biroq, bu turdagi tranzistorlarning yuqori chastotali xarakteristikalari elektronlarning harakatchanligi va kanalning uchish vaqti bilan cheklangan. Zatvorning uzunligini kamaytirish bilan MESFET-tranzistorlarning tezligini oshirish mumkin, ammo bu unchalik samarali emas. Elektronlarning harakatchanligini oshirishga harakat qilinadigan murakkab tuzilmalar yaratilgan. Masalan, HEMT -tuzilmasida kvant chuqurchalariga ega bo'lgan geteroo'tishlar yaratiladi, ularda elektronlarning harakatchanligi sezilarli oshadigan ikki o'lchovli elektron gaz shakllantiriladi.

NVT turdagi tranzistorlar tuzilmalar konstruksiyasi bo'yicha ko'p jihatdan kremniyli bipolyar tranzistorlarga o'xshaydi, ishlash prinsipi bo'yicha esa ular qaynoq elektronlardagi tranzistorlarga o'xshaydi. NVT tranzistorlar tuzilmalarining aktiv sohasi bo'lib GaAs - GaAlAs va GaAs - InGaAs turlardagi geteroo'tishlar xizmat qiladi. Bu sohada tashuvchilar aralash ionlardagi sochilishsiz legirlanmagan kanalda harakatlanadi. Bu tezkorlikning ortishiga olib keladi. Galliy arsenidli tranzistorlar tuzilmalarining konstruksiyalarini ishlab chiqish va texnologiyasini yaratishdagi yutuqlar YUCH-sxemalar, past shovqinli kuchaytirgichlar va quvvat kuchaytirgichlariga bo'lgan ehtiyojining kengayishiga umid qilishga imkon beradi. Agar birinchi sanoat galliy arsenidli integral sxemalar faqat harbiy aloqa tizimlari uchun mo'ljallangan bo'lsa, hozirgi vaqtda ular keyingi avlod fuqarolik kommunikatsiyasi tizimlarida keng qo'llanilishi kutilmoqda.

3.2. Zamonaviy mikroelektronikada geterotuzilmalar

So'nggi yillarda millimetrlil diapazon chastotalarida ishlay oladigan yarimo'tkazgichli qurilmalarni yaratish zarurati yanada keskinlashdi. Ularni qo'llanishi sohaslariga keng polosali radioaloqa, yuqori tezlikli ma'lumotlarni uzatish tizimlari, avtomobillarning to'qnashuvlarini oldini olish tizimlari, murakkab meteorologik sharoitlarda kuzatuv tizimlari, atrof-muhit va atmosferani monitoring qilish tizimlari, o'lchash texnikasi, shuningdek, yangi avlod kompyuterlarining elementar bazasi kiradi. Kremniyli texnologiyalarning yutuqlari 40 GGsgacha chastotalarda ishlay oladigan qurilmalarning yaratilishiga olib keldi, lekin hozirda 1000 GGsgacha chastotalar diapazonini kengaytirishga ehtiyoj sezilmoqda. Bunday qo'llanishlar uchun eng istiqbolli qurilmalar- $A^{III}V^V$ yarimo'tkazgichli birikmalardagi geteroo'tishli bipolyar va maydon tranzistorlar hisoblanadi. Maydon tranzistorlar O'YUCH-diapazonda eng yaxshi shovqin xarakteristikalariga ega. Maydon tranzistorlar potensial yuqori radiatsion barqarorlikka ega, chunki ularning ishlashi faqat asosiy zaryad tashuvchilardan foydalanishga asoslangan.

3.2.1. Geteroo'tishning asosiy xususiyatlari

Birinchi marta geteroo'tish $x = 0,8$ va GaAs bo'lganda qattiq eritma (Al_xGa_{1-x}) orasida olingan. Bu J.I. Alferov boshchiligidagi guruhda 1964 - 65 yillarda amalga oshirildi. 2000 yilda bu ishi uchun J.I. Alferov ame-

rikalik fizik nazariyotchi G. Kremer bilan birgalikda Nobel mukofotiga sazovor bo'ldi.

Yarimo'tkazgichli geterotuzilmalardan amaliy foydalanish sohasidagi birinchi yutuq xona haroratida ishlaydigan injeksion yarimo'tkazgichli lazerlarning yaratilishi bo'ldi. Ixcham yarimo'tkazgichli lazerlar va yorug'likni nurlantiradigan diodlar yarimo'tkazgichlarning eng ommaviy yarimo'tkazgichli qurilmalardan biriga aylandi. Yarimo'tkazgichli geterotuzilmalardan foydalanish zamonaviy mikroelektronikaning asosiy elementi - tranzistorning parametrlari va xarakteristikalarini sezilarli yaxshilash imkonini berdi. Geteroo'tishli bipolyar tranzistor getero tuzilmali lazer bilan deyarli bir vaqtda taklif qilingan.

Yaqin kristall tuzilishga ega, lekin turli ta'qiqlangan zonasi kengligi ikkita yarimo'tkazgichlar orasidagi geteroo'tishni ko'rib chiqamiz. Bunday shartni parametrlari 3.1-jadvalda keltirilgan AlAs va GaAs sohasidagi o'tish qondiradi.

Shuning uchun, geteroo'tishlarni shakllantirish uchun $x < 0,8$ bo'lganda qattiq eritma (Al_xGa_{1-x}) ishlatiladi. Uchtalik birikma ta'qiqlangan zonasining kengligi (Al_xGa_{1-x})As alyuminiyning kiritilishida x ortishi bilan ortishi bilan chiziqli ortadi. Odatdagi qiymat $x = 0,3n$ tashkil qiladi, bunda $E_g = 1,8$ eV bo'ladi.

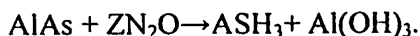
Geteroo'tish zonaviy diagrammasining o'ziga xos xususiyati shundaki, geteroo'tish chegaralarida ΔE_S va ΔE_V sakrashlar mavjud.

3.1 -jadval.

Asosiy yarimo'tkazgichli materiallarning parametrlari.

	GaAs	AlAs	InP	InAs	InSb	GaSb	Ge	Si	GaN	AlN
a (Å)	5,65	5,66	5,86	6,06	6,48	6,1	5,65	5,43	3,18 5,17	3,11 4,98
E_g , eB	1,42	2,16	1,35	0,36	0,18	0,73	0,66	1,05	3,39	6,1
m_n^*/m_0	0,07	0,78	0,08	0,02	0,01	0,04	0,55	1,18	0,2	
m_p^*/m_0	0,57	0,86	0,74	0,5	0,41	0,44		0,8		

AlAs suvga chidamli emas va ular o'zaro ta'sirlashishida quyidagi kimyoviy reaksiya sodir bo'ladi:

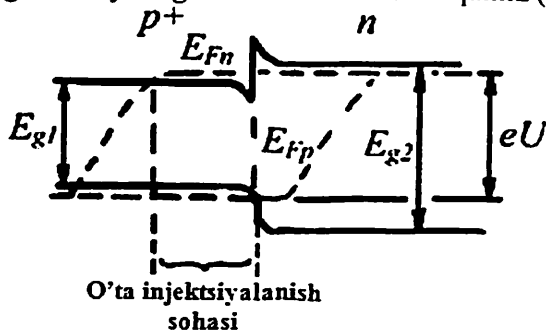


Aynan sakrashlarning bo'lishi geteroo'tishning ikkita prinsipial o'ziga xos xususiyatlari – o'ta injeksiyalanish va ikki o'lchovli elektron gazining hosil bo'lishini ta'minlaydi.

3.2.2. Geteroo'tishda muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning o'ta injeksiyalanishi

Gomoo'tishda emitterdan injeksiyalanadigan noasosiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi ularning emitterdagi konsentratsiyasidan oshmasligi kerak.

O'ti ochiq va undan tok oqib o'tadigan to'g'ri tashqi siljitishda geteroo'tishning zonaviy diagrammasini ko'rib chiqamiz (3.6-rasm).



3.6-rasm. To'g'ri ulanishda geterotuzilmaning zonaviy energetik diagrammasi

Bu holda tizim muvozanatsiz bo'ladi. Bunday sharoitlarda statsionar Fermi sathi mavjud bo'lmaydi va zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi odatda Fermi kvazi-sathlari yordamida tavsiflanadi. O'tkazish zonasining tubidan sakrash tufayli o'tish yaqinidagi p -turdagi sohadagi $E_{F,n}$ elektron kvazi-sath E_s dan yuqoridan tugaydi. Shu tarzda elektronlar konsentratsiyasining yuqori qiymatlarigaega bo'lgan muvozanatsiz degeneratsiyalangan elektron gaz vujudga keladi. Tok oqib o'tishida p -yarimo'tkazgichdagi muvozanatsiz elektronlar konsentratsiyasining bunday oshishiga **o'ta injeksiyalanish** deyiladi. O'ta injeksiyalanish hisobiga n_p konsentratsiyasi n -yarimo'tkazgichdagi legirlash aralashmalarining konsentratsiyasidan yuqori bo'lishi mumkin.

Yetarlicha katta siljitish kuchlanishida geteroo'tishda (n - p -geteroo'tish uchun) o'tkazish zonasida ΔE_v , yoki valentlik zonasida (p - n geteroo'tishda) ΔE_v uzilishlar mavjudligi tufayli elektronlar (kovaklar) uchun "manfiy" to'siq hosil bo'lishi mumkin. Bu 3.6-rasmda p - n -geteroo'tish uchun tasvirlangan. Geterocheгарadagi tor musbat potensial to'siqdan elektronlar tunnel samarasi tufayli erkin o'tadi va keyin potensial chuqurchaga tushadi. Shu tufayli injeksiyalangan zaryad tashuvchilar-

ning konsentratsiyasi ularning emitterdagi konsentratsiyasidan oshib ketishi mumkin (3.6-rasmda), n -sohadagi Fermi sathi o'tkazish zonasining tubidan pastda, p -sohada elektronlar uchun esa Fermi kvazi-sathi o'tkazish zonasining ichida joylashadi. p - n geteroo'tishdagi injeksiyalangan elektronlar p_p konsentratsiyasining emitterdagi n_n muvozanatli konsentratsiyasga (N -sohada) erishiladigan maksimal nisbati quyidagicha aniqlanadi:

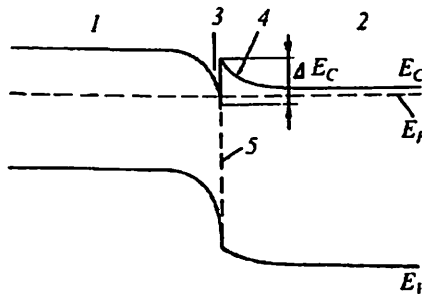
$$\frac{n_p}{n_n} \rightarrow \exp \frac{\Delta E_v}{kT}. \quad (3.1)$$

O'xshash tarzda n - p -geteroo'tishdagi maksimal nisbati quyidagicha aniqlanadi:

$$\frac{p_n}{p_p} \rightarrow \exp \frac{\Delta E_v}{kT}. \quad (3.2)$$

3.2.3. Ikki o'lchovli elektron gaz haqida tushuncha

Geteroo'tishning energetik diagrammasiga muvofiq (3.7-rasm), gallyiy arsenidida o'tkazish zonasida o'tish chegarasi yaqinida elektronlar minimal energiyali soha hosil bo'ladi, bu yerda ularning to'planishi bo'lib o'tadi.



3.7-rasm. Gallyiy arsenid asosidagi geteroo'tishning energetik diagrammasi: 1 - GaAs, 2 - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_3$ — elektronlar uchun potensial chuqurcha, 4 – legirlangan yarim o'tkazgich tomonidan potensial to'siq, 5 – o'tish chegarasi

Elektronlar zaryad tashuvchilarni yetkazib beruvchi vazifasini bajaradigan ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) qatlamda joylashgan 4-sohadan o'tadi. Natijada, bu sohada kompensatsiyalanmagan donorlarning ortiqcha musbat zaryadiga ega bo'lgan siyrak qatlam hosil bo'ladi.

3-sohada to'plangan elektronlar potensial chuqurchada bo'ladi va kuchsiz elektr maydonlarda faqat o'tish chegarasiga parallel harakatlanishi mumkin. Shuning uchun, 3-sohadagi elektronlarning to'planishi ikki o'lchovli elektron gaz (IEG) deyiladi, chunki kuchsiz maydonlarda ular potensial to'siq borligi sababli 4-sohaga o'ta olmaydi.

Ikki o'lchovli elektron gaz donorlar konsentratsiyasini oshirmasdan oshirilgan tashuvchilar konsentratsiyasili qatlamni olish imkonini beradi. Darhaqiqat, minimum sohada bo'lgan elektronlar aralashmalar konsentratsiyasi yetarli yuqori bo'lgan qo'shni yuqori legirlangan sohada ($Al_xGa_{1-x}As$) hosil bo'lgan. Shu bilan bir vaqtda, 4-soha galliy arsenid ichida joylashgan bo'lib, unda fononlarning sochilishi ustunlik qiladi.

Donor ionlari va erkin elektronlarni fazoviy ajratish yuqori harakatlanuvchanlik qiymatlari bilan bir vaqtda tashuvchilarning yuqori konsentratsiyasini olish imkonini beradi. 100 angstromdan kichik qalinlikda ikki o'lchovli gaz qatlami 10^{12} sm^{-2} tartibdagi elektronlar konsentratsiyasiga ega, bu taxminan 10^{19} sm^{-3} hajmiy konsentratsiyaga to'g'ri keladi. Natijada, ikki o'lchovli elektron gaz qatlamida $6500 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ elektronlar harakatchanligini olish mumkin, shu bilan birga qattiq legirlangan galliy arsenidda esa u $1500 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ni tashkil qiladi. Boshqacha aytganda, harakatchanlikni deyarli yo'qotmasdan bu usulda tashuvchining konsentratsiyasini, shuningdek, siljish tezligining chegaraviy qiymatini 2-3 marta va undan ortiqqa ko'tarishga erishiladi.

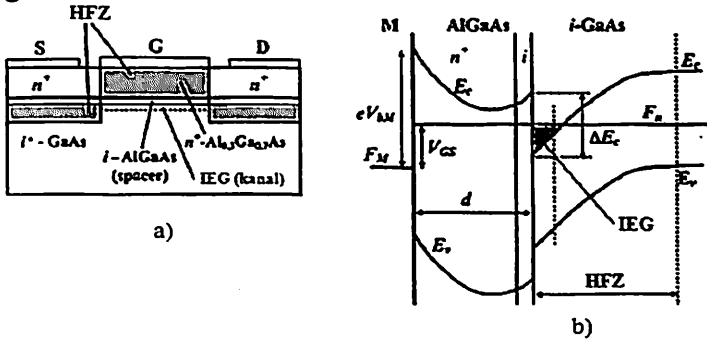
3.3. Geterotuzilmali maydon va bipolyar tranzistorlar

3.3.1. Yuqori harakatlanuvchan elektronlar tranzistori

Yuqori chastotali maydoniy tranzistorlarni loyihalashda kichik kanal uzunligida zarur bo'ladigan kanaldagi tashuvchilar konsentratsiyasining ortishida harakatchanlikning pasayishi muammosi vujudga keldi. Bino-barin, tashuvchilar konsentratsiyasining oshishi legirlash darajasining oshishi bilan bog'liq, u holda natijada qurilmaning harakatchanligi va tezkorligi pasayadi. O'YUCH-tranzistorlarni loyihalashda ikki o'lchovli geteroo'tishlarning elektron gaz sohasidan foydalanish bu muammoni yechishga imkon berdi. Horijiy adabiyotlarda bunday tuzilmalar **yuqori elektronlar harakatlanuvchan tranzistorlar tuzilmalari** (HEMT - HighElectronMobilityTransistor) nomini oldi.

Yaratilishi 1980 yilga to'g'ri keladigan metall-yarimo'tkazgichli boshqarish o'tishli getero tuzilmali maydoniy tranzistorning (GMEP yoki HEMT) ishlashi va konstruksiyasining o'ziga xos xususiyatlarini ko'rib chiqamiz.

HEMTning tuzilmasi va energetik diagrammasi 3.8-rasmda tasvirlangan.



3.8-rasm. $Al_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$ HEMTning tuzilmasi (a) va energetik diagrammasi (b)

HEMTlardagi zatvor osti dielektrigi rolini keng diapazonli yarimo'tkazgich (AlGaAs) o'ynaydi, u zonalar uzilganda energiya diagrammasining egriligi tufayli, hatto yuqori legirlash darajasida ham elektronlar bilan to'liq siyraklashgan qoladi. HEMTlarda kanalning qalinligi juda kichik. Elektronlarning kichik samarali massasida (0,067 m) bu geteroqatlam chegarasiga normal yo'nalishdagi elektronlarning harakatlani-shini kuchli kvantlanishiga va orasidagi masofa yetarlicha katta bo'lgan energetik nimzonalarning shakllanishiga olib keladi.

Yuqori harakatchanlik va to'yinish tezligi, shuningdek, HEMTlarda zatvorda kuchlanishning o'zgarishida kanalning samarali qalinligi o'zgarmaydi, HEMTlarda Shotki zatvorli oddiy galliy arsenidli tranzistor-dagiga qaraganda VAXning sezilar katta solishtirma qiyaliklariga erishiladi.

HEMTlarning bo'sag'aviy kuchlanishi AlGaAs geteroo'tishning dH qalinligi va legirlash darajasi orqali aniqlanadi. Ta'kidlaymizki, HEMTlarda kanal o'tkazuvchanligi modulyasiyalash kanalning qalinli-gini o'zgartirish hisobiga (MESFETlarda bo'lganidek) emas, balki kanal-dagi elektronlarning sirt zichligini o'zgartirish orqali amalga oshiriladi. Shuning uchun, uzun kanalli HEMTlarning volt-ampere xarakteristikalari MDOO'-tranzistorning volt-ampere xarakteristikalariga o'xshaydi.

“Zatvor osti dielektrigining” o‘zgarmas qalinligi zatvor va kanal orasidagi masofa OPZnng kengayishi tufayli stok yo‘nalishida o‘tadigan bir jinsli kanalli MESFETlarga qaraganda katta qiyalikni ta‘minlaydi. Xatto kanalidagi elektronlarning bir xil harakatchanligi va teng zatvor - kanal sig‘imida bu VAXning qiyaligini MESFETlardagiga qaraganda 15 - 20 % ga ortishiga olib keladi. Natijada bir xil texnologik me‘yorlarda HEMTlar taxminan 1,5 - 2 barobar yuqori chegaraviy chastotaga ega bo‘ladi.

HEMTlarning yana bir afzalligi uning past chiqish o‘tkazuvchanligi hisoblanadi. Natijada, hatto 0,2 mkm kanal uzunligida kuchlanish bo‘yicha o‘z kuchaytirish koeffitsient 50 yoki undan kattaga etishi mumkin.

HEMTlarning bir turi **teskari tuzilmaga ega bo‘lgan qurilmalar** hisoblanadi. Teskari HEMTlarda kanal hosil bo‘ladigan tor zonali GaAs qatlami to‘siq kontakti va keng zonali AlGaAs geteroqatlam orasida joylashgan. Bu tuzilma qator afzalliklarga ega. Xususan, GaAs ochiq yuzasi AlGaAs ochiq yuzasiga qaraganda ancha barqaror. Bundan tashqari, GaAs legirlanmagan qatlami bo‘lgan “zatvor dielektrigi” bo‘lagi kuchlanishning yuqori takrorlanuvchanligini ta‘minlaydi.

3.3.2. Pseudomorfik va metamorfik tuzilmalar (*p*-HET va *m*-HET)

GaAs asosidagi yuqori elektronlar harakatchanuvchan tranzistorlarning imkoniyatlarini amalga oshirishdagi jiddiy to‘siqlardan biri $\text{AlGa}_{1-x}\text{As}_x$ tarkibida alyuminiy yuqori bo‘lganda elektronlar uchun chuqur tuzoqlarning bo‘lishi hisoblanadi. Ikki o‘lchovli elektron gazli qatlamni olish uchun $x \geq 0,2$ qiymatlar talab qilinadi, lekin bu qiymatlarda chuqur tuzoqlar stok VAXlarining buzilishiga, generatsion-rekombinatsion shovqin sathining oshishiga va hatto fotosezgirlik samarasining paydo bo‘lishiga olib keladi.

Texnologiyaning keyingi rivojlanishi $A^{III}V$ birikmalar asosida yangi yarimo‘tkazgchli tuzilmalarni yaratilishiga olib keldi. HEMT xarakteristikalarini sezilarli yaxshilash imkonini bergan InGaAs, InGaP, InAlAs va InP birikmalari juda istiqbolli bo‘lib chiqdi.

Galliy arsenidga indiyning kiritilishi elektronlarning harakatchanligini oshiradi. InGaAs, InGaP, InAlAs o‘zgarmas panjaralar va InP tagliklar o‘zaro yaxshi mos keladi, bu esa In indiyning molyar qismini $x = 0,6$ gacha yetkazish va 300 K haroratda elektronlarning

harakatchanligini taxminan ikki barobar oshirish imkonini beradi. Indiy GaAs galliy arsenidga kiritilishi ta'qiqlangan zonani toraytiradi, binobarin, $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{GaAs}$ geterotuzilmasidagi o'tkazish zonasining uzilishi taxminan 0,5 V ni tashkil qiladi ($\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ getero tuzilmasidagiga qaraganda ikki baravar katta).

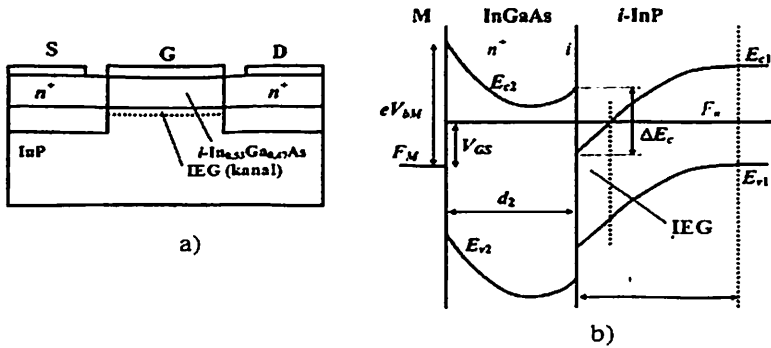
Bu holat parazit kanalni zararsizlantirishga yordam beradi.

Bunday birikmalardagi panjara doimiylaridagi sezilarsiz nomuvofiq-lik elastik kuchlanishlarning paydo bo'lishiga olib keladi. Ikkita hajmiy materiallarning geteroo'tishidagi kontaktida dislokatsiyalarning paydo bo'lishi bilan kuchlanish relaksatsiyalanadi, bu esa geteroo'tishning elektr xarakteristikalarini sezilarli yomonlashtiradi. Bunday geteroo'tishlardan faqat elektr yoki optik aktiv sohani taglikli bufer qatlamidan ajratadigan bufer qatlamlarini yaratishda foydalanish mumkin. Agar materiallardan birining qatlami yetarlicha yupqa bo'lsa, u holda u elastik deformatsiyalar ko'rinishida ma'lum chegaragacha elastik kuchlanishlar energiyasini to'play oladi. Bunday qatlam sifatida kvant chuqurchasini hosil qiladigan tor zonali materialdan foydalanish maqsadga muvofiq.

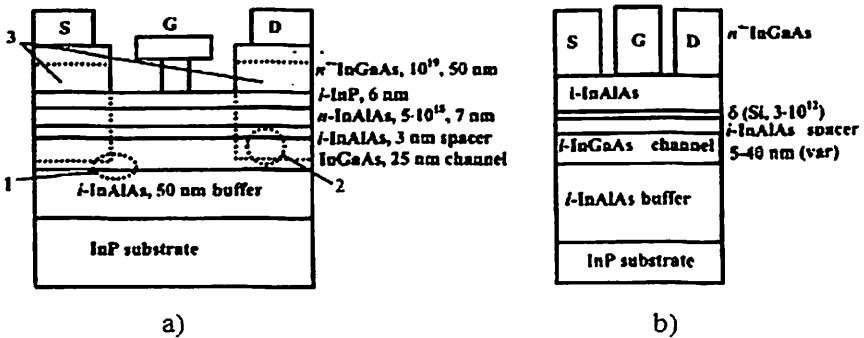
Bunday tuzilma asosida yaratilgan tranzistorlar **pseudomorfik HEMT (*p*-HEMT) tranzistorlar** deyiladi. $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}$ bo'linish chegarasida ikki o'lchovli elektron gaz qatlamining shakllanishi u bilan juftlikda alyuminiy miqdori past bo'lgan ($x = 0,15$) AlGaAs qatlamni ishlatishga imkon beradi.

InP taglikdagi pseudomorfik HEMTlarda (InGaAs/InP tuzilma) eng yaxshi xarakteristikalar olindi. $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ *p*-HEMTning eng oddiy tuzilmasi va energetik diagrammasi 3.9-rasmda keltirilgan. Ularning afzalliklari eng katta darajada quvvatli qurilmalarga qo'llanishda namoyon bo'ladi, chunki InP galliy arsenidga qaraganda yuqoriroq issiqlikni o'tkazuvchanlikka ega. Bundan tashqari, *p*-HEMTlarda InP taglikda IEGning katta zichligi va elektronlarning katta chegaraviy tezligi ta'minlanadi, bu yuqoriroq tok zichliklarini olishga imkon beradi. Zamonaviy *p*-HEMTlarning asosiy tuzilmalari 3.10-rasmda tasvirlangan.

Kanal yupqa plyonali *i*- InGaAs shaklida bajarilgan va yuqoridan va pastdan kanaldagi elektronlarning yuqori harakatchanligini saqlanishiga yordam beradigan speyzer (ajratuvchi) va buferning (*i*- InAlAs) toza keng zonali qatlamlari bilan chegaralangan. Bu tuzilma kanalning elektronlari uchun chuqur potensial chuqurchani ta'minlaydi va ularning taglikga kirishiga to'sqinlik qiladi, bu esa qisqa kanalli tranzistorlarning chiqish o'tkazuvchanligini sezilarli kamaytiradi.



3.9-rasm. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ p -HEMTning eng oddiy tuzilmasi(a) va energetik diagrammasi (b)



3.10-rasm. InAlAs n -qatlam (a) va δ -legirlangan qatlam (b) zamonaviy p -HEMTlarning asosiy tuzilmalari

Bo'sag'aviy kuchlanish InAlAs n -qatlami (3.10,a-rasm) yoki δ -legirlangan qatlam (3.10,b-rasm) kirish chuqurligi va legirlash darajasi bilan tartibga solinadi.

InP tagliklarining yuqori narxi GaAs -taglikida $\text{AlInAs}/\text{InGaAs}$ tuzilmaga ega bo'lgan metamorfik HEMTlarni (m -HEMT) ishlab chiqishni rag'batlantirdi.

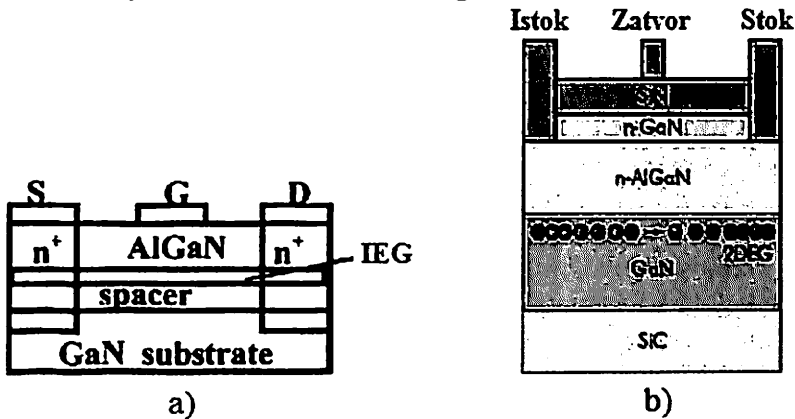
Geteroqatlamlar va GaAs tagliklari panjaralari doimiylarining mos kelmasligi taxminan 3,8%ni tashkil etadi, bu esa yuqori sifatli tuzilmalarni olishda asosiy to'siq hisoblanadi. InGaAs qatlamining atom panjaralarini GaAs taglikga moslashtirish uchun bufer qatlamlarning ko'p qatlamli varizonaviy tizimi ishlatiladi. Qalinligi 1 - 2 mm bo'lgan

AlGaAsSb bufer qatlamining kiritilishi 10^6 sm^{-2} dan dislokatsiyalar sirtlarining kichik zichligini olishga imkon beradi.

Hozirgi vaqtda *m*-HEMT xarakteristikalari InF-taglikida *p*-HEMT xarakteristikalariga deyarli yutqazmaydi. Bundan tashqari, O'YUCHda GaAs taglik InP taglikka qaraganda sezilarli yaxshi dielektrik xususiyatlarga ega.

3.3.3. GaN tagliklardagi HEMT

Yuqori quvvatli O'YUCH qurilmalarda, shuningdek qat'iy ishlash sharoitlarida ishlash uchun mo'ljallangan qurilmalarda foydalanish uchun GaN va SiS keng zonali yarim o'tkazgichli birikmalar asosidagi tranzistorlar sezilarli afzalliklarga ega. AlGaN/GaN HEMTlarning tuzilmasi sxematik 3.11,a-rasmda tasvirlangan. IEGLi kanal AlGaN tor zonali qatlamida hosil bo'ladi. Chastotaviy va kuchaytirish xususiyatlari bo'yicha AlGaN/GaN HEMT $A^{III}V^V$ birikmalardagi tranzistorlarga yutqazadi, lekin ular tok zichligi, quvvat zichligi va stok-istok ishchi kuchlanishi bo'yicha $A^{III}V^V$ birikmalardagi tranzistorlardan ustun.



3.11-rasm. Shottki zatvorli (a) va MDYAO' zatvorli (b) AlGaN/GaN HEMT tuzilmalari

Tranzistorlarning to'yinish nuqtasi yaqinida ishlashini ta'minlash uchun (bu yuqori FIK va shu bilan iste'mol quvvatini kamaytirish uchun zarur bo'ladi, lekin zatvordagi katta o'tish toklari va tranzistorning ishonchliligi va kuchaytirishini yomonlashishiga olib keladi) MDYAO'-tuzilmali zatvorli GaN HEMT ishlab chiqilgan (3.11,b-rasm).

3.3.4. Geteroo'tishli bipolyar tranzistorlar

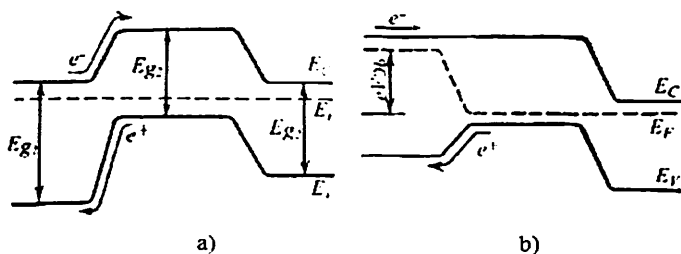
An'anaviy bipolyar tranzistorlarga qaraganda geteroo'tishli bipolyar tranzistorlarning (GBPT yoki HVT (inglizcha)) asosiy afzalligi –noasosiy tashuvchilarning emitterga injeksiyanishini so'ndirish hisoblanadi, bu esa legirlashni oshirish yo'li bilan baza qarshiligini kamaytirishga imkon beradi.

Oddiy bipolyar tranzistorlar bazaviy sohani legirlash darajasiga qaraganda emitter sohasining legirlash darajasi sezilarli yuqori bo'lsa, muvaffaqiyatli ishlaydi. Shundagina, emitter-baza o'tishda to'g'ri siljitishda emitterdan bazaga elektronlar toki bazadan emitterga kovaklar tokidan sezilarli katta bo'ladi. Bu toklarning nisbati emitter o'tishining samaradorligini tavsiflaydi.

Agar emitterdagi eruvchanlik va boshqa omillar bilan cheklangan aralashmalarning maksimal konsentratsiyasi 10^{19}sm^{-3} tartibga etsa, u holda gomoo'tishli tranzistor bazasining legirlanishi darajasi 10^{17}sm^{-3} dan oshmasligi kerak. Shu bilan birga, baza sohasining legirlanishining nisbatan past darajasi baza qarshiligini oshiradi, bu baza qarshiligi orqali tranzistorning qayta ulanishida kollektor sig'imini qayta zaryadlanishi amalga oshiriladi. Yakuniy hisobda, past legirlangan baza bipolyar tranzistorning tezkorligini sezilarli cheklaydi.

Geteroo'tishdan emitter-baza o'tish sifatida foydalanish bipolyar tranzistorning tezkorligiga ko'rsatilgan cheklashni olib tashlaydi.

3.12-rasmda $p-n-p$ -turdagi geteroo'tishli tranzistorning zonaviy tuzilmasi keltirilgan bo'lib, unda emitter sohasi sifatida keng zonali yarimo'tkazgich ishlatiladi.



3.12-rasm. Kuchlanish bo'lmaganda (a) va to'g'ri siljitishda (b) geteroo'tishli bipolyar tranzistorning zonaviy tuzilmasi

Binobarin, emitterni hosil qiladigan yarimo'tkazgich bazaga qaraganda kengroq ta'qiqlangan zonaga ega, emitterga kovaklarni injeksiyalanishi uchun energetik to'siq emitterdan bazaga elektronlarni injeksiyalanishi uchun to'siqdan yuqori bo'ladi (3.12,a-rasm).

Emitter-bazao'tishga to'g'ri siljitish qo'yilganda elektron tok uchun to'siq yo'qoladi, kovak toki uchun to'siq sezilarli qiymatga ega bo'ladi (3.12,b-rasm). Bu bazaviy sohani legirlanishi darajasidan qat'iy nazar, emitterning yuqori samaradorligini ta'minlaydi.

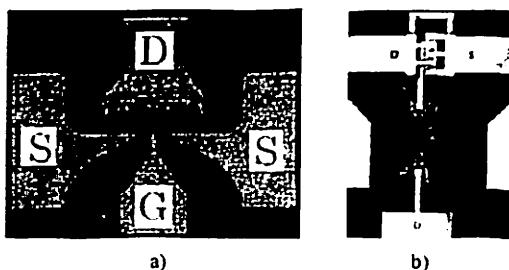
Bazadan emitterga kovaklarning toki uchun energetik to'siqning mavjudligi, injeksiyalash darajasini kamaytirmasdan, bazani yuqori darajagacha legirlash imkonini beradi. Emitter sohasidagi aralashmalar konsentratsiyasining kamayishi va kollektor sohasida ularning ortishi tranzistor tezkorligining oshirishga yordam beradi.

HEMT va GPBT tranzistorlarning tezkorligini ta'minlaydigan omillarni taqqoslashda HEMT tranzistorlarda gazni lokallashtirish tekisligida harakatlanishda ikki o'lchovli elektron gazning o'ta yuqori elektron harakatchanligi omilining yo'qligini ta'kidlaymiz. GPBT tranzistorlarda esa ishlab chiqaruvchiga geteroo'tishlar texnologiyasi va fizikasi beradigan o'tish sig'implari va baza orqali uchish vaqtini kamaytirish imkoniyatlaridan foydalaniladi.

3.3.5. Geteroo'tishli maydon tranzistorlardagi integral mikrosxemalar

$A^{III}B^V$ yarimo'tkazgichlarda HEMT tranzistorlarni qo'llanishining eng keng sohalari keng polosali aloqa va ma'lumotlarni uzatish tizimlari bo'lib, ularning muhim tugunlari tashqi interfeys bloklari – O'YUCH-diapazon past shovqinli va quvvatli kuchaytirgichlari, kuchaytirish rostlanadigan oraliq chastota kuchaytirgichlari, aralashtirgichlar, chastotalar ko'paytirgichlari, faza aylantirgichlar va kuchlanish bilan boshqariladigan generatorlar hisoblanadi.

Past shovqinli polosali O'YUCH-kuchaytirgichlar (PSHK) va keng polosali O'YUCH-kuchaytirgichlarni qurish uchun optimal qurilmalar eng yaxshi chastota va shovqin xarakteristikalariga ega bo'lgan psevdomorfik va metamorfik HEMT tranzistorlar hisoblanadi (3.13-rasm).



3.13-rasm. O'YUCH gibrid IS kuchaytiruvchi (a) vakalit (b) HEMT tranzistorining mikrosurati: D (Drain) - stok, S (Source) - istok, G (Gate) - zatvor

Quvvatli O'YUCH-kuchaytirgichlar p -HEMT va m -HEMT tranzistorlarda ham amalga oshiriladi. AlGaN/GaN HEMTlar potensial afzalliklarga ega, lekin ularni tayyorlash texnologiyasi hali sanoat darajasiga etmagan.

Keng polosali aloqa tizimlarining juda muhim tugunlari kuchlanish boshqariladigan generatorlar (KBG) hisoblanadi. KBGlarining eng yaxshi xarakteristikalarini hozirda bu sohada AlInAs/InGaAs, InGaP va SiGe HVTlar bilan raqobatlashadigan HEMT, p -HEMT va m -HEMTlarning qo'llanishi ta'minlaydi.

Fazaviy siljishni rostdash uchun aktiv qurilmalar orasida eng yaxshi natijalarga 0,15 mkm kanal uzunligi va 100 GGs chegaraviy chastotaga ega bo'lgan va 20 GGs chastotada ishlaydigan AlGaAs-InGaAs-GaAs (p -HEMT) asosidagi ISlarda erishildi.

Ikki zatvorli HEMT tranzistorlar quvvatli O'YUCH-aralashtirgichlarni yaratish uchun muvaffaqiyatli ishlatiladi.

Ma'lumotlarni optik uzatish tizimlari ma'lumotlarini qayta tiklash bloklarining tarkibida ishlashga mo'ljallangan p -HEMT tranzistorlardagi ISlar ishlab chiqilmoqda. Raqamli texnikada HEMT tranzistorlardan foydalanish kremniyli ESL-ventillarga qaraganda past energiya iste'molida signallari tarqalishi kechikishlarini 10 - 30 psgacha kamayishini ta'minlaydi. Mantiqiy ventillar takt chastotasi bilan qayta ulanadigan konveyer turdagi qurilmalarda MESFET va HEMT tranzistorlarni 1-3 GGsdan yuqori chastotalarda qo'llanishi hatto kremniyli MDYAO'-ventillarga iste'mol quvvatini kamaytiradi.

m -HEMT tranzistorlardagi KIS va O'KISlar imkoniyatlarini chastota bo'lgichlarining xarakteristikalarini bo'yicha baholash mumkin. O'rnatil-

ganki, m -HEMT va HVT texnologiyalari taxminan bir xil xarakteristikalarini ta'minlaydi.

Hozirgi vaqtda $A^{III}V^V$ yarimo'tkazgichli mikroelektron qurilmalar bozori kremniyli qurilmalarga qaraganda jadal sur'atlarda rivojlanmoqda, lekin u asosan o'rta integratsiyalanishli mikroto'lqinli ISlar bilan cheklangan. Bu vaziyat ham dastlabki materialining, ham qurilmalarni ishlab chiqarishning sezilarli yuqoriroq narxiga bog'liq.

Umuman olganda, quyidagi tezis umumiy qoida bo'lib xizmat qilishi mumkin: "kremniyda nima qilish mumkin bo'lsa, kremniyda qilish kerak". Raqamli KIS va O'KISlarning narxi sezilarli darajada yaroqli qurilmalar foizi bilan aniqlanadi, bu esa o'z navbatida dastlabki materialining nuqsonliligi va tranzistorlar bo'sag'aviy kuchlanishlarining texnologik og'ishlari orqali aniqlanadi, u esa kanal uzunligi kamayishi bilan ortadi. Ko'rinib turibdiki, yaqin kelajakda $A^{III}V^V$ birikmalaridagi KIS va O'KISlarning qo'llanishini cheklaydigan bu omil zararsizlantiriladi.

Nazorat savollari

1. Mikroelektron apparaturalardagi ulanishlarning ierarxik darajalarini tushuntiring?
2. Mikrotasmali liniya va uning asosidagi passiv elementlar nima?
3. Ko'chkili va tunnelli diodlar, Gann diodi nima?
4. SHottki to'sig'ili maydon tranzistorlar nima?
5. Qaysi ISlar monolit galliy arseniddan tayyorlanadi?
6. Geteroo'tishning asosiy xususiyatlari nimada?
7. Geteroo'tishda muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning o'ta injeksiyalanishi nima?
8. Giperoo'tishdao'ta injeksiyalanish nimani beradi?
9. Ikki o'lchamli elektron gaz nima?
10. Ikki o'lchamli elektron gaz nimani beradi?
11. Yuqori harakatlanuvchanlik elektronlarli tranzistor nima?
12. Pseudomorfik tuzilmalarning metamorfik tuzilmalardan (p -HET va m -HET) farqi nimada?
13. GaN tagliklaridagi HEMT tranzistorlarning o'ziga xos xususiyati nimada?
14. Geteroo'tishli bipolyar tranzistorlar nima?
15. Geteroo'tishli maydon tranzistorlardagi IMSlar.

4 BOB. NANOELEKTRONIKANING FIZIK-TEXNIK ASOSLARI

4.1. Nanotexnologiyaning asosiy tushunchalari va rivojlanish yo'nalishlari

4.1.1. Nanoelektronikaning asosiy tushunchalari

Hozirgi vaqtda yuqori darajadagi qo'shimcha qiymatga ega bo'lgan bilimlarni talab qiladigan ishlab chiqarish tarmoqlarni rivojlantirishga alohida o'rin ajratilgan. Jahon iqtisodiyotining rivojlanishi va umuman sivilizatsiyasining zamonaviy bosqichida bunday yo'nalish, albatta, nanotexnologiyalar hisoblanadi. Eng kichik fizik moddalar - atomlar va molekular bilan manipulyasiyalar, mutaxassislarning taxminlariga ko'ra, yaqin kelajakda sivilizatsiya uchun misli ko'rilmagan istiqbollarni ochib beradi va insoniyatni o'z faoliyatining barcha sohalarida kelajakda hayot faoliyati ta'minotining kalitiga aylanadi. Yangi texnologiyalar tibbiyot, energetika, biotexnologiya, elektronika va boshqa sohalarni tubdan o'zgartirishi mumkin.

Ko'plab mutaxassislarning fikricha, XXI asr nanotexnika va nanotexnologiyalar asri bo'ladi, ular uning yuzini ham aniqlaydi. Nanotexnologiyalarning hayotga ta'siri umumiy xarakterda bo'lishni, iqtisodiyotni o'zgartirishni va kundalik hayot, ish va ijtimoiy munosabatlarning barcha jabhalariga ta'sir qilishni va'da qilmoqda. Nanoenergetika yangi turdagi dvigatellar, yonilg'i elementlari va transport vositalarini ishlab chiqish orqali dunyoni tozaroq qiladi.

Nanotexnologiyalar va nanomahsulotlarga asoslangan yangi iqtisodiyot shakllanadi, elektron-axborot biznesi nanotexnologik biznesga yetakchi o'rinlarni bo'shatib beradi. Boshqa tomondan, nanotexnologiyalarning rivojlanishi olimlar, muhandislar va texnik xodimlarni tayyorlashning, shuningdek, ishlab chiqarishni tashkil etishning yuqori darajasini talab qiladi. Nanosanoatning jadal rivojlanishi barcha darajalardagi ta'lim tizimini tubdan qayta qurishni talab qiladi.

Nanotexnologiyalarni qo'llanishining eng aktiv rivojlanayotgan sohalaridan biri nanoelektronika hisoblanadi. Bu sohadagi ko'plab yangi inqilobiy yechimlar mikroelektron texnologiyalarning mantiqiy rivojlanishi, ularning aktiv elementlarning nanometrlardagi o'lchamlari diapazoniga o'tishi natijasida paydo bo'ldi. Ammo ko'plab ilmiy natijalar va texnologik yechimlar elektronikaning fan va texnikaning boshqa tarmoq-

lari - kimyo, biologiya, molekulyar fizika bilan birlashishidagi yangi kvant-mexanik yondashuvlar asosida paydo bo'ldi. Qabul qilingan tasniflashga muvofiq ishonchli tarzda nanoelektron qurilmalar toifasiga kiradigan 32 nm ruxsat etishli Intel protsessorlari kabi qator elektron qurilmalar hozirda global miqyosda tarqatilgan. Bu yangi texnologik yechimlarning aksariyati hali sanoatda o'zlashtirishdan yiroqda, chunki ham ishlab chiqarish sohasida, ham bunday qurilmalarni qo'llanishi sohasida tubdan yangi texnologik platformani yaratish uchun vaqt va xarajatlar zarur bo'ladi.

Nanotexnologiyaning rivojlanishi muammolari hozirgi vaqtda zamonaviy fan va texnikaning deyarli barcha sohalarida ustun mavqega ega. Sanoati rivojlangan mamlakatlar erishgan ilmiy-texnik yutuqlar asosida nanotuzilmalashtirishda zaryad, energiya, massa va ma'lumotlarni tashish va taqsimlash jarayonlarining o'ziga xos xususiyatlari bilan aniqlanadigan nanoo'lchamlarga o'tishda moddiy tizimlarning oldin ma'lum bo'lmagan yangi xususiyatlari va funksional imkoniyatlaridan foydalanish yotadi.

Nanotizimlarga kelsak, makro va mikrotizimlarga xos bo'lmagan yangi noan'anaviy xossalar paydo bo'ladigan xarakterli o'lchamlar chegaralari rasman birlardan 100 nmgacha aniqlangan.

Nanomateriallarning o'sha kimyoviy tarkibga ega bo'lgan hajmli materiallarga nisbatan tubdan farq qiladigan ko'plab xususiyatlari nanodonachalar va nanoklasterlar sirt ulushining (grammga yuzlab kvadrat metrgacha) ko'p karrali ortishi samaralariga bog'liq. O'rganilayotgan ob'ektlarning xarakteristik va geometrik o'lchamlarini aniqlaydigan eng ko'p ishlatiladigan qo'shimchalarning ma'nolari yunoncha so'zlar - **mikro - kichik, nano - mittidan** kelib chiqqan. Bu yerda nanotexnologiyalar bilan bog'liq ba'zi ta'riflarni keltiramiz.

Nanomateriallar nanoo'lchamlardagi omillarini namoyon bo'lishi bilan aniqlanadigan materiallarda oldin ma'lum bo'lmagan mexanik, kimyoviy, elektr fizik, optik, issiqlik fizik va boshqa xususiyatlarning vujudga kelishini ta'minlaydigan nanometrik xarakteristik o'lchamlarga ega bo'lgan va fizik yoki kimyoviy o'zaro ta'sirlashishni alohida namoyon etadigan asosiy elementlarning sun'iy yoki tabiiy tartiblangan yoki tartiblanmagan tizimi bo'lgan moddalar va moddalar kompozitsiyasi hisoblanadi.

Nanotexnologiya materiallarni sintezlash, yig'ish, tuzilmaviy va shakl berish, yuritilishi, olinishi va modifikatsiyalanishi usullari va

yo'llari, shu jumladan nanoo'lchamli omillar namoyon etilishiga bog'liq yangi xususiyatlarga ega bo'lgan materiallar va tizimlar yaratishga qaratilgan bilimlar, ko'nikmalar, malakalar, apparaturaviy, materialshunoslik, metrologik tizimlar, jarayonlar va texnologik operatsiyalarning axborot ta'minoti majmui hisoblanadi. Nanotexnologiyani yana atom, molekulyar va nanometrlar darajalarida materiallar va funksional tuzilmalar va qurilmalarni yaratish, tayyorlash, tavsiflash va amalga oshirish fani va texnologiyasi sifatida ta'riflash mumkin.

Nanotexnika nanoo'lchamlarga o'tishda tizimlarning yangi xususiyatlari va funksional imkoniyatlari yordamida yaratilgan va oldin erishib bo'lmaydigan vazn-hajm va energetik parametrlari texnik-iqtisodiy parametrlar va funksional imkoniyatlariga ega bo'lgan mashinalar, mexanizmlar, qurilmalar, materiallar hisoblanadi.

Nanoelektronika elementlarning 100 nm dan kichik bo'lgan xarakterli topologik o'lchamlariga ega bo'lgan integral elektron sxemalarni yaratish uchun fizik va texnologik asoslarni ishlab chiqish bilan shug'ullanadigan elektronika sohasi hisoblanadi.

Nanoelektronikaning asosiy vazifalari quyidagilardan iborat:

- nanometrlardagi o'lchamli, birinchi navbatda kvantli aktiv qurilmalarning ishlashining fizik asoslarini ishlab chiqish;
- texnologik jarayonlarning fizik asoslarini ishlab chiqish;
- qurilmalarning o'zi va ularni ishlab chiqarish texnologiyalarini ishlab chiqish;
- nanometrli texnologik o'lchamlar va nanoelektron elementlar bazasiga ega bo'lgan integral sxemalarni ishlab chiqish.

Nanoelektronikaning maqsadi makroskopik xossalardan kuchli farq qiladigan nanoo'lchamli elementlarning xususiyatlaridan foydalanish bilan ma'lumotlarga ishlov berish, ularni uzatish va saqlashdan iborat. Nanoo'lchamlarda elektronni tashish mexanizmini va nanoqurilmalarni simulyasiyalash imkoniyatini tushunish tubdan yangi model-lashtirish usullarini talab qiladi.

Nanoelektronika an'anaviy yarimo'tkazgichli texnologiyalarning barchasini bo'lmasada, ko'pini almashtirish uchun yetarli potensialga ega. Harakatlanishi turli tuzilmalarda signallarga ishlov berish va hisoblash zamonaviy prinsiplariga asoslangan elektronlardan voz kechish "elektronika" atamasining o'zidan voz kechishga olib kelishi mumkin; fotonlar elektronga muqobil bo'lishi mumkin.

Molekulyar elektronika. Ko'pgina mutaxassislar tomonidan molekulyar elektronika kremniy elektronikasiga haqiqiy muqobil deb qaraladi. Hozirgi vaqtda fundamental bilimlar va nanotexnologiyalar axborot texnologiyalari va mikrorobototexnika uchun zarur bo'ladigan deyarli barcha tuzilmalarni yaratishning prinsipial imkoniyatlarini ko'rsatish uchun yetarli hisoblanadi. Qator xorijiy kompaniyalar molekulyar nanoelektron komponentlar bazasini ishlab chiqish strategiyasi mavjudligini e'lon qilishdi. Molekulyar elektronika biologik ob'ektlar va biojarayonlar bilan molekulyar va hujayra darajasida shug'ullanadigan va ekologiya, tibbiyot, qishloq xo'jaligi, milliy mudofaa va xavfsizlikning ko'plab muammolarini yechishga yordam beradigan nanobiotexnologiyaning tarkibiy qismi hisoblanadi.

4.1.2. Nanotexnologiyalarning rivojlanish yo'nalishlari

Nanotexnologiyaning rivojlanishidagi asosiy kashfiyotlar XX asrning so'nggi yarmida mikro va nano-ob'ektlarning kvant xususiyatlarining ochilishi, yarimo'tkazgichli tranzistorlar va lazerlarning ishlab chiqilishi, atomli ruxsat etishli diagnostika qilish usullarini (elektron va skanerlash tunnelli mikroskopiya) yaratilishi, fullerenlarning kashf qilinishi, genomika va biotexnologiyalarning rivojlanishi bo'ldi.

Nanotexnologiyalar XXI asrning yetakchi jahon davlatlarini texnologik rivojlanishining eng muhim yo'nalishiga aylandi. Bu mutlaqo yangi texnologiyalar mahsulotlarning xususiyatlarini sezilarli yaxshilash va o'lchamlarini minimallashtirish yo'lida boshqa tarmoqlarning rivojlanishiga kuchli turtki beradi.

“Nanotexnologiya” atamasi deganda nimani tushunish kerak. Nanotexnologiyaning juda farqlanadigan va noaniq ta'riflari mavjud. Ma'lumki, eng umumiy va eng oddiy tushunchalarni ta'rif bilan berish qiyinroq. Shu sababli, hanuzgacha nanotexnologiyaning aniq, umumiy qabul qilingan va barcha jihatlarini qamrab oladigan ma'lumotlar yo'q. Ba'zi mualliflarning aytishicha, nanotexnologiya yangi falsafa va tabiiy fanlar, muhandislik faoliyati va ishlab chiqarishni tashkil etishga yangisha yondashuv hisoblanadi. Nanofanlar va nanoishlab chiqarishni farqlanadi. Nanotexnologiya mavzusini aniqlash uchun oddiyroq, masalan, lingvistik yondashuv ham bo'lishi mumkin

Qadimgi yunon tilidan "texnologiya" atamasi "hunarmandchilik fani" sifatida tarjima qilingan va "nano" zarrachasi juda kichik narsani,

masalan, "mittini" anglatadi va an'anaviy ravishda bu atama ilmiy terminologiyada mos o'lchov birligining milliarddan bir qismini (masalan, nanometr, nanosaniya, nanofarad va boshqalarni) bildirish uchun ishlatiladi. Shuning uchun nanotexnologiyani funksional elementlar va ulardan yig'ilgan tizimlarni, shuningdek, alohida tuzilmaviy komponentlarining molekulyar o'lchamlarga, ya'ni nanometrning ulushlaridan o'nlab yoki ba'zi hollarda yuz-ikki yuz nanometrlargacha o'lchamlarga tenglashadigan o'lchamlardagi nanomateriallarni olish usullari sifatida aniqlaymiz.

Taqqoslash uchun shuni ta'kidlash mumkinki, 100 nm inson sochini 1/800 yoki qizil qon tanachasi (hujayra) diametrining 1/70 qismiga to'g'ri keladi. Dezoksiribonuklein kislotasi (DNK) spirali taxminan 2 nm diametrga ega. Moddaning atomlari nanometrning ulushiga teng o'lchamlarga ega. Masalan, oltin atomi 1/3 nm, vodorod atomi 1/10 nm o'lchamga ega.

Nanotexnika va nanotexnologiya bu juda kichik nanoasboblarda kechadigan jarayonlar, vizuallashtirish va o'lchash, jarayonlarni kompyuterda modellashtirish, alohida atomlar yoki molekullarni nazorat qilish va boshqarish, shuningdek, ishlab chiqarishda nanoo'lchamli komponentlar va tizimlardan foydalanishni hisobga olish bilan shug'ullanadi.

Bu faoliyat doirasiga kamida bitta koordinata bo'ylab nanometrlardagi o'lchamli ob'ektlar kiradi. Aslida, nanotexnologiya ob'ektlarining diapazoni ancha kengroq - alohida atomlardan tortib ularning konglomeratlarigacha va bir yoki ikki o'lchovlarda 1 mkmdan ancha katta o'lchamli organik molekullargachani tashkil etadi. Ularning son-sanoqsiz atomlardan tashkil topganligi juda muhim va shuning uchun ularda endi moddalarning diskret atom-molekulyar tuzilmasi yoki uning o'zini tutishi kvant qonuniyatlari sezilarli namoyon bo'ladi. Bunday ob'ektlar nafaqat mahsulotlarning o'lchamlarini kamaytirishga, ularning moddiy sarfini va energiya sarfini kamaytirishga, balki jarayonlarning xarakterli kechish vaqtini sezilarli darajada qisqartirishga, ya'ni tezkorlikni oshirishga imkon beradi. Hozirgi vaqtda turkum ishlab chiqariladigan kompyuterlarda bitta elementar operatsiyaga taxminan 0,1 ns tezlikka erishildi, nanotuzilmalar uni bir necha tartiblarga kamaytirishi mumkin. Ammo mavjud ommaviy ishlab chiqarish texnologiyalari amalda o'z nazariy chegaralariga yetdi va tubdan yangilanishi kerak.

Mutaxassislarning fikricha, hozirgi vaqtda yuzaga kelgan vaziyat ko'p jihatdan kompyuter inqilobidan oldingi holatga o'xshaydi, lekin

nanotexnologik inqilobning oqibatlarini yanada kengroq va chuqurroq bo'ladi. So'nggi bir necha yil ichida turli xil konstruksion va funksional maqsadlardagi yuzlab nanomahsulotlar ishlab chiqildi va ularni tayyorlash va turkum ishlab chiqarishning o'nlab usullari joriy etildi.

Nanotexnologiyalarning zamonaviy qo'llanishlariga quyidagilar kiradi:

- yuqori mustahkam nanokristalli va amorf materiallarni, yonmaydigan polimer asosli nanokompozitlarni yaratish;

- nanoelektronika va nanofotonika elementlari, yarimo'tkazgichli tranzistorlar va lazerlar, fotodetektorlar, quyosh elementlari, sensorlar va boshqalar, keyingi avlod mikroelektronika va optotronicsining yuqori qatlamli va geterotuzilmaviy komponentlari, yumshoq magnitli va qattiq magnitli materiallar;

- ma'lumotlarni o'ta zich yozish qurilmalari; telekommunikatsiya, axborot va hisoblash texnologiyalari, superkompyuterlar; tekis ekranlar, videoproektorlar va kompyuter monitorlari;

- molekulyar elektron qurilmalar, shu jumladan molekulyar darajadagi qayta ulagichlar va elektron sxemalar;

- nanolitografiya va nanoimprinting;

- mikro- va nanomehanika qurilmalari, shu jumladan aktuatorlar va transduktorlar, molekulyar motorlar va nanomotorlar, nanorobotlar, integratsiyalangan mikroelektromexanika qurilmalari;

- nanokimyoy va kataliz, shu jumladan yonishni boshqarish, qoplamalarni qoplash, elektr kimyo, kimyo va neft-kimyo sanoati uchun nanog'ovak materiallar (katalizatorlar, adsorbentlar, molekulyar filtrlar va separatorlar);

- yonilg'ich elementlari, elektr akkumulyatorlari va boshqa energiya o'zgartirgichlari, energiyani saqlash qurilmalari;

- farmatsevtika, dorilar va oqsillarni maqsadli yetkazib berish, biopolimerlar va biologik to'qimalarni davolash, klinik va tibbiy diagnostika, sun'iy mushaklar, suyaklar yaratish, tirik organlarni almashtirish; kanserogen to'qimalarni, patogenlarni, transplantatsiya uchun biologik mos to'qimalarni, dori-darmonlarni va boshqalarni ro'yxatga olish va aniqlash.

Nanotexnologiyani rivojlantirish dasturlari. Davlat tashkilotlarining hisobotlariga ko'ra, nanotexnologiya sohasidagi ilmiy-tadqiqot ishlariga global sarmoyalar oxirgi 10 yil ichida 25-30 barobar oshgan. 2015 yilda nanomateriallar va nanotexnologiyalarning jahon bozori 2

trillion AQSH dollaridan oshdi. Shu bilan birga, Rossiyaning nanotexnologiyalar mahsulotlari bozori 900 milliard rublga baholanmoqda. Xorijiy davlatlarning nanotexnologiyani rivojlantirishga boʻlgan qiziqishini hozirgi vaqtda 50 dan ortiq yetakchi davlatlar bu boradagi davlat dasturlarini amalga oshirayotgani tasdiqlaydi [3, 6].

Yaponiyada 1999 yildan buyon eng yuqori davlat ustuvorligiga ega boʻlgan Nanotexnologiyalar boʻyicha milliy dastur ishlayapti. Nanotexnologiya sohasidagi bosh tashkilot - Milliy materialshunoslik instituti hisoblanadi. Yaponiya nanotexnologiyalarni rivojlantirish strategiyasi-ning xususiyatlari quyidagilarni oʻz ichiga oladi:

- rejalashtirish va davlatning markazlashgan qoʻllab-quvvatlashi;
- nanomateriallardan foydalanishga yoʻnaltirish;
- asosiy maqsad - "tabiat bilan uygʻun jamiyatini yaratish";
- nanotexnologiyadagi tadqiqotlar va ishlanmalarni korporativ moliyalashtirishning byudjetdan ortiq boʻlishi;
- nanotexnologiya sohasidagi tadqiqot natijalaridan tijoratlashtirishga oʻtish barqaror yoʻnalishi.

Amerika Qoʻshma Shtatlarida 2000 yildan beri faqat fundamental tadqiqotlarni moliyalashtirish hajmi yiliga ikki barobar oshmoqda. Hukumat qarori bilan nanotexnologiyalar boʻyicha ishlar eng ustuvor vazifaga aylandi va 2004 yilga kelib "Nanotexnologiyalar milliy tashabbusi" (NNI) dasturi ishlab chiqildi, 12 ta yirik sanoat sohasida va harbiy muassasalarda nanotexnologiyalar boʻyicha ishlarni muvofiqlashtirish boʻyicha prezident huzurida maxsus qoʻmita tashkil etildi. 2004 yildan boshlab, keyingi toʻrt yil mobaynida nanotexnologiyalar sohasidagi tadqiqotlar va ishlanmalar uchun ajratilgan mablagʻ yiliga 3,7 milliard dollarni tashkil etdi. Yevropa Ittifoqida (EI) nanotexnologiyalarni tadqiq qilish va ishlanmalar Evropa Ittifoqi va alohida davlatlar byudjetlari hisobidan moliyalashtiriladi. Evropa Ittifoqi mamlakatlari orasida bu sohada Germaniya, Fransiya va Buyuk Britaniya yetakchi hisoblanadi. 2004 yilda rivojlangan infratuzilma, nanoindustriya uchun kadrlar tayyorlash tizimi, innovatsion korxonalar uchun imtiyozlar tizimini shakllantirish va boshqalarni nazarda tutuvchi nanotexnologiyalarni rivojlantirish Yevropa strategiyasi qabul qilindi. 2005 yilda Evropa Ittifoqining raqobatbardoshlik kengashi harakat rejasini ishlab chiqdi (Nanoscience and Nanotechnology: An Action Plan for Europe), hozirda u amalga oshirilmoqda.

Soʻnggi yillarda Xitoy tez nanotexnologiya sohasida yetakchi sifa-

tida paydo bo'la boshladi. 2001-2005 yillarga mo'ljallangan besh yillik rejada XXR hukumati nanotexnikani rivojlantirish uchun 300 million dollar ajratdi. Hozirgi vaqtda bu sohadagi qator ishlanmalar bo'yicha Xitoy jahon darajasiga yaqinlashdi yoki unga yetdi.

Rossiyaning turli kanallar bo'yicha nanomateriallar va nanotexnologiyalar sohasidagi ishlarni qo'llab-quvvatlash va rivojlantirishga sarflangan xarajatlari bir necha o'n millionlab AQSH dollarini tashkil etadi, bu esa rivojlangan mamlakatlar xarajatlaridan ancha past. Nanotexnologiya va nanoindustriya sohasidagi yirik loyihalarni amalga oshirish maqsadida 2008 yilda "Rossiya nanotexnologiyalar korporatsiyasi" davlat korporatsiyasi (hozirda "Rusnano" AJ) tashkil etilgan. Korporatsiyaning asosiy vazifalari - nanoindustriyadagi ishlanmalarni tijoratlashtirishni ta'minlash va nanoindustriyada innovatsion faoliyatni muvofiqlashtirish hisoblanadi. Korporatsiya bu masalani muhim iqtisodiy yoki ijtimoiy salohiyatga ega nanotexnologiyalar loyihalariga ham muallif sifatida qatnashish orqali yechadi.

O'zbekistonda nanotexnologiyalar bo'yicha davlat ustuvorligiga ega bo'lgan milliy dastur mavjud. Nanotexnologiya sohasidagi bosh tashkilot - Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti hisoblanadi. O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining O'zbekiston Respublikasi Prezidenti farmonini bajarish uchun Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti nanotexnologiyalarini rivojlantirish markazini tashkil etish to'g'risidagi qarori asosida 2017 yil 1 noyabrdagi PQ-3365-son "Ilmiy-tadqiqot institutlarining infratuzilmasini yanada mustahkamlash va innovatsion faoliyatni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida", shuningdek, nanotexnologiya sohasidagi ilmiy tadqiqotlarni yanada takomillashtirish maqsadida "Nanotexnologiyalarning rivojlantirish markazi" ochildi, bu yerda umumiy foydalanish uchun laboratoriya tashkil etish rejalashtirilgan. O'zMU fizika fakultetida ishlaydigan fizika-matematika fanlari doktori, akademik Komil Muqimovning so'zlariga ko'ra, yangi markaz nanotexnologiyalarni rivojlantirish va O'zbekistonda nanoindustriya yaratish uchun ilmiy-tadqiqot institutlarining ilmiy salohiyatini birlashtirishi kerak.

Markazni zarur uskunalar bilan jihozlash uchun 1,3 million dollar miqdorida mablag' ajratilgan. Markazda tashkiliy-tahliliy bo'lim ishlaydi, uning vazifalariga nanotexnologiyalarning rivojlanishidagi zamonaviy jahon yo'nalishlarini tahlil qilish, sanoatning turli sohalarida ishlab chiqilishi, o'zlashtirilishi va joriy etilishi mumkin bo'lgan materiallar va

texnologiyalarni aniqlash, shuningdek, ishlanmalarni joriy etish uchun korxonalar bilan ishlashni tashkil etish kiradi.

4.2. Mikroelektronikaning rivojlanish yo‘nalishlari va cheklovlari

4.2.1. Texnologik cheklovlar: Mur qonuni

Eng keng tarqalish va texnik taraqqiyotga ta’sirga yarimo‘tkazgichli nanoo‘lchamlardagi qurilmalar ega. Ko‘pincha "Nanoelektronika" ta’rifiga faqat yarimo‘tkazgichli nanoelektronika kiritiladi.

Kremniyli mikroelektronika sanoat sifatida taxminan 60 yil oldin paydo bo‘lgan. 1965 yilda (integral mikrosxem ixtiro qilinganidan olti yil o‘tgach) Intel asoschilaridan biri Gordon Mur (4.1-rasm) har yili integral mikrosxemalardagi tranzistorlar soni taxminan ikki barobarga ko‘payadigan qonuniyatni aniqladi. Bu kuzatuv **Mur qonuni** nomini oldi.



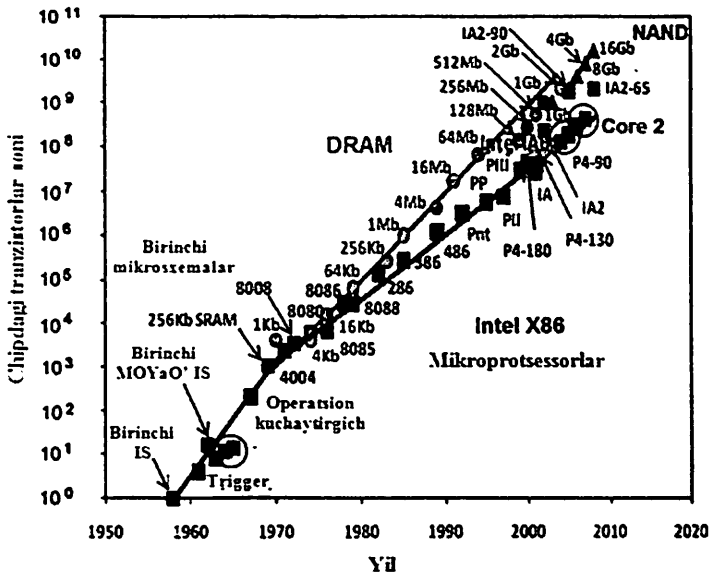
4.1-rasm. Kremniy plastinasi bilan Gordon Mur

Bu vaqt mobaynida mikroelektronika texnologiyalari Mur qonuniga muvofiq rivojlanmoqda, ya’ni har 2,5 yilda mikrosxemalar elementlarining minimal o‘lchamlari 2 barobar kamayadi, shu davrda kristalldagi elementlar soni esa ikki barobar oshadi. 1975 yilda Gordon Mur o‘z qonuniga tuzatishlar kiritdi, unga muvofiq har ikki yilda tranzistorlar sonining ikki baravar ortishi kuzatiladi.

XXI asrda eksponensial o‘shish ham ishlab chiqarish maydonlarining narxida, ham ularning unumdorligida davom etmoqda. Mikrosxemalardagi elementlarning o‘lchamlari nanometrlarga kamaydi. Faqat yirik

IDM-kompaniyalar (Integrated Device Manufacturers) mustaqil ravishda ishlab chiqarish maydonlarini qurishi va ulardan to'liq foydalanishlari mumkin. Bugungi kunda faqat Intel kompaniyasini shunday ro'yxatga kiritish mumkin. Qolgan IDM-ishlab chiqaruvchilar ilmiy-ishlab chiqarish birlashmalari tarkibida yangi texnologiyalarni o'zlashtirishmoqda.

Masalan, STI (Sony, Toshiba, IBM, Chartered, AMD) konsorsiumi elementlarning o'lchamlari 45 va 32 nm bo'lgan mikrosxemalarni ishlab chiqarish uchun umumiy ishlab chiqarish ob'yektini yaratdi. Crolles 2 Alliance (STM, NXP Semiconductors, Freescale Semiconductors, TSMC va boshqalar) konsorsiumi TSMC kremniy fabrikasida yangi texnologiyalarni ishlab chiqishni birgalikda moliyalashtiradi. Yaqin istiqbolda nanometrlardagi mikrosxemalarni mustaqil ishlab chiqaruvchilar soni bitta Intel kompaniyasigacha kamayadi (4.2-rasm).



4.2-rasm. Mur qonunining grafigi

Texnologik uskunalarning unumdorligi va ularning narxi ham tobora oshib bordi va Yujin Meyeran 1998 yilda unchalik mashhur bo'lmagan "Murning ikkinchi qonuni"ni ishlab chiqdi, unga muvofiq, mikrosxemalar ishlab chiqarish bo'yicha fabrikalarning narxi ishlab chiqarilayotgan mikrosxemalar murakkablashishi bilan esponensial oshadi. Shunday qilib, Intel kompaniyasining 1 Kbit sig'imli dinamik xotira mikrosxemasini ishlab chiqarish zavodining narxi 4 million AQSH dollarini

tashkil etadi, 5,6 millionta tranzistorli 0,6 mikrometrli texnologiya bo'yicha Pentium mikroprotessorini ishlab chiqarish uskunalari 2 milliard dollarga tushdi. 45 nm texnologik jarayon asosidagi protsessorlarni ishlab chiqarishi bo'yicha zavodning narxi 3 milliard dollarni tashkil etdi.

Kvant va kogerent samaralar, ko'chkili teshilishiga olib keladigan kuchli elektr maydonlari, zich joylashgan tuzilmalardan issiqlikni ajratish muammosi va nuqtaviy nuqsonlarining ta'siri – bularning barchasi o'lchamlarni kichraytirishga jiddiy to'sqinlik qiladi. Ta'kidlaymizki, agar tranzistor zatvorining o'lchami 100 nanometrlardan kichik bo'lsa, u holda bu hali nanoelektronikani amalga oshirish va o'lchamlarni kamaytirishga bog'liq sifat jihatidan yangi fizik xususiyatlardan foydalanishni anglatmaydi.

O'tgan asrning 80-yillari oxirida yarimo'tkazgichlarni ishlab chiqarishning o'sish sur'atlari sekinlashdi va Amerika Qo'shma Shtatlaridagi yetakchi mikroshemalarni ishlab chiqaruvchilar birlashdi va AQSH hukumati tomonidan qo'llab-quvvatlandi va 1990 yildan 1999 yilgacha faoliyat ko'rsatgan "Yarimo'tkazgichlar sanoati uchun milliy yo'nalish xaritasi" (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS) nomini olgan mikroelektronika texnologiyalarini rivojlantirish bo'yicha yagona o'n yillik dasturni ishlab chiqdi.

Yarimo'tkazgichli texnologiyalarning keyingi rivojlanish sur'atini saqlab qolish, hatto AQSH iqtisodiyoti uchun ham og'ir yuk bo'lib qoldi va yangi rivojlanish dasturi xalqaro dastur bo'ldi, unga dunyoning barcha yetakchi yarimo'tkazgichlar kompaniyalari qo'shildi. Dastur "Yarimo'tkazgichlar sanoati uchun xalqaro yo'nalish xaritasi" (National Technology Roadmap for Semiconductors) nomini oldi. Birinchi nashr 15 yil davomida ishlab chiqilgan (2000-2014 yillar). Har ikki yilda yangi nashr chiqariladi, u 15 yil davomida mikroelektronikaning rivojlanish bosqishlarini belgilaydi. Nashrlarni chiqishi orasida ITRSGa to'ldirishlar chiqariladi. Xalqaro dastur direktiv hujjat emas, balki yetakchi mutaxassislar va ekspertlar tomonidan tayyorlangan malakali bashorat hisoblanadi. Texnologik chegaralardan tashqari, SAPR imkoniyatlari va loyihalash usullari, mikroshemalarni nazorat qilish usullari, ishlab chiqarishni tashkil etish va biznes modellari ko'rib chiqiladi.

Yaqin kelajakka kelsak, yarimo'tkazgichlar sanoati o'z pozitsiyalaridan voz kechmoqchi emas. An'anaviy texnologiyalar iqtisodiy va texnologik resurslarini tugatmaguncha uzoq vaqt mavjud bo'ladi. Shunga

qaramay, nanoelektronika sohasidagi tadqiqotlarning tezlashishi molekulyar fizika, fizik kimyo, optika kabi ko‘plab bog‘liq sohalarda yuksalishni talab qiladi. Bu borada murakkab ko‘p zarrachali va ko‘p elementli kvant-mexanik tizimlarning matematik va kompyuterda modellashtirish usullarini ishlab chiqish alohida ahamiyatga ega.

4.2.2. Nanoelektronika qonunlari bo‘yicha mikroelektron modellarning chegaralanishi

Yarimo‘tkazgichli qurilmalarning an’anaviy modellari elektronlar va kovaklarni klassik zarrachalar sifatida ifodalaydi. Biroq, qurilmalarning o‘lchamlari nanometrlarga kichraytirilganda qurilma va material orasidagi chegara xiralashadi. Nanoqurilmalar asosida yotadigan material tuzilmasining kvant-mexanik samaralari qurilmani o‘zining xarakteristikalaridan ustunlik qila boshlaydi. **O‘lchamlar va kvant-mexanik samaralarga bog‘liq bo‘lgan mikroelektron modellarning cheklavlarini ko‘rib chiqamiz.**

Statistik cheklavlar. Berilgan hajmdagi zarrachalar sonining nisbiy statistik tebranishi $\delta = \frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$ formula bilan aniqlanadi.

MDYAO‘ tranzistor kanalida (yoki bipolyar tranzistor bazasida) kengligi 1 mkm, uzunligi 0,2 mkm va balandligi 0,2 mkm, legirlash darajasi 10^{16} sm^3 bo‘lgan $V = 4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^3$ hajmda aralashmaning $\bar{N}=100$ ta atomlari bo‘ladi. Tranzistorni bir holatdan boshqa holatga o‘tkazish uchun zarur bo‘ladigan zaryad 10^{-18} Kl ni, ya’ni 4% dispersiyali taxminan 600 ta elektronlarni tashkil etadi. Sekundiga 10^9 ta qayta ulanishlarda elektronlarning o‘rtacha sonidan statistik og‘ish ehtimoli yuqori, bu qayta ulanish uchun yetarli bo‘lmaydi. Natijada, nanoo‘lchamli elementlarda fluktuatsion buzilishlar vujudga keladi.

Quvvat zichligi bo‘yicha cheklavlar. Zamonaviy radioelektron apparaturalar va kompyuter texnologiyalarining asosini KMDYAO‘ mantiqiy elementlardagi (ME) bo‘yicha mikrokontrollerlar va mikroprotsessorlar tashkil qiladi. KMDYAO‘ ME iste’mol qiladigan quvvat, f qayta ulanish chastotasi va S_{yu} yuklama sig‘imiga proporsional bo‘ladi:

$$P = S_{yu} \cdot f \cdot U^2 \quad (4.1)$$

bu yerda U - ME ta’inot manbai kuchlanishi.

MEning yuklama sig'imi 10^{-15} F darajasida va 10^9 Gs qayta ulanish chastotasida 5 V kuchlanishda bitta MEga to'g'ri keladigan quvvat 25 mVtni tashkil qiladi. Zamonaviy mikroprotsektorlarning chipida $10^7 - 10^8$ MELar joylashadi va protsektor ishlashida sochiladigan quvvat 80 - 100 Vtni tashkil qiladi.

Bugungi kunda yarimo'tkazgichli chipdan erishiladigan issiqlik ajralishi darajasi taxminan 400 Vt/sm^2 ni tashkil qiladi. MELarning xato ishlashi ehtimolini maqbul darajaga tushirish uchun, U ta'minot kuchlanishi issiqlik potensialidan ancha katta bo'lishi kerak. Xona haroratida baholash uchun $U \approx 0,5 \text{ V}$ olinadi. Chipda tranzistorning 100 nm o'lchamida qayta ulanish chastotasi 40 GGs bo'ladi.

Topologik cheklovlar

Kichik o'lchamdagi tuzilmalarda sirdagi atomlar soni hajmdagi atomlar soniga tenglashadi. Nanoo'bekt chegaralarining elektronlarning o'zini tutishiga ta'sirini e'tiborsiz qoldirib bo'lmaydi. Sirdagi atomlararo masofa a bo'lgan $l = m \cdot a$ qirrali kubda $N_V = (m - 1)$ hajmda $N_S = 3m \cdot (m - 1)$ atomlar bo'ladi. Bu sonlarning nisbati $m = 5$ bo'lganda 1 ga yaqin bo'ladi. Lekin hatto $m = 30$ bo'lganda, ya'ni $l = 3$ nmda nanokub sirtidagi atomlar soni taxminan 10%ni tashkil qiladi. Bunday nanoo'bektidagi to'lqin vektorlari va energetik holatlarning spektrini hisoblash uchun Bloxov yaqinlashuvi katta xatoliklarga olib keladi.

Kvant-mexanik cheklovlar

Nanoelektron elementlardagi asosiy kvant-mexanik cheklovlar energetik sathlarni kvantlash, to'siqlar orqali elektron tunnellar va to'lqin funksiyalarning interferensiyalari samaralaridan kelib chiqadi va ular orqali aniqlanadi.

Bu samaralarni baholash uchun nanoo'lchamli kanalli maydoniy tranzistorni ko'rib chiqamiz. Stok va istok orasida U kuchlanish qo'yilgan bo'lib, u elektronlar uchun potensial to'siq hosil qiladi. Kvant mexanikasidan ma'lumki, tunnel diodi potensial to'siqning kengligi va balandligi orqali aniqlanadi va to'rtburchakli to'siq uchun quyidagi formula bilan tavsiflanadi.

$$I_T \sim \exp[-2(2mU/\hbar W^2)^{1/2}] \quad (4.2)$$

Metall-yarimo'tkazgich tizimida oqib o'tadigan termoemisson tok quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$I_{TE} \sim \exp(-U/kT) \quad (4.3)$$

$W = (\hbar^2 U/8mkT)^{1/2}$ bo'lganda tunnel va termoemission tok $I_T \approx I_{TE}$ b tenglashadi. Baholashlar shuni ko'rsatadiki, $U/kT = 20$ va $I_T \approx 10^{-9}$ A/mkm bo'lganda, tunnel va termoemission toklar tranzistor kanalining $L_K < 12$ nm uzunligida ham tenglashadi.

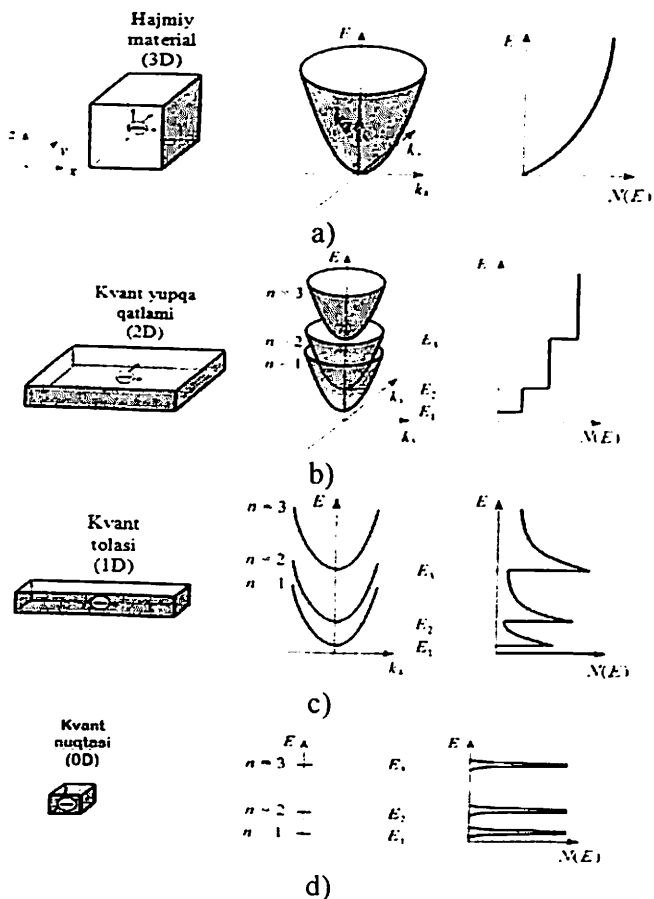
4.3. Kichik o'lchamli tuzilmalar va kichik o'lchamli ob'ektlardagi elektronlarning energetik spektri

4.3.1. Kichik o'lchamli tuzilmalar

Kichik o'lchamli tuzilmalar deb kamida bitta o'lchamli yoki nolga yaqin o'lchamli tuzilmalarga aytiladi. Shunga ko'ra, ikki o'lchamli, bir o'lchamli va nol o'lchamli tuzilmalarga ajratiladi. Bu ta'rif, albatta, shartli xarakterga ega, chunki real fizik dunyo uch o'lchamli ob'ektlardan iborat. Masalan, atomlardan tuzilgan tekislikning (monoatom qavatning) qalinligi nolga teng emas, balki bitta atomning diametriga teng, bu $\sim 10^{-10}$ mni tashkil qiladi.

Tushunish kerakki, ikki o'lchamli, bir o'lchamli va nol o'lchamli tuzilmalar qat'iy geometrik ma'noda bunday emas, lekin ularning o'lchamlari bir, ikki yoki uch yo'nalishlarda ma'lum "chegaraviy" qiymatdan kichik bo'lganligi uchun shunday nomlanadi, chegaraviy" qiymatdan kichik qiymatlarda bu yo'nalishlardagi tuzilmaning fizik xususiyatlari bu tuzilma tayyorlangan materialning hajmiy (uch o'lchamli) xususiyatlaridan sezilarli farq qiladi. Nanotuzilmalar uchun bunday "chegaraviy" qiymat elektronning de Broyl to'lqin uzunligi hisoblanadi, u kattaligi bo'yicha bir necha nanometrlarni tashkil qiladi. Kichik o'lchamli tizimlarda erkin zaryad tashuvchilar de Broyl to'lqin uzunligi tartibidagi o'lchamli sohadagi koordinatalarning bir, ikki yoki uch yo'nalishlarida lokallashtirilgan. Bunda yuqorida aytib o'tilganidek, elektron tizimning fundamental xarakteristikasi - uning energetik spektrida o'zgarishlar bo'lib o'tadi. Spektr harakat cheklangan koordinata bo'ylab harakatlanish uchun diskret bo'lib qoladi. Ruksat etilgan holatlar energiyasini diskretligiga olib keladigan elektronlarning (kovaklarning) kichik o'lchamli tuzilmasidagi harakatini cheklanganligi (ularning kvant-to'lqin tabiati tufayli) kvant cheklovlari deyiladi.

Kvant cheklovlari samarasi bo'lmaydigan yo'nalishlar soni kichik o'lchamli tuzilmalarni uchta guruhlar - kvant yupqa qatlamlari (chuqurchalari), kvant tolalari (iplari, simlari) va kvant nuqtalari bo'yicha tasniflash uchun mezon sifatida ishlatiladi, ular sxematik tarzda 4.3-rasmda tasvirlangan.



4.3-rasm. Elementar kichik o'lchamli tuzilmalar va ularning uch o'lchamli tuzilmalarga taqqoslaganda energetik diagrammalari va $N(E)$ holatlarning zichliklari: a) uch o'lchamli (3D) tuzilma; b) ikki o'lchamli (2D) tuzilma; c) bir o'lchamli (1D) tuzilma; d) nol o'lchamli (0D) ob'ekt

Kvant chuqurchasi - d qalinligi zaryad tashuvchilar uchun de Broyl to'liq uzunligi ($d \sim \lambda$) bilan tenglashadigan kristallning yupqa qatlami

kvant cheklovlari faqat bir yoʻnalishda qatlamga z - perpendikulyar taʼsir qiladigan ikki oʻlchamli (2D) tuzilma hisoblanadi (4.3b-rasm). Kvant yupqa qatlamlaridagi elektronlar ikki oʻlchamli (yoki 2D) elektron gaz deyiladi. Kvant yupqa qatlamlaridagi zaryad tashuvchilar xy tekislikda erkin harakatlanishi mumkin, ularning z oʻqi yoʻnalishi boʻyicha harakati d segment bilan cheklangan. Z oʻqi yoʻnalishi boʻyicha harakatlanish bilan elektron qatlamni tark eta olmaydi, chunki uning issiqlik harakati energiyasi (xona haroratida $\sim 0,026$ eV) u qoʻshni hududlarga kira oladigan energiyadan ancha kichik boʻladi (\sim bir necha eV). Shuning uchun elektronning z yoʻnalishidagi harakatiga d kenglikdagi bir oʻlchamli cheksiz chuqur toʻrtburchakli chuqurchadagi harakatlanig sifatida qarash mumkin.

Kvant tolasi (simi) bitta oʻlchamli (1D) tuzilma boʻlib, u bitta emas, balki ikkita nanometrli oʻlchamga ega va zaryad tashuvchilar faqat sim oʻqi - x oʻqi boʻylab erkin harakatlanishi mumkin. Elektronlarning u va z oʻqlari boʻylab harakatlanishi b va d oʻlchamlar bilan cheklangan va x oʻqi boʻylab cheklanmagan (4.3c-rasm). Kvant tolasining kesimi 4.3c-rasmda tasvirlanganidan farq qilishi mumkin. Kvant tolasidagi erkin elektronlar potensial chuqurchasi ikki oʻlchamli hisoblanadi. **Kvant nuqtasi** nol oʻlchamli (0D) obʼyekt hisoblanadi. Bunday tuzilmada zaryad tashuvchilarning harakati d , b , a oʻlchamli barcha uchta yoʻnalishlarda cheklangan (4.3d-rasm). Kvant nuqtasining shakli kubik shakldan farq qilishi mumkin. Kvant nuqtasi uchun potensial chuqurcha uch oʻlchamli va izolyasiyalangan atom uchun potensial chuqurchaqa oʻxshaydi. Shu munosabat bilan, kvant nuqtalar baʼzan “sunʼiy atomlar” deyiladi.

4.3.2. Kichik oʻlchamli obʼyektlardagi elektronlarning energetik spektri

Elektronlarning energetik spektri va kvant holatlarining zichligi obʼyektning elektron xususiyatlarini va turli qurilmalarda qoʻllanishi imkoniyatlarini aniqlaydigan uning eng muhim xarakteristikalari hisoblanadi.

Energetik spektr berilgan sharoitlarda zarrachalarning boʻlish mumkin E energiyasi qiymatlari toʻplami hisoblanadi. Agar energiya kvantlangan boʻlsa, u holda energetik spektr diskret (kvant) spektr deyiladi.

ladi; agar u uzluksiz qiymatlarni qabul qila olsa, spektr uzluksiz (uzluksiz) spektr deyiladi.

Elektron tizimning eng muhim xarakteristikasi, uning dispersiya qonuni bilan bir qatorda, $g(E)$ holatlar zichligi, ya'ni energiyaning birlik intervaliga keltirilgan hajm, maydon yoki uzunlik birligidagi elektronlarning kvant holatlarining soni (ob'yektning o'lchamiga qarab) hisoblanadi:

$$g(E) = \frac{dN(E)}{dE} \quad (4.4)$$

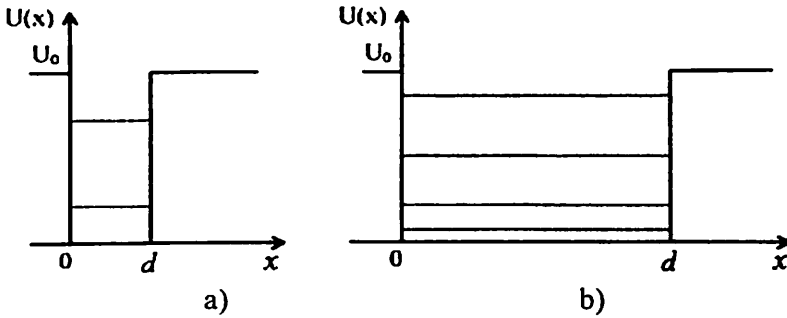
bu yerda $dN(E)$ - E dan $E + dE$ gacha bo'lgan energiya intervalidagi holatlar soni.

$g(E)$ holatlari zichligi qiymati va ularni elektronlar bilan to'lishi $f(E)$ ehtimolligi qaralayotgan tizimda elektronlarning kvant holatlar bo'yicha taqsimlanishini o'rnatishga imkon beradi. Elektronlar spinga (aylanishga) ega, shuning uchun kvant holatlarini ular bilan to'lishi ehtimolligi Fermi-Dirak statistikasi orqali aniqlanadi va Pauli prinsipiga bo'ysunadi. Shunday qilib, holatlar zichligi bu energiya intervalida joylashishi mumkin bo'lgan elektronlarning maksimal sonini aniqlaydi, elektronlarning energiya bo'yicha taqsimlanishi esa tizimning barcha asosiy elektr, optik va boshqa xususiyatlarini aniqlaydi. Kvant mexanikasining klassik mexanikadan asosiy farqi shundaki, zarrachaning energetik spektr uzluksiz yoki diskret bo'lishi mumkin. Muayyan sharoitlarda zarrachaning energiyasi cheklangan qiymatlar to'plamiga ega bo'lishi mumkin. Buni eng oddiy misolda tushuntiramiz. 4.4a-rasmda bir o'lchamli to'rtburchakli potensial chuqurcha tasvirlangan: agar zarracha energiyasi U_0 dan oshsa, u holda zarracha x o'qi bo'ylab erkin harakatlanishi mumkin, lekin agar uning energiyasi U_0 dan kichik bo'lsa, u holda zarracha chuqurchada lokallashadi.

Klassik mexanikada bu holda zarracha energiyasi 0 dan U_0 gacha istalgan qiymatga ega bo'lishi mumkin, kvant mexanikasida esa cheklangan energiya sathlari soni (bunday bitta o'lchamli masalada kamida bitta) mavjud. Energiya sathlari soni potensial chuqurchaning d kengligiga, U_0 potensial to'siqning balandligiga va zarrachaning massasiga bog'liq. Agar chuqurchaning kengligi oshirilsa ("devorlari surilsa"), chuqurchadagi energiya sathlari soni oshadi (4.4b-rasm).

Bunda sathlar bir-birlariga yanada yaqinroq joylashadi. Chuqurcha cheksiz keng bo'ladigan chegarada energetik spektr uzluksiz bo'lib

qoladi. Aynan atomlardagi elektronlar Kulon ionlar maydonida bo'lgani uchun (ya'ni ular uchun potensial chuqurcha o'z o'rniga ega), atom spektrlari chiziqlar to'plamidan iborat bo'ladi.



4.4-rasm. Tor bir o'lchamli to'rtburchakli potensial chuqurcha (a) va katta d kenglikli to'rtburchakli potensial chuqurcha (b); $U(x)$ - zarrachaning potensial energiyasi

Turli o'lchamliliklardagi elektron tizimlar - $E = (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) / 2m$ dispersiya qonunili massiv yarimo'tkazgichlar, $E = E_N + (p_x^2 + p_y^2) / 2m$ dispersiya qonuniga ega ikki o'lchamli tuzilmalar va $E = E_N + p_x^2 / 2m$ kvant tolalarini taqqoslash qiziqarli bo'ladi, bu yerda p_x, p_y, p_z - zarracha impulsining mos x, y, z o'qlardagi proektsiyalari, E_N - kvant chuqurchasidagi diskret sathlar energiyasi.

Keltirilgan formulalarning tashqi o'xshashligiga qaramay, elektronlarning erkin harakatlanishi mumkin bo'lgan turli o'lchovlar deyarli barcha xossalarda sifat jihatdan farqlarga olib keladi. Tahlil qilishda hisobga olish kerak bo'ladiki, zarrachaning kristall panjaradagi kvazi-moimpulsi uning to'lqin vektori bilan oddiy $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ kvant nisbat bilan bog'liq, bu yerda \hbar - Plank doimiysi.

3D –tizimlar. Hajmiy 3D-qattiq jismlarda zonalarining chetlari yaqinida samarali massaning yaqinlashuvida energiyaning to'lqin vektoriga bog'liqligi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} k^2, \quad (4.5)$$

bu yerda m_e^* - zonaning chetiga yaqin bo'lgan elektronning samarali massasi.

Hajmiy jismlardagi to'liqin vektori $k_{x,y,z} = \frac{2\pi}{L_{x,y,z}} n_{1,2,3}$ diskret qiymatlarni qabul qiladi, bu yerda L_x, L_y, L_z – mos ravishda x, y va z o'qlari bo'ylab kristallning o'lchamlari, n_1, n_2, n_3 - kvant butun sonlar.

Birlik hajmdagi kristaldagi ($V = 1$) k -fazoning birlik hajmiga g qiymatga bog'liq bo'lmagan holatlarning o'zgarmas soni to'g'ri keladi:

$$g(k) = \frac{dN(k)}{d^3k} = \frac{2}{(2\pi)^3}. \quad (4.6)$$

Uch o'lchamli qattiq jismning energiyasiga bog'liq holatlar zichligi funksiyasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$g(E) = \frac{(2m_e^*)^3}{2\pi^2 h^3} \sqrt{E}, \quad (4.7)$$

ya'ni bog'liqlik "ildiz" xarakteriga ega (4.3-rasm).

2D tizimlar. Bir o'lchamli kvant chuqurchasiga ega bo'lgan d qalinlikdagi yupqa qatlamlar bo'lib, ularda elektronlarning bitta z koordinata bo'ylab harakatlanishi cheklangan. Natijada, zarracha z yo'nalishda harakatlanishida ruxsat etilgan energiya sathlari kvantlanadi. Boshqa ikkita koordinatalar (x va y) bo'yicha elektronlar harakatlanishi erkin bo'ladi, ya'ni to'liqin vektorlari $k_{x,y} = \frac{2\pi}{L_{x,y}} n_{1,2}$ kvazi uzluksiz qiymatlarni qabul qilishi mumkin va zarrachaning energiyasi kvadratik dispersiya qonuni orqali aniqlanadi. 2D kvant chuqurchasidagi elektronning to'liq energiyasi quyidagi ko'rinishda yozilishi mumkin.

$$E(k_x, k_y, n) = \frac{h^2}{2m_e^*} \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \cdot n^2 + \frac{h^2}{2m_e^*} (k_x^2 + k_y^2), \quad (4.8)$$

bu yerda $n = 1, 2, 3, \dots$ butun sonli qiymatlarni qabul qiladigan kvant soni.

Bunday tizimdagi holatlar zichligi quyidagi ifoda bilan tavsiflanadi

$$g_{2D}(E) = \frac{m_e^*}{\pi h^2 d} \left[\sqrt{\frac{E}{E_n}} \right] \quad (4.9)$$

bu yerda [] belgi sonning butun qismini, E_n esa ruxsat etilgan energiya sathlari qiymatlarini bildiradi.

1D tizimlari. Ikki o'lchamli kvant chuqurchasiga ega bo'lgan kvant tolalari (yoki simlari) bo'lib, ularda harakatlanish ikkita koordinatalar bo'yicha cheklangan. Bunday tizimdagi energetik spektr ikkita harakatlanish yo'nalishlari (z va y) bo'yichakvantlanadi va quyidagi ko'rinishda yozilishi mumkin.

$$E(n, m, k_x) = \frac{h^2}{2m_e^*} \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \cdot n^2 + \frac{h^2}{2m_e^*} \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \cdot m^2 + \frac{h^2}{2m_e^*} k_x^2, \quad (4.10)$$

bu yerda d, b – kvant chuqurchasining kengligi va uzunligi.

Holatlar zichligi funksiyasi uchun ifoda quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$g_{1D}(E) = \frac{\sqrt{2m_e^*}}{\pi h \cdot d \cdot l} \sum_m \sum_n \frac{\Theta(E - E_{n,m})}{\sqrt{E - E_{n,m}}}, \quad (4.11)$$

bu yerda $\Theta(\xi)$ - Xevisayd funksiyasi, $E_{n,m}$ -zarracha z va y o'qlari bo'ylab harakatlanishida ruxsat etilgan energiya qiymatlari. Ta'kidlaymizki, ba'zi E_{nm} energiya sathlari bir necha bor olinishi mumkin, ya'ni ularni n va m kvant sonlarining turli kombinatsiyalarida olish mumkin.

0D tizimlari. Kvant chuqurchalariga ega bo'lgan kvant nuqtalar bo'lib, ularda harakatlanish uchta koordinatalar bo'yicha cheklangan. Elektron energiyasi barcha uchta koordinatalar bo'ylab harakatlanishda kvantlanadi va quyidagi formula orqali ifodalanishi mumkin:

$$E(n, m, l) = \frac{h^2}{2m_e^*} \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \cdot n^2 + \frac{h^2}{2m_e^*} \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 \cdot m^2 + \frac{h^2}{2m_e^*} \cdot l^2, \quad (4.12)$$

bu yerda a - kvant chuqurchasining chuqurligi.

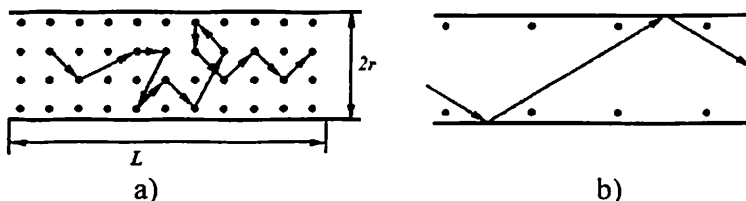
n, m, l kvant sonlari to'plamiga mos keladigan holatlar soni $t=2/d \cdot b \cdot a$ orqali aniqlanadi. Hajm birligidagi bir xil energiyaga ega bo'lgan holatlarning to'liq soni $N = g \cdot t$ hosila omili orqali aniqlanadi, u esa o'z navbatida tizim simmetriyasi orqali aniqlanadi.

4.4. Kichik o'lchamli tuzilmalarning kinetik xususiyatlari

4.4.1. Elektronlarni ballistik tashish

Qattiq jismlarda zaryad tashuvchilarni tashishning o'ziga xos xususiyatlari, asosan, bir sohadan boshqa sohaga o'tishda ularning ularning sochilishi jarayonlari orqali aniqlanadi. Boshqa elektron bilan to'qnashish yoki panjaraning tebranishlari, nuqsonlari yoki bo'linish chegaralarida sochilgan elektron muqarrar ravishda o'z holatini o'zgartiradi. Elektron ketma-ket ikkita sochilish hodisasi orasida o'tadigan o'rtacha masofa o'rtacha erkin yo'l deyiladi.

Erkin yo'lining elastik va noelastik sochilishdagi o'rtacha uzunliklari ajratiladi; qattiq jismlarda, odatda $l_{noel} > l_{el}$ bo'ladi. Makroskopik tizimlarda elektronlarning o'rtacha erkin yo'li har doim bu tizimlarning o'lchamidan ancha kichik bo'ladi. Bunday sharoitlarda o'tkazgich bo'ylab elektronning harakatlanishi diffuzion xarakterga ega bo'ladi, uning harakatlanish traektoriyasi siniq chiziq hisoblanadi (4.5a-rasm).

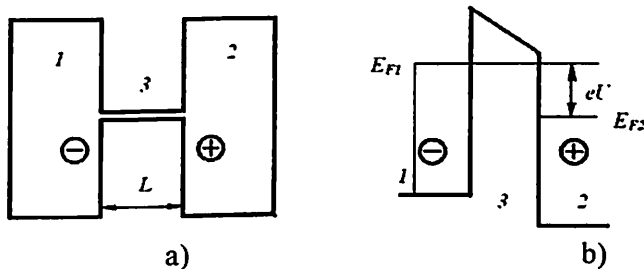


4.5-rasm. Qattiq jismlardagi elektronlarning diffuzion harakati (a) va ballistik (b) harakatining sxematik tasviri

Nanotuzilmalarda zaryad tashuvchilarni tashish shartlari makrotizimlardagi shartlarda ancha farq qiladi. O'rtacha erkin yo'ldan kichik bo'lgan o'lchamli tuzilmalarda zaryad tashuvchilarni tashish ularning sochilishsiz bo'lib o'tadi. Bu tashish ballistik tashish deyiladi (4.5b-rasm). Nanotuzilmaning o'lchamlarini elektronlarning o'rtacha o'rtacha erkin yo'li bilan taqqoslash orqali bu nanotuzilmadagi zaryad tashuvchilarni harakatlanishi xarakterini baholash mumkin. Metallarda, elektronlarning o'rtacha erkin yo'li hatto past haroratlarda, odatda, 10 nm dan oshmaydi, bu odatdagi nanotuzilmalarning o'lchamlaridan kichikroq yoki ularga teng. Shu sababli, metall nanotuzilmalarda ballistik tashishni amalga oshirish qiyin. Yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning tashish bir necha mikrometrlargacha katta elektronlarning o'rtacha erkin

yo'li bilan tavsiflanadi. Xona haroratida, Si larda noelastik sochilishdagi elektronlarning o'rtacha erkin yo'llari uzunligi 50-100 nmga, GaAslarda esa taxminan 120 nmga etadi; shuning uchun yarimo'tkazgichli nanotuzilmalarda ballistik tashishni amalga oshirish nisbatan oson. Nanotuzilmalarda zaryad tashuvchilarning ideal ballistik tashish material turiga bog'liq bo'lmagan va faqat fundamental konstantalar bilan aniqlanadigan universal ballistik o'tkazuvchanlik bilan tavsiflanadi. Universal o'tkazuvchanlik ifodasini topamiz va qiymatini hisoblaymiz.

4.6-rasmda ikkita 1 va 2 metall kontaktlar orasiga joylashtirilgan 3 nanoo'tkazgich tasvirlangan. Faraz qilaylik, o'tkazgichlarning harorati juda past va energetik diagrammadagi kontaktlarda barcha elektronlar E_{F1} va E_{F2} Fermi sathlariga yaqin joylashgan. Agar kontaktlar orasiga U potentsiallar farqi qo'yilsa (4.6.-rasm), u holda 2 metall ning energetik sathlari 1 metallning sathlariga nisbatan eU qiymatga kamayadi, bunda $E_{F1} - E_{F2} = eU$ bo'ladi. Tokni tashishda E_{F1} dan E_{F2} gacha bo'lgan energiya intervalida nimzonalarning elektronlari qatnashishi mumkin.



4.6-rasm. Ballistik o'tkazgichli metall kontaktlarning geometriyasi (a) va energetik diagrammasi (b)

Shuni ko'rsatish mumkinki, har bir nim zona umumiy tokka $I = (2e^2/h) \cdot U$ ga teng bo'lgan o'z hissasini qo'shadi. Agar E_{F1} dan E_{F2} gacha energiya intervalida N nimzonalar bo'lsa, u holda nanoo'tkazgichdagi tok quyidagiga bo'ladi:

$$I = (2e^2/h) \cdot U \cdot N$$

uning G o'tkazuvchanligi quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$G = I/U = (2e^2/h)N$$

qarshiligi esa quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$R = (2e^2/h)/N..$$

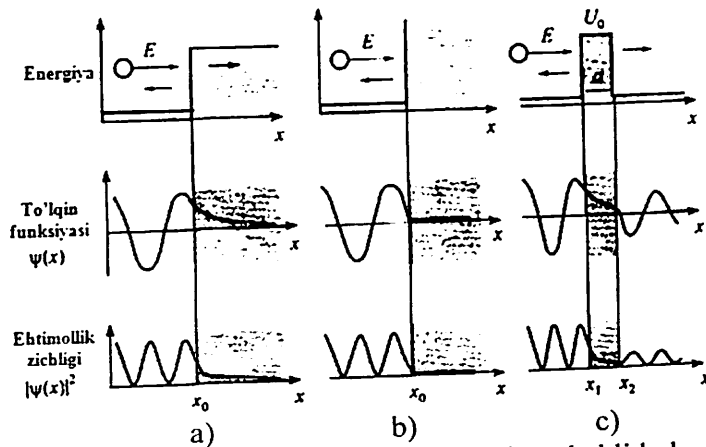
$2e^2/h$ qiymat o'tkazuvchanlik kvanti deyiladi, $h/2e^2 \approx 12,9$ kOm teskari qiymat esa qarshilik kvanti deyiladi.

Klassik o'tkazgichdan farqli ravishda ballistik kvant tolasining qarshiligi uning uzunligiga bog'liq emas va faqat fundamental doimiylar - elektron zaryadi va Plank doimiysi orqali aniqlanadi;

Aslida, o'tkazuvchanlikning (qarshilikning) kvantlanishi energiya-ning o'lchamli kvantlanishi natijasi hisoblanadi.

4.4.2. Tunnel samarasi

“Tunnel samarasi” atamasi zarrachaning potensial to'siq bo'lgan soha orqali o'tishini (yoki kirishini) anglatadi, binobarin, bu to'siqning balandligi zarrachaning to'liq energiyasidan katta bo'ladi. Bunday samara klassik mexanika nuqtai nazaridan mumkin emas, lekin u kvant zarralari uchun o'z o'rniga ega bo'ladi. Kvant zarrachalarining turli balandliklardagi va kengliklardagi bir o'lchamli potensial to'siqlardan o'tishi 4.7-rasmda tasvirlangan.



4.7-rasm. E to'liq energiyali kvant zarrachasining chekli balandlikdagi U_0 zinasimon to'siq bilan (a), cheksiz balandlikli to'siq bilan (b), U_0 balandlikdagi va d kenglikdagi to'siq bilan (c) o'zaro ta'sirlashishi

Agar potensial to'siq to'rtburchakli shaklga ega bo'lsa (4.7s-rasm), u holda E energiyali m massali zarrachaning d kenglikdagi potensial to'siq

orqali kiriishi ehtimolligi quyidagi oddiy formula bilan ifodalanishi mumkin:

$$D = D_0 \left(-\frac{2}{h} \sqrt{2m(U_0 - E) \cdot d} \right), \quad (4.13)$$

bu yerda D - potensial to'siqning shaffoflik koeffitsienti, zarrachaning to'siqqa kirishga ΔN muvaffaqiyatli urinishlar sonini bunday urinishlarining N ($D = \Delta N/N$) umumiy soniga nisbati, $(U_0 - E)$ - to'siq ichidagi zarracha energiyasining "tanqisligi" deyiladi, D_0 - qiymati bo'yicha birga yaqin doimiy ko'paytma.

(4.13) ifodadan kelib chiqadiki, zarrachaning massasi, potensial to'siqning kengligi va energiyaning "tanqisligi" ortishi bilan D tunnel-lashtirish ehtimolligi kamayadi. Masalan, elektron uchun ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg) ($U_0 - E$) = 1 eV bo'lganda, $d=0,1$ nm qalinlikdagi potensial to'siqning shaffoflik koeffitsienti $D = 0,1$ ga teng bo'ladi.

Agar o'sha bir sharoitlarda to'siq kengligi $d = 0,4$ nm bo'lsa, u holda $D = 0,01$ bo'ladi. Binobarin, ko'plab yarim o'tkazgichlar uchun samarali massa $m_e^* \ll m_e$ bo'ladi, u holda shaffoflik koeffitsienti hatto bir necha nanometrlardagi to'siq kengligida sezilarli bo'ladi.

4.4.3. Issiqlikni uzatish mexanizmlari

Nanomuhandislikni rivojlanish istiqbollari asosan nanotizimlarda issiqlikni uzatish muammolarini yechish orqali aniqlanadi. Bu muammolarning murakkabligi, birinchidan, nanotuzilmadagi issiqlik uzatish mexanizmlari massiv jismlar uchun yaxshi o'rganilgan muammolardan sezilarli farq qilish va yangi tadqiqot usullarini ishlab chiqish zarurligiga bog'liq. Ikkinchidan, nanotuzilmalar juda xilma-xil va ularning har biri alohida o'rganishni talab qiladi. Hozirgi vaqtda nanotermik fizika sohasidagi quyidagi tadqiqot yo'nalishlari asosiy yo'nalishlar hisoblanadi:

- 1) nanotuzilmalarning termofizik xususiyatlarini o'rganish;
- 2) ishlab chiqiladigan texnik nanoqurilmalarning zarur issiqlik rejimini ta'minlash muammolarini yechish;
- 3) nanotuzilmalarning issiqlik rejimlarini hisoblash usullarini ishlab chiqish.

Nanotuzilmalarda issiqlik uzatishning nazariy asoslari statistik termodinamika va kinetik nazariya hisoblanadi. Nanotuzilmalardagi issiqlik

likni o'tkazish bo'yicha zamonaviy tadqiqotlar yarimo'tkazgichli qurilmalarga qaratilgan, shuning uchun ko'plab ishlarda fononlar orqali issiqlik uzatish ko'rib chiqiladi. Issiqlikni elektron uzatish metallarga xos hisoblanadi.

Fonon ma'lum miqdordagi atomlarning (molekulalarning) muvofiq-
lashtirilgan tebranishi bo'lgan kvazi zarracha hisoblanadi. Fononlarning to'liqin xususiyatlari uning f chastotasi va λ to'liqin uzunligi orqali aniqlanadi. Fononning mexanik xossalari de Broyl nisbatlari orqali aniqlanadi: $p = \hbar k$ kvazi impuls, bu yerda $k = 2\pi/\lambda$ - to'liqin vektori; $E = \hbar\omega$ - energiya

Issiqlikni uzatish nuqtai nazaridan, massiv jismlar har uchala o'lchovlardagi ularning o'lchamlari modda ichidagi zarrachalarning erkin yo'lidan ancha katta bo'lishi bilan tavsiflanadi. Bu shartlar bajarilganda Fur'e qonuni va issiqlikni o'tkazuvchanlik tenglamasi o'rinni bo'ladi. Nanotuzilmalar uchun har uchala o'lchovlar uchun emas, balki kichik erkin yo'llar uchun shartlar bajariladigan alohida hollar mavjud. Bu, masalan, ular uchun bu shartlar faqat ikki o'lchovda bajariladigan grafen va nanoyupqa qatlamlarning katta listlari bo'lishi mumkin. Bu shartlar bajarilganda, issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamasi nanotuzilmadagi issiqlik tarqalishini ikki yoki bir o'lchamli hisoblash uchun qo'llaniladi. Qolgan hollarda o'tkazishni hisoblash uchun boshqa usullarini ishlab chiqish kerak.

Nanotuzilmalarda issiqlikni uzatishning o'ziga xos xususiyatlari. Nanotuzilmalarda issiqlik uzatish o'ziga xususiyatlarini ko'rib chiqamiz.

1. Balistik issiqlik o'tkazuvchanligi. Massiv namunalarda namunaning L xarakterli o'lchamlari bilan taqqoslaganda, l o'rtacha erkin yo'lning kichikligi sharti bajariladi. $l \gg L$ teskari shart nanotuzilmalarda amalga oshiriladigan issiqlikni to'qnashuvsiz o'tkazilishi bajarilganda ballistik issiqlikni o'tkazuvchanlikka mos keladi. Bu hollarda namunalarning issiqlik qarshiligi nolga yaqin bo'ladi.

2. Kontaktli issiqlik qarshiligi. Qatlamlar orasidagi chegaralarga ega bo'lgan nanotuzilmalarda ma'lum ta'sir - kontaktli issiqlik qarshiligi namoyon bo'ladi, uning mohiyati turli kristall panjarali qatlamlar orasidagi chegaradagi haroratning sakrashidan iborat. Nanotuzilmalarda issiqlikni uzatishni o'rganishda bu samara odatda katta ahamiyatga ega bo'ladi.

3. Nanoob'ektlar chegaralarida fononlarning sochilishi. Fononlarning chegaralar bilan to'qnashuvlarini hisobga olish zarur

bo'ladigan nanoo'lchamli namunaga o'ziga xos misol diametri fonon o'rtacha erkin yo'ldan ancha kichik bo'lgan nanotolalar hisoblanadi [3]. Bu holda chegarada sochilish xususiyati simmetrik yoki diffuzion ekanligini ko'rib chiqish kerak bo'ladi. Birinchi holda, diffuzion sochilishgacha yo'l uzunligi massiv jismlardagi kabi bo'ladi. Agar chegaradagi sochilish diffuzion bo'lsa, u holda o'rtacha erkin yo'l tolaning diametri bilan tenglashadi. Tajriba shuni ko'rsatadiki, chegarada fononlarning har ikkala sochilishlari turlarini hisobga olish zarur.

4. Kvant-o'lchamli tuzilmalar. Agar fononlarning to'lqin uzunligi nanoobektning o'lchamilaridan biriga (masalan, nanoyupqa qatlamning qalinligi bilan) tenglashsa, u holda bu nanoob'ektda faqat bu o'lchamda yarim to'lqinlarning butun soni joylashadigan fononlar mavjud bo'lishi mumkin. Bu hollarda energiya sathi bo'yicha fononlarning muvozanatli taqsimoti Boze-Eynshteyn taqsimotidan farq qiladi va quyidagi ikkita samaralarni hisobga olish zarur bo'ladi:

- 1) fononlar zichligining kamayishi;
- 2) fononlar dispersiyasi tenglamalarining o'zgarishi va shu bilan bog'liq tovush tezligining kamayishi.

Nanotolalar va nanoyupqa qatlamlarda issiqlikni uzatish. Etarli uzunlikdagi nanotolalar uchun Fur'e qonuni bir yo'nalishda - o'z o'qi bo'ylab amal qiladi. Shuning uchun nanotolaning issiqlik o'tkazuvchanligini uning diametri va haroratiga bog'liqligi namoyon bo'ladi. O'xshash tarzda nanoyupqa qatlamning etarlicha katta bo'ylama o'lchamlarida Fur'e qonuni yupqa qatlam ichida uning sirti bo'ylab yo'nalishda amal qiladi. Nanotolaning diametri va nanoyupqa qatlamning qalinligi bir necha nanometrlarga etganda fononlar orqali issiqlik o'tkazish massiv materiallar darajasiga nisbatan sezilarli darajada kamayadi. Bu shunga bog'liqqi, birinchidan, ko'rsatilgan o'lchamlar zarrachalarning o'rtacha erkin yo'lidan sezilarli kichik bo'lib qoladi, ya'ni nanotolalar chegaralarida fononlarning sochilishi ortadi. Ikkinchidan, nanotolalar va nanoyupqa qatlamlarning minimal o'lchamlari fononlarning to'lqin uzunligi bilan tenglashadi, ya'ni kvant samaralari paydo bo'ladi.

Nazorat savollari

1. Nanotexnologiyalarning asosiy tushunchalarini tushuntiring?
2. Nanotexnologiyalarning rivojlanish yo'nalishlari qanday?
3. Nanotexnologiyalar nima va ularning asosiy qo'llanilishi nima?
4. Naoelektronika va uning asosiy vazifalariga ta'rif bering?

5. O'zbekistonda va jahonda nanotexnologiyalarni qanday rivojlantirish dasturlari mavjud?
6. Mur qonunining mohiyatini tushuntiring?
7. Qanday texnologik va ishlab chiqarish cheklovlari mavjud?
8. MDYAO' nanotranzistorning ishlashiga qanday statistik cheklovlar mavjud?
9. Nanoelektron elementlarning ishlashiga qanday topologik cheklovlar mavjud?
10. MDL nanotranzistorlaridagi O'KISlarning quvvati bo'yicha cheklovlarni tushuntiring.
11. MDYAO' nanotranzistoriga kvant-mexanik cheklovlarni tushuntiring.
12. Kichik o'lchamli tuzilmalarni sanab bering va ta'riflang
13. 2D-kvantli chuqurchalarda holatlar funksiyasining zichligini chizing va tushuntiring.
14. Kvant chuqurchalardagi holatlar zichligi funksiyasini chizing va tushuntiring. Kvant tolasidagi holatlar zichligi funksiyasini chizing va tushuntiring
15. Kvant nuqtasidagi holatlar zichligi funksiyasini chizing va tushuntiring.
16. Energetik spektr nima?
17. Kichik o'lchamli ob'ektlardagi elektronlarning energetik spektrini tushuntiring.
18. Elektronlarning ballistik tashishni tushuntiring?
19. O'tkazuvchanlik kvanti va qarshilik kvantining ma'nosini tushuntiring.
20. Potensial to'siq orqali mikrozarra hallarni tunnellashtirish hodisasining fizik ma'nosi nima?
21. Nanoob'yektlarda issiqlik uzatishning o'ziga xususiyatlarini sanab bering va tushuntiring?

5 BOB. NANOELEKTRONIKA MATERIALLARI VA TUZILMALARI

5.1. NANOelektronikada mikroelektronika yarimo‘tkazgichli materiallari

5.1.1. Yarimo‘tkazgichli oddiy materiallar

Kremniy (Si) ta’qiqlangan zonasining kengligi 1,12 eV bo‘lgan va α = panjara doimiysi 5,43 Å bo‘lgan kubli panjara tuzilmaga ega bo‘lgan yarimo‘tkazgich hisoblanadi. Kremniy “kuch” yarimo‘tkazgichli qurilmalarni (ventillar, tirasmtorlar, quvvatli tranzistorlarni) ishlab chiqarishda keng qo‘llaniladi, kremniy asosida katta va juda katta integral sxemalar yaratiladi. Zamonaviy yarimo‘tkazgichli mikro- va nanoelektronikada kremniyning yetakchi o‘mi boshqa yarimo‘tkazgichli materiallar ega bo‘lmagan ijobiy xususiyatlarning keng doirasiga bog‘liq. Kremniy texnologik, normal sharoitlarda inert, asboblar va integral sxemalarni tayyorlash jarayonida bo‘ladigan yuqori haroratlarga bardosh beradi.

Kremniyda hosil bo‘lgan o‘z SiO₂ oksidi izolyasiyalash va niqoblash funksiyalarini bajaradi. Kristall panjarada Si atomlari hajmning atigi 25 foizini egallaydi, buning natijasida material past zichlikka ega (2,32 g/sm³, germaniy uchun - 5,35 g/sm³) bo‘ladi va III va V guruhlar elementlari bilan kuchli legirlashni olishga imkon beradi. Natijada, zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi 10¹⁰ dan 10²³ sm⁻³ gacha keng diapazonda o‘zgarishi mumkin. Kremniy tarkibidagi legirlash elementlari difuziya koeffitsientlarining yuqori qiymatlari kovakli (*p*-Si) yoki elektronli (*n*-Si) o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan mikron va submikron o‘lchamlardagi lokal sohalarni shakllantirish imkonini beradi. Kremniy monokristallarini ishlab chiqarish yiliga 3000 tonnadan oshadi. Biroq, monokristalli kremniyning ham kamchiliklari bor. Ulardan biri zaryad tashuvchilarning nisbatan past harakatchanligi bilan bog‘liq (elektronlar uchun - 1500 sm² / (V · s), kovaklar - 600 sm² / (V · s)), bu asboblarning tezkorligini cheklaydi.

Monokristalli kremniyning yana bir kamchiligi shundaki, undan yorug‘likni nurlantiruvchi qurilmalarni yaratish uchun foydalanib bo‘lmaydi. Keng spektral diapazonli yorug‘likni nurlantiruvchi tuzilmalar boshqa yarimo‘tkazgichlar (GaAs, GaP, GaN, ZnS, ZnSe va boshqalar)

asosida ishlab chiqariladi, biroq kremniy texnologiyalari doirasida bari-bir yorug'likni nurlantiruvchi tuzilmalarni yaratish mumkin.

Bu muammoni yechishda ikkita yondashuvlar mavjud. Ulardan biri kremniyni yerda kam uchraydigan elementlar (Eg, Eu, Gd) bilan legirlashdan iborat bo'lib, buning natijasida bu modifikatsiyalangan kremniy infraqizil diapazonda yorug'likni nurlantirish xususiyatlariga ega bo'ladi.

Yana bir yondashuv, masalan, kremniyli monokristallarda mayda bo'shliqlarni (kovaklarni) ochish orqali kremniy nanokristallarini yaratishdan iborat bo'lib, buning natijasida qolgan kremniy sohasi bir necha nanometrlar o'lchamlarga ega bo'lishi mumkin. G'ovaklar tarmog'iga singib ketgan monokristalli kremniy g'ovakli kremniy (G'K) deyiladi. G'ovakli kremniyda elektrokimyoviy ishlov berish orqali kvant nuqtalari, kvant tolalari, turli fraktal o'lchamlilikli elementlarni olish mumkin. G'ovakli kremniyga nanoelektronika uchun materiallardan biri sifatida qarash kerak. G'ovaklarni boshqa kimyoviy birikmalar bilan to'ldirish istiqbolli hisoblanadi, bu esa g'ovakli kremniyning hajmida kichik o'lchamli elementlarni shakllantirish imkonini beradi.

G'ovakli kremniyning o'ziga xos xususiyati uning ichki sirtining katta umumiy maydoni hisolanadi. Kichik o'lchamli kremniy ishlov berish sharoitlariga bog'liq ravishda qarshilik qiymatlarining 10^{-2} - 10^{11} Om·sm keng doirasiga ega. Yuqori g'ovakli kremniyning issiqlik o'tkazuvchanligi monokristalli kremniyga qaraganda bir tartibga past bo'ladi.

G'ovakli kremniyning optik xususiyatlari hajmiy materialdan sezilarli farq qiladi. Xususan, g'ovakli qatlamning yutilish spektrining cheti g'ovaklikka bog'liq ravishda E_{g0} ga nisbatan katta $h\nu$ tomonga 100-500 meVga suriladi. G'ovakligi 50%dan oshadigan g'ovakli kremniy namunalarning qiziqarli xususiyati spektrning ko'rinadigan sohasida samarali nurlanish qobiliyati hisoblanadi. Fotolyuminessensiyaning samaradorligi o'nlab foizlarga etishi mumkin. Rangli displeylarni ishlab chiqarish uchun zarur bo'ladigan qizil, yashil va ko'k ranglarni olish mumkin bo'lib qoldi.

2006 yilda yapon olimlari tomonidan "suyuq" (amorf) kremniyni olish texnologiyasini ishlab chiqildi. "Suyuq" kremniyni keyingi ishlov berish va tranzistorlarni inkjet printerlarda chiqarish uchun tayyor yupqa plyonkani olish uchun taglikka sepish mumkin. Bu texnologiya xarajatlarni sezilarli kamaytirish va kelajakda yarimo'tkazgichli chiplarni

ishlab chiqarish jarayonini tezlashtirishga imkon beradi. Bu texnologiyadan foydalanishning boshqa bo'lishi mumkin sohalari OLED-ekranlar va quyosh elementlarini ishlab chiqarish bo'lishi mumkin.

Yarimo'tkazgichli nanoelektronikaning asosiy elementi kremniydagi nanotranzistor hisoblanadi. Tranzistorlar va integral sxemalarning boshqa elementlarining nanometrlardagi o'lchamlariga bog'liq muammolar hajmiy kremniydan farq qiladigan maydoniy tranzistorlarning yangi materiallari va konstruksiyalarini qidirib topishni rag'batlantiradi. Hozirgi vaqtda hajmiy kremniyga yagona muqobil tuzilma submikronli va nanometrli kremniy qatlamlariga ega bo'lgan izolyatoridagi kremniy (IK) tuzilmalar hisoblanadi. IK tuzilmalardagi tranzistorlarning muhim o'ziga xos xususiyati ularning oshirilgan harorati va radioatsion barqarorligi hisoblanadi, bu texnologiyani juda kutilgan qiladi.

Yana bir innovatsiya materialning yorug'likni yutish xususiyatlarini tubdan o'zgartiradigan sirtli lazerli modifikatsiyalash texnologiyasi bo'yicha qora kremniyni olish kremniy orqali yorug'likni yutilishini ikki barobar oshirishga imkon beradi. Nurlanishning kuchli yutilishi nafaqat ko'rinadigan diapazonda, balki infraqizil diapazonda ham bo'lib o'tadi, bu esa yangi turdagi yorug'likka sezgir detektorlarni loyihalash va quyosh energiyasini olish imkoniyati haqida aytishga imkon beradi.

Germaniy (Ge) ta'qiqlangan zonasining kengligi 0,72 eV bo'lgan yarimo'tkazgich bo'lib, panjara doimiysi $a = 5,66 \text{ \AA}$ bo'lgan olmos turdagi kristall tuzilmasiga ega va infraqizil va tolali optik qurilmalarini ishlab chiqarish va yarimo'tkazgichli diodlardan va triodlardan tashqari, termorezistorlar, yopuvchi qatlamli fotoelementlar, termik elementlar, yupqa qatlamli qarshiliklarni ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi. Kremniy-germaniylil (SiGe) geterotuzilmalar asosida kanal sohasida kremniy kristall panjarasini cho'zish samarasiga ega bo'lgan O'YUCH tranzistorlar ishlab chiqariladi.

5.1.2. Yarimo'tkazgichli murakkab materiallar

Galliy arsenidi (GaAs). Mikroelektronikaning an'anaviy materiallari orasida o'z vazifasi bo'yicha uchinchi o'rinda Galliy arsenidi turadi, u rux aralashmasi tuzilmasi ($a = 5,65 \text{ \AA}$) va 1,424 eV kenglikdagi ta'qiqlangan zonaga ega bo'lgan yarim o'tkazgich hisoblanadi. U O'YUCH integral sxemalar, yorug'lik diodlari, lazerli diodlar, Gann diodlari, tunnel diodlari, fotoqabul qilgichlar va yadroviy nurlanish detektorlarini

yaratish uchun ishlatiladi. GaAsdagi elektronlarning harakatchanligi xona haroratida $8500 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ni, suyuq azotning qaynash nuqtasida (77 K) $250\,000 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ni tashkil qiladi. Galliy arsenidi mikroelektronikasi nomini olgan maxsus texnologik yo'nalish haqida aytish mumkin. GaAs yarimo'tkazgichli qurilmalar kremniy qurilmalarga qaraganda kamroq shovqin chiqaradi.

GaAs asosidagi asboblarda kremniyli asboblarga qaraganda kam shovqinni generatsiyalaydi. Kremniydagiga qaraganda GaAsdagi elektr maydonning yuqori kuchlanganligi tufayli galliy arsenidi asosida asboblarda yuqori quvvatlarda ishlashi mumkin. Bu GaAsdan yarimo'tkazgichli lazerlar, radarlar tizimlari va mobil telefonlarda keng foydalanish imkonini beradi. GaAs asosidagi qurilmalar kremniy asosidagi qurilmalarga qaraganda yuqori radiatsion barqarorlikka ega, bu ularni radiatsion nurlanishlar sharoitlarida (masalan, kosmosda ishlaydigan quyosh batareyalarida) ishlatishga yaroqli qiladi. Alyuminiy bilan arsenid (AlAs) kombinatsiyasi yoki uchlamchi $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ eritmali (geterotuzilmalar) bilan murakkab qatlamli GaAs tuzilmalari molekulyar-nurli epitaksiya (MNE) yordamida o'stirilishi mumkin. O'zgarmas panjaralarni deyarli ideal moslashtirilishi tufayli qatlamlar kichik mexanik kuchlanishlarga ega va ularni ixtiyoriy qalinlikda o'stirish mumkin.

Galliy nitridi (GaN). $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ guruhining vakili bo'lib, GaAs, InP, AlAs kubik kristallaridan farqli ravishda vyursit turdagi olti burchakli panjarada kristallanadi (panjara doimiylari $a = 3.18 \text{ \AA}$; $c = 5.18 \text{ \AA}$) va $E_g = 3, 5 \text{ eV}$ bo'lgan ta'qiqlangan zona kengligiga ega. GaN to'g'ri zonali yarimo'tkazgich bo'lib, uning legirlanmagan kristallari n-turdagi o'tkazuvchanlikka bog'liq bo'lgan donorlarning yuqori konsentratsiyasiga va $n = 10^{18} - 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ elektronlar konsentratsiyasiga ega.

O'xshash birikmalar - AlN va InN alyuminiy va indiy nitridlari mos ravishda $E_g = 6,5$ va $1,8 \text{ eV}$ ta'qiqlangan zona kengligiga ega bo'lgan to'g'ri zonali yarim o'tkazgichlar hisoblanadi. Bu birikmalarning kristallari ham kuchli farqlanadigan panjaralar doimiyliglariga ega bo'lgan olti burchakli hisoblanadi. Ikkitalik birikmalar $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ uchta qattiq eritmalar hosil bo'lishiga imkon beradi. $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ bilan birga x parametrni tanlash mumkin, bunda E_g energiyasi spektrning binafsha, ko'k yoki yashil sohalariga javob beradi.

Galliy nitrid yorug'lik diodlari, lazer diodlari va o'ta yuqori chastotali tranzistorlarni yaratish uchun keng qo'llaniladi.

Hozirgi vaqtda chiqish quvvati bir necha o'nlab va hatto yuzlab vatt bo'lgan GaN asosidagi monolitik integral mikrosxemalar (MIS) aktiv ishlab chiqilmoqda va turkum ishlab chiqarilmoqda. Bunday kuchaytirgichlar eng yangi radiolokatorlar, aloqa tizimlari, radiohalaqitlarni yaratish qurilmalari va mikroto'liqlik diapazonda yuqori chastotali radiosignallarni generatsiyalaydigan boshqa turdagi elektron apparaturalarda qo'llaniladi. GaN asosidagi qattiq jismli kuchaytirgichlar GaAs asosidagi MISlarga qaraganda ancha yuqori haroratlarga bardosh bera oladi va yuqori elektr kuchlanishlarda ishlash mumkin.

Rux oksidi (ZnO). GaNga yaqin ta'qiqlangan zona kengligi ega bo'lgan rux oksidi (ZnO) eksitonning eng yuqori bog'lanish energiyasi (60 meV) bilan tavsiflanadi, nurlanishga yuqori barqarorlikka ega, kimyoviy ishlov berish mumkin va nisbatan arzon, bu esa uni mikroelektronikada qo'llanishi uchun o'ziga tortadi. O'zining optik, akustik va elektr xossalari tufayli rux oksidi quyosh elementlarida shaffof elektrodlar, gaz sensorlari, varistorlar va sirt-akustik to'liqlarini generatsiyalash qurilmalarini ishlab chiqarishda qo'llanildi.

Kadmiy sulfid (CdS). Optoelektronikada foydali bo'lib, u ham fotosezgir, ham fotogalvanik qurilmalarda qo'llaniladi. U fotorezistorlarni ishlab chiqarishda ishlatiladi. Kadmiy sulfid monokristallari elementar zarrachalar detektor sifatida ishlatiladi. Kadmiy sulfid yana quyosh elementlari uchun asosiy material hisoblanadi.

Kremniy karbid (SiC). Ko'pincha nanoelektron qurilmalar uchun taglik material sifatida ishlatiladi. Uning asosida tayyorlangan yarimo'tkazgichli qurilmalar ta'qiqlangan zona kengligining katta qiymati (o'rtacha 2,39 eV) tufayli 600 °Cgacha bo'lgan haroratlarda ishlash barqarorligi va ishonchliligini saqlay oladi. Shuningdek, u yorug'lik diodlari, quyosh elementlari, isitgichlar, termorezistorlar va boshqa qurilmalarni tayyorshda ishlatiladi.

Ta'kidlash joizki, nanoelektronika qurilmalarida foydalanish uchun fizik xususiyatlarining noyob kombinatsiyasiga ega bo'lgan yangi istiqbolli yarimo'tkazgichli materiallarni izlash davom etmoqda.

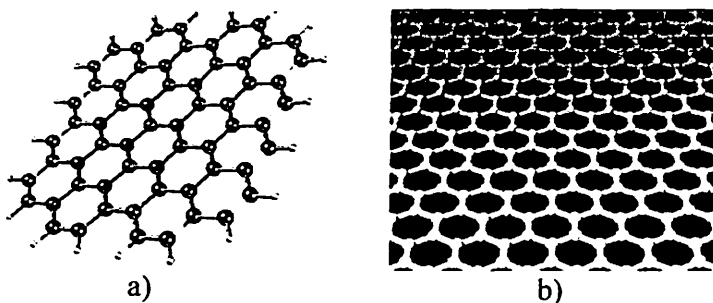
5.2. Nanoelektronika materiallari

5.2.1. Grafen

Grafen (ingl. *graphene*) olti burchakli ikki o'lchamli kristall panjara sp^2 aloqalar bilan bog'langan uglerod atomlari qatlami hisoblanadi.

Grafen ikki o'lchovli kristall (5.1-rasm) hisoblanadi. Uni bitta grafit tekisligi deb tasavvur qilish mumkin. Grafening kristall tuzilmasi panjarasi doimiysi 0,246 nm bo'lganolti burchakli panjara hisoblanadi (5.1a-rasm).

Bu material tashuvchilarning energetik spektrining o'ziga xos xususiyatlari tufayli uglerodning boshqa allotropik modifikatsiyalari - grafit, olmosning bir qismi emas. U boshqa ikki o'lchamli tizimlardan farqli ravishda elektr o'ziga xos fizik xususiyatlarga ega (5.1b-rasm).



5.1. rasm Grafening kristalli tuzilmasi: (a) kristall tuzilmasi va (b) grafen bo'lagi

Grafen yuqori mexanik qattqlikka (~ 1 TPa) va olmosning issiqlik o'tkazuvchanligidan bir necha barobar yuqori bo'lgan noyob issiqlik o'tkazuvchanligiga ($-5 \times 10^4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ega. Xona haroratida tok tashuvchilarning yuqori harakatchanligi uni turli xil ilovalarda, xususan, nanoelektronikaning bo'lajak asosi sifatida va integral mikrosxemalarda kremniy o'rnini bosishi mumkin bo'lgan materialga aylantiradi. Grafenni nazariy tadqiqotlari materialning real namunalarini olishdan ancha oldin boshlangan. Grafendan uch o'lchamli grafit kristalini yig'ish mumkin bo'lganligi sababli, grafen bu kristall nazariyasini tuzish uchun asos hisoblanadi. Grafen birinchi marta faqat 2004 yilda olingan. Uglerodli nanoquvurlar topilganidan keyin grafenga qiziqish yana paydo bo'ldi.

Grafen olishning asosiy usuli grafit qatlamlarini mexanik ajratish hisoblanadi. Bu usul tashuvchilarning yuqori harakatchanligiga ega bo'lgan eng yuqori sifatli namunalarni olish imkonini beradi. Kremniy karbid tagligini termal yoyilishiga asoslangan boshqa usul sanoatda ishlab chiqarishga ancha yaqin.

Ajratish usuli juda oddiy va BN, MoS₂, NbSe₂, Bi₂Sr₂CaCu₂Ox kabi ikki o'lchovli kristallarning zaif bog'langan qatlamlari hisoblanadigan

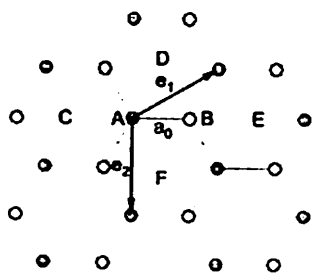
barcha qatlamli kristallar bilan ishlash imkonini beradi. Grafitning yupqa plyonkalari yopishqoq tasmalar orasiga joylashtiriladi va qayta-qayta yupqa plyonkalariga ajratiladi; ko'plab yupqa plyonkalar orasida bir qavatli yupqa plyonkalarni ham uchratish mumkin. Ajratilganidan so'ng, ingichka grafit va grafenli yupqa plyonkali skotch oksidlangan kremniy tagligiga bosiladi. Bunday usulda muayyan o'lcham va shakldagi yupqa qatlamni olish qiyin: yupqa plyonkalarining gorizontol o'lchamlari odatda taxminan 10 mikronni tashkil qiladi.

Optik mikroskop yordamida kerakli qalinlikdagi yupqa plyonka bo'laklari topiladi; ular dielektrikning 300 nm qalinligida kuchsiz ko'rinadi. Yupqa plyonkaning qalinligi (grafen uchun ~ 1 nm) atomli-kuchli mikroskop yordamida aniqlanadi. Elektron litografiya va plazmali ishlov berish yordamida elektr fizik o'lchovlar uchun yupqa plyonka shakllantiriladi. Eksperimental ishlarning aksariyati pirolitik grafitning katta kristalini ajratish orqali olingan grafen namunalari bajarilgan.

Yana ikkita usullar – gaz bosqichida radiochastotali plazma-kimyoviy o'tqazish va yuqori bosim va haroratda o'stirishni aytib o'tish kerak. Faqat oxirgi usuldan katta yuzali yupqa plyonkalarni olish uchun foydalanish mumkin. Agar elektrodlar orasiga pirolitik grafit kristalli va tagligi elektrodlar orasiga joylashtirilsa, u holda elektr maydon ta'sirida (elektrodlar orasidagi kuchlanish 13 kVgacha) orasida atom qalinligidagi yupqa qatlamlari bo'lishi mumkin bo'lgan sirtidan grafit bo'laklari oksidlangan kremniy taglikka surilishi mumkin.

Ideal grafen faqat olti burchakli yacheykalardan iborat. Besh burchakli va etti burchakli yacheykalarining bo'lishi turli nuqsonlarga olib keladi. Besh burchakli yacheykalarining bo'lishi atom tekisligining konusga burilishiga olib keladi. 12 ta bunday nuqsonli tuzilma fulleren deyiladi.

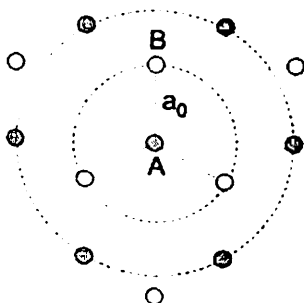
Grafenning olti burchakli panjarasi uchun teskari panjara ham olti burchakli bo'ladi. Kristallning elementar yacheykasida A va B sifatida belgilangan ikkita atomlar mavjud. Bu atomlarning har biri translyasiyalar vektorlariga ($r_A = me_1 + ne_2$ shaklidagi istalgan vektor, bu yerda m va n har qanday butun sonlar) surilganda unga ekvivalent atomlardan kishik panjarani hosil qiladi (5.2 -rasm). Olti burchakli eng yaqin uglerod atomlari orasidagi masofa (a_0) 0,142 nmni tashkil qiladi. Panjaraning a doimiysini oddiy $a = \sqrt{3}a_0$ geometrik mulohazalardan, ya'ni 0,246 nm olish mumkin.



5.2-rasm. Grafen panjarasi: e_1 va e_2 –translyasiyalar vektorlari; kulrang fonda elementar yacheyka, to‘q va och ranglarda kristall turli kichik panjaralarining tugunlari tasvirlangan

Zonaviy tuzilma. Materialning kristalli tuzilmasi uning barcha fizik xususiyatlarida aks etadi. Grafening zonaviy tuzilmasi kuchli bog‘langan elektronlarning kuchli yaqinlashuvida bo‘ladi. Uglerod atomining tashqi qobig‘ida 4 ta elektron mavjud bo‘lib, ularning uchta sp^2 -gibridlangan orbitalar qoplanishida panjarada qo‘shni atomlar bilan bog‘lanish hosil qiladi, qolgan elektron esa $2p_z$ -holatda bo‘ladi (aynan shu holat grafitda tekisliklararo bog‘lanishlarni hosil qilish uchun, grafenda energetik zonalarni hosil qilish javob beradi).

Kuchli bog‘langan elektronlarning yaqinlashuvida integral qoplanish (γ_0) atomlararo masofalarda tez kamayadi va grafening zonaviy tuzilmasini shakllantirishga asosiy hissani markaziy atom to‘lqin funksiyasining ichki doirada joylashgan atomlar to‘lqin funksiyalari bilan o‘zaro ta’sirlashishi kiritadi. (5.3-rasm).



5.3-rasm. Panjara markaziy tugunining (A) eng yaqin atomlari: a_0 - eng yaqin atomlar orasidagi masofa

Grafendagi elektronlarning energetik spektri (faqat eng yaqin qo'shni atomlarni hisobga olgan holda) quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

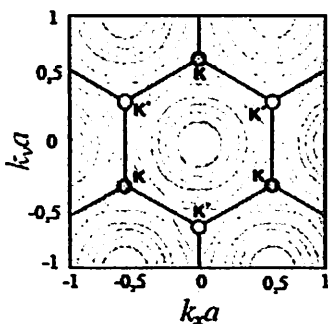
$$E = \pm \sqrt{\gamma_0^2 (1 + 4 \cos^2 \pi k_y a + 4 \cos \pi k_y a \times \cos \pi k_x \sqrt{3} a)} \quad (5.1)$$

bu yerda "+" elektronlarga, "-" teshiklarga mos keladi.

(5.1) ifodadan kelib chiqadiki, valentlik va o'tkazuvchanlik zonalarining tegish nuqtalari yaqinida (5.4-rasmdagi Brilliyen zonasining K va K' nuqtalari) grafendagi elektronlar uchun dispersiya qonuni chiziqli bo'ladi:

$$E = \hbar v_F k$$

bu yerda v_F - Fermi tezligi (eksperimental qiymati - $v_F = 10^6$ m/s); k - K yoki K' nuqtalaridan o'lchangan komponentlarga (k_x, k_y) ega bo'lgan ikki o'lchovli fazodagi to'lqin vektorining moduli.



5.4-rasm. O'zgarmas energiyaning izoliniyalari

Foton xuddi shunday spektrga ega, shuning uchun grafendagi kvazi zarrachalar nol samarali massaga ega deyiladi. v_F Fermi tezligi yorug'likning "samarali" tezligi rolini o'ynaydi.

Qalin qora olti burchakli birinchi Brilluyen zonasi hisoblanadi. Birinchi Brilluyen zonasining chekkasidagi qora doiralar yaqinida tashuvchilar dispersiyasi qonuni chiziqli bo'ladi. K va K' noekivalent to'lqin vektorlariga ega bo'lgan k -fazoda ikkita sohalarni bildiradi. Shunday qilib, grafen ikki sohali yarim metal hisoblanadi va turli sohalardan (K, K') elektronlar va kovaklarning o'zini tutishlarini hisobga olish zarur.

Chiziqli dispersiya qonuni holatlarning zichligini energiyaga bog‘liq bo‘lmaydigan parabolik dispersiya qonuniga ega bo‘lgan oddiy ikki o‘lchamli tizimlardan farqli ravishda holatlar zichligini energiyaga chiziqli bog‘liqligiga olib keladi.

Grafendagi holatlar zichligi standart quyidagi usulda beriladi:

$$N = g_s g_v \int \frac{dk_x dk_y}{(2\pi)^2} = g_s g_v \int \frac{2\pi k dk}{(2\pi)^2} = \int \frac{g_s g_v |E|}{2\pi \hbar^2 v_F^2} dE, \quad (5.2)$$

bu yerda g_s va g_v - mos ravishda spin va sohaviy hosila, integral ostida ifoda qidirilayotgan holatlar zichligi (yuza birligida):

$$G(E) = \frac{g_s g_v}{2\pi \hbar^2 v_F^2} |E|$$

Energiya moduli elektron va teshiklarni bitta formulada tasvirlash uchun ishlatiladi. Bu yerdan ko‘rinib turibdiki, nolga teng energiyada holatlar zichligi nolga teng bo‘ladi, ya‘ni tashuvchilar bo‘lmaydi (nolga teng haroratda).

Elektronlar konsentratsiyasi energiya bo‘yicha integral bilan beriladi:

$$n = \int_0^{\infty} \frac{v(E) dE}{1 + \exp \frac{E - E_F}{kT}}, \quad (5.3)$$

bu yerda E_F - Fermi sathi. Agar harorat Fermi sathiga nisbatan past bo‘lsa, u holda hosila elektron gaz holi bilan cheklanish mumkin:

$$n = \int_0^{E_F} \frac{g_s g_v |E|}{2\pi \hbar^2 v_F^2} dE = \frac{g_s g_v E_F^2}{4\pi \hbar^2 v_F^2}. \quad (5.4)$$

Chiziqli dispersiya qonuni tufayli grafendagi elektronlar va kovaklarning samarali massasi nolga teng. Ammo magnit maydonida elektronning yopiq orbitadagi harakatiga bog‘liq bo‘lgan siklotron massa vujudga keladi.

Erkin holatdagi ideal ikki o‘lchamli yupqa qatlam uning termodinamik beqarorligi tufayli olinmaydi. Ammo, agar yupqa qatlamda nuqsonlar bo‘lsa, u holda bunday "noideal" yupqa qatlam taglik bilan kontaktsiz mavjud bo‘lishi mumkin. Osilgan grafenga mexanik tebranishlar chasto-

tasining o'zgarishini massa, kuch va zaryadni aniqlash uchun, ya'ni yuqori sezgir sensor sifatida ishlatish taklif etiladigan membrana sifatida qo'llash mumkin. Erkin osilgan grafen yupqa qatlamlaridagi $2 \times 10^6 \text{ sm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ harakatchanlikka yetishi mumkin.

Chiziqli dispersiya qonuni va ikki o'lchamli tuzilma natijasida grafenda noyob kvant samaralari kuzatiladi.

Grafenda nooddiy kvant Xoll samarasi (XKS) kuzatiladi, u elektronlar va kovaklarning nolga teng samarali massasi tufayli, o'tkazuvchanlik tenzorining nodiagonalli komponentiga bog'liqligiga plato o'tkazuvchanlik kvantining $\sigma_{xy} = \pm(|n| + 1/2)4e^2/h$ yarim butun sonli qiymatlarga mos keladi (4 ko'paytuvchi energiyaning to'rt barobar hosilasi tufayli paydo bo'ladi). XKS qarshilik etaloni sifatida ishlatilishi mumkin, chunki grafenda kuzatiladigan platoning $h/2e^2$ ga teng sonli qiymati yaxshi aniqlikda takrorlanadi. XKSning grafendagi afzalligi shundaki, u xona haroratida kuzatiladi (20 Tdan yuqori magnit maydonlarda).

Grafening yana bir o'ziga xos xususiyati mos emaslikning (xiralnost) mavjudligi hisoblanadi. Grafenda zarrachalar uchun mos emaslik deyiladigan kattalik mavjud, u spinning harakat yo'nalishiga proeksiyasi (pseudospin) hisoblanadi: elektronlar uchun mos emaslik musbat, kovaklar uchun esa manfiy bo'ladi.

Grafendagi mos emaslikning saqlanishi Kleyn paradoksi kabi hodisaga olib keladi. Zarracha balandroq to'siqni osonroq yengadi. Umuman olganda, Kleyn paradoksi grafen zarrachalarini lokallashtirishni qiyinlashishiga olib keladi, bu esa o'z navbatida, masalan, grafendagi tashuvchilarning yuqori harakatchanligiga olib keladi.

5.2.2. Fullerenlar

1985 yilda bir guruh tadqiqotchilar - Robert Kyorl, Xarold Kroto, Richard Smolli, Xis va O'Brayen qattiq jismni lazer nurlanishi (ablyasiyasi) natijasida olingan grafit bug'larining massa spektrlarini tadqiq qilishdi va 60 va 70 uglerod atomlaridan tashkil topgan klasterlarga mos keladigan maksimal amplitudali eng yuqori nuqtalarni topishdi. Ular bu eng yuqori nuqtalar C_{60} va C_{70} molekullarga mos kelishini taklif qilishdi va C_{60} molekula I_h simmetriyaning kesik ikosaedri shakliga ega degan farazni ilgari surishdi. Uglerodning ko'p qirrali klasterlari fullerenlar deb ataldi, eng keng tarqalgan C_{60} molekulasi o'z binolarining gumbazlarini qurish uchun barcha fullerenlar molekulyar karkaslarining asosiy tuzil-

maviy elementlari bo'lgan beshburchak va olti burchakli gumbazlarni qurish uchun qo'llagan amerikalik me'mor Buckminster Fuller nomi bo'yicha buckminster fulleren hisoblanadi. Fullerenlarning ochilishi uchun Kroto, Smolli va Kyorlga 1996 yilda kimyo bo'yicha Nobel mukofoti berilgan.

Fullerenlar oilasining eng ko'p o'rganilgan a'zosi - fulleren (C_{60}) bo'lib, unda uglerod atomlari 20 olti burchaklar va 12 beshburchaklar va futbol to'piga o'xshash kesik ikosaedri hosil qiladi (tabiatda juda kam uchraydigan ideal shakl sifatida). C_{60} fulleren uglerodining har bir atomi bir vaqtning o'zida ikkita olti burchakka va bitta beshburchakka tegishli bo'ladi, u holda C_{60} fullerenidagi barcha atomlar ekvivalent hisoblanadi, bu ^{13}C izotopining yadrosi magnit rezonansi (YAMR) spektri bilan tasdiqlanadi, u faqat bitta liniyani o'z ichiga oladi. Fullerenning molekulyar kristalli yarim ta'qiqlangan zonasining kengligi ~ 1.5 eV bo'lgan yarim-o'tkazgich hisoblanadi, uning xususiyatlari ko'p jihatdan boshqa yarim-o'tkazgichlarning xususiyatlariga o'xshaydi va elektronikada an'anaviy qo'llaniladigan yangi material sifatida qaraladi: diod, tranzistor, fotoelement va boshqalar. Kremniyga qaraganda fullerenlarning afzalligi bilan kichik fotojavob vaqti (birlab nslar) hisoblanadi. Ammo kislorodning fulleren yupqa qatlamlarining o'tkazuvchanligiga ta'siri sezilarli kamchilik bo'ldi va himoya qoplamalarining zarurati paydo bo'ldi. Shu ma'noda, mustaqil nanoo'lchanli qurilma sifatida fulleren molekulasidan foydalanish yanada istiqbolli hisoblanadi.

Kichik javob vaqti fullerenlardan optik zatvorlar, lazer nurlanishlar cheklagichilari va asllik modulyatorlari sifatida foydalanish imkoniyatini beradi. Biroq, qator sabablarga ko'ra, fullerenlar uchun bu yerda an'anaviy materiallar bilan raqobatlashish qiyin. Yuqori narx, shishalardagi dispersiyaning murakkabligi, havoda tez oksidlanish, yuqori bo'lmagan nochiziqli sezuvchanlik koeffitsientlari va optik nurlanishni cheklashning yuqori bo'sag'asi fullerenlarni amalda qo'llashda jiddiy qiyinchiliklarni keltirib chiqaradi.

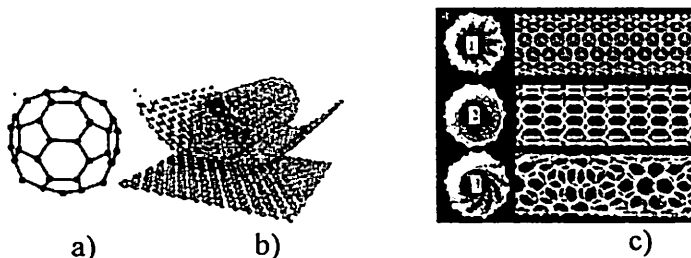
5.2.3. Uglerodli nanoquvurlar

Uglerod nanoquvurlarga (UNQ) ma'lum bir tarzda quvurlarga o'ralgan grafen qatlamlari sifatida qarash mumkin. UNQlar besh a'zoli uglerod sikllari ishtirokidagi fullerenning yarmi sifatida hosil bo'lgan yarim shar shaklidagi kallak bilan tugaydi. UNQlar bir devorli va agar

ular bir nechta grafenli qatlamlardan hosil bo'lsa, ko'p devorli bo'lishi mumkin (5.5-rasm).

Nanoquvurni (n, m) olish uchun grafit tekisligi uzlukli chiziqlar yo'nalishi bo'yicha kesilishi va R vektori yo'nalishi bo'yicha o'ralishi kerak.

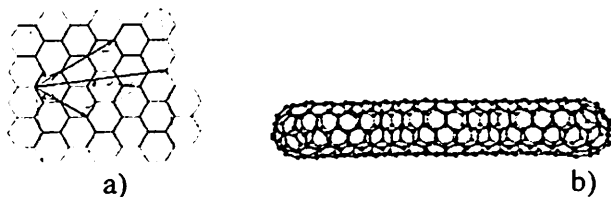
Agar fullerenlar uglerodning molekulyar shakli bo'lsa, u holda UNQlar nanoklasterlar va qattiq jismlarning xususiyatlarini o'zida birlashtiradi. UNQlar yuqori haroratlarda uglerodning fizik-kimyoviy o'zgarishlari natijasida hosil bo'ladi. UNQLarni olishning bir necha ma'lum usullari - grafitning elektr yoy bilan changlantirilishi, uni lazer yoki quyosh nurlari yordamida ablyasiyalash va uglevodorodlarning katalitik parchalanishi usullari mavjud. Bir millionga yaqin uglerod atomlaridan tashkil topgan molekularlar bo'lgan uglerod nanoquvurlari katta qiziqish uyg'otadi.



5.5-rasm. Uglerodning allotropik shakllarining tuzilmalari: fulleren C_{60} molekularlari (a), nanoquvurga o'ralishi jarayonidam grafen to'r (b), UNQ (c): 1 – "zigzag" turdagi nanoquvurning mos kelmaslik tuzilmasi; 2 - "o'rindiq" turdagi; 3 – nanoquvurning mos kelmaslik tuzilmasi (mos kelmaslik - ob'yektning tekis oynadagi tasviri bilan mos kelmasligi)

Bu bashoratlashni bir vaqtning o'zida amerikalik J. Mintimir va rus olimi Leonid Chernozatonskiy bergan. Bunday grafit "cho'pi" qator o'ziga xos xususiyatlarga ega: tuzilishiga bog'liq ravishda bunday quvurlar ham o'tkazgich, ham yarimo'tkazgich bo'lishi mumkin. UNQlar yuqori mustahkamlikka ega (po'latdan bir tartibga katta), shuningdek, kutilmagan elektr, magnit va optik o'ziga xususiyatlarning butun spektriga ega.

Grafen silindrga o'ralishida (5.6-rasm), bitta devorli nanoquvur olinadi.



5.6-rasm. Uglerodli nanoquvur: a) molekulyar shakli; b) silindrga o'ralgan shakli

Grafit tekisligiga o'ralishi sxemasiga bog'liq ravishda nanoquvurlar metall yoki yarimo'tkazgichlar xususiyatlarga ega bo'lishi mumkin.

1991 yilda Yaponiyadagi NEC laboratoriyasi tadqiqotchisi Sumio Ijima tomonidan kashf etilgan nanoquvurlar mazmunan naychaga o'ralgan "grafit to'rlari" shaklidagi silindrsimon uglerod hosilalari, ya'ni faqat olmos va grafitga o'xshash uglerod atomlaridan qurilgan ulkan molekularlar hisoblanadi (5.7-rasm). Qizig'i shundaki, nazariy jihatdan nanoquvurlar ularni real sintezlashdan bir necha oy oldin bashorat qilingan.



5.7-rasm. Elektron mikroskop yordamida olingan UNQlar massivlari (a) kattalashtirilgan bitta UNQ (b) fotosuratleri

Nazariyaga muvofiq, ideal nanoquvurlar katta qiymatli elektr tokini deyarli atrofga issiqlik chiqarmasdan o'tkaza oladi [9, 10]. Bunday qiymatlarda klassik o'tkazgich bir zumda bug'lanadi.

Yarimo'tkazgichli geterotuzilmalarni yaratishda ham UNQlardan foydalanish ko'zda tutiladi. Nanoquvurni o'stirish jarayonida metall-yarimo'tkazgich tizimini amalga oshirish uchun uning kristalli tuzilma-

sga mexanik nuqsonni kiritish yetarli bo'ladi. Shunday qilib, materialning bir qismi metall, ikkinchi qismi yarimo'tkazgichlar xususiyatlarga ega bo'ladi.

Uglerodli quvurlar emission katodlarda, yangi materiallar va qoplamalarni yaratishda qo'shimcha sifatida va boshqa sohalarda qo'llanilishi mumkin.

5.3. Nanoelektronikadagi nanotuzilmalar

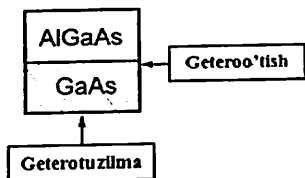
5.3.1. Nanoelektronikadagi geterotuzilmalar

Yarimo'tkazgichli geterotuzilma ikki yoki undan ortiq turli yarimo'tkazgichli moddalardan (materiallardan) tayyorlangan sun'iy tuzilma bo'lib, unda muhim rolni o'tish qatlami, ya'ni ikki moddaning (materiallarning) bo'linishi chegarasi o'ynaydi. Ma'lum geterotuzilmalar tarkibiga II-VI guruh elementlari (Zn, Cd, Hg, Al, Ga, In, Si, Ge, P, As, Sb, S, Se, Te), $A^{III}B^V$ birikmalari va ularning qattiq eritmaları, shuningdek, $A^{II}B^{VI}$ birikmalari kiradi. $A^{III}B^V$ turdagi birikmalardan GaAs galliy arsenidi va GaN galliy nitridi, qattiq eritmalaridan $Al_xGa_{1-x}As$ eng ko'p ishlatiladi. Qattiq eritmalaridan foydalanish tarkib sakrashsimon emas, balki uzluksiz o'zgaradigan va ta'qiqlangan zonaning kengligi uzluksiz o'zgaradigan geterotuzilmalarni yaratishga imkon beradi.

Geterotuzilmalarni tayyorlash uchun kontaktlashadigan materiallarning kristall panjarasi parametrlarini mos kelishi (qiymat jihatidan yaqinlik) muhim ahamiyatga ega. Agar panjara doimiylari bilan kuchli farq qiladigan ikkita birikmalar qatlamlari birin-ketin o'stirilsa, u holda bo'linish chegarasida katta deformatsiyalar paydo bo'ladi va mos kelmaydigan dislokatsiyalar paydo bo'ladi.

Shu munosabat bilan, geterotuzilmalarni tayyorlash uchun ko'pincha AlAs - GaAs tizimining qattiq eritmaları tishlatiladi, chunki ular deyarli bir xil panjara parametrlariga ega. Bu holda GaAs monokristallari geterotuzilmalarni o'stirish uchun ideal taglik hisoblanadi. Geterotuzilmalarga ko'plab misollar ma'lum, tarixiy nuqtai nazardan eng muhimlari *GaAs/AlGaAs* geterotuzilmasi (5.8-rasm) hisoblanadi. Aynan bu geterotuzilmaning alohida tarixiy roli unda birinchi geterolazerlar amalga oshirilganligiga bog'liq. Yana bir tabiiy taglik - InP indiy fosfid bo'lib, u GaAs - InAs, AlAs - AlSb va boshqa qattiq eritmalar bilan birgalikda ishlatiladi. Yupqa qatlamli getero tuzilmalarni yaratishda katta yutuq

molekulyar-nurli epitaksiya, metall-organik birikmalardan gaz fazali epitaksiya va suyuq fazali epitaksiya usullari bilan yupqa qatlamlarni o‘stirish texnologiyalarining paydo bo‘lishi bilan yuz berdi.

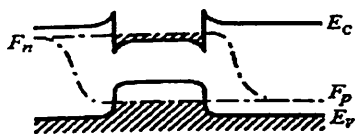


5.8-rasm. GaAs/AlGaAs geterotuzilmaning sxematik ko‘rinishi

Bir-birlariga juda yaqin joylashgan juda keskin bo‘linish chegarasiga ega bo‘lgan geterotuzilmalarni o‘stirish imkoniyati paydo bo‘ldi, bu tizimda o‘lchamli kvant samaralari hal qiluvchi rolni o‘ynaydi. Kichikroq ta‘qiqlangan zona kengligiga ega bo‘lgan qatlamlar **kvant chuqurchalari** (KCH) bo‘ladi. KCHlarda o‘rta tor zona qatlamining qalinligi bir necha o‘nlab nanometrlarni tashkil qiladi, bu esa o‘lchamli kvantlashning ta‘siri tufayli elektron sathlarning bo‘linishiga olib keladi.

Geteroo‘tish geterotuzilmaning ikkita qismlarini ajratadigan chegaraviy qatlam hisoblanadi. Geteroo‘tish deb ta‘qiqlangan zonaning kengligi bilan farqlanadigan kimyoviy tarkibi bo‘yicha turlicha o‘tkazgichlarning kontaktiga aytiladi. Yarim o‘tkazgich ichida katta ta‘qiqlangan zona kengligiga ega bo‘lgan qo‘sh geterotuzilmaning zonaviy diagrammasi sxematik ravishda kichik ta‘qiqlangan zona kengligiga ega bo‘lgan yarimo‘tkazgichli qatlamga (bir necha nanometrlardagi) ega bo‘ladi va 5.9-rasmda tasvirlangan. Ta‘kidlaymizki, zaryad tashuvchilar (elektronlar va teshiklar) o‘rta qatlamda bo‘lishi energetik jihatdan foydali hisoblanadi.

E_v va F_p egri chiziqlar orasidagi uzlukli chiziqsiz qism kovaklar bilan to‘ldirilgan soha, E_c va F_n egri chiziqlari orasidagi uzlukli chizikli qism elektronlar bilan to‘ldirilgan soha hisoblanadi. F_p va F_n - mos ravishda kovaklar va elektronlar uchun Fermi sathlarining pozitsiyalari hisoblanadi.

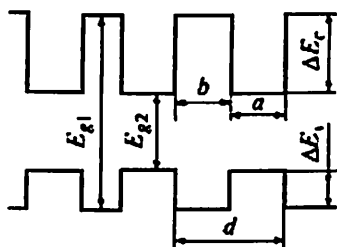


5.9-rasm. Qo‘sh geterotuzilmaning zonaviy diagrammasi: E_c - o‘tkazuvchanlik zonasining cheti, E_v - valentlik zonasining cheti

O'ta panjara yarim o'tkazgichning navbat-navbat keladigan torroq (chuqurcha) va kengroq (to'siq) zonali qatlamlari ketma-ketligidan iborat bo'lib, mazmunan, bog'langan kvant chuqurchalari to'plami hisoblanadi. 1970 yilda L. Esaki va R. Ssuning yangi turdagi yarimo'tkazgichli geterotuzilmalarning xususiyatlarini o'rganishga bag'ishlangan asari paydo bo'ldi.

Agar alohida nanoo'lchamli ob'yektlar bir-biriga shunchalik yaqin joylashsaki, ular orasida zaryad tashuvchilar tunnellashishi mumkin bo'lsa, u holda bunday nanotuzilmalarda yangi kvant samaralari paydo bo'ladi.

5.10-rasmda keltirilgan juda yupqa (birlab nanometrli) keng zonali ajratish qatlamlariga ega bo'lgan parallel kvant chuqurchalari tizimini ko'rib chiqamiz. Bunda chuqurchalar endi mustaqil emas va keng zonali qatlam orqali tunnellashtirish hisobiga elektronlarni almashishi mumkin.



5.10-rasm. Parallel kvant chuqurchalar – o'ta panjara tizimi

Bunday tuzilmalarni odatda vertikal o'tkazishli konstruksiyalar deb atash qabul qilingan. Chizma kvant chuqurchalari tizimiga to'g'ri keladi, lekin bu tizim litografik protseduradan o'tkazilsa, oralarida vertikal o'tkazish mumkin bo'ladigan kvant tolalar yoki nuqtalarini olish mumkin. Bunday tuzilmalar qator nanoelektronika asboblari uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

Agar parallel qatlamlar soni katta bo'lsa (kamida bir necha o'nlab), sun'iy davriy tuzilmaga yoki o'ta panjaraga ega bo'lamiz. Qaysidir shartli darajada aytish mumkinki, o'ta panjara L. Esaki aytganidek, inson tomonidan "sun'iy yaratilgan kristall" hisoblanadi.

O'ta panjaralarning barcha o'ziga xos fizik xususiyatlarini aniqlaydigan eng muhim xususiyati bitalik kvant chuqurchasining spektriga qaraganda ularning energetik spektrning o'zgarishi hisoblanadi. O'ta panjaradagi elektronlar va kovaklarga geterochegaralarda zonalarining bo'linishlari natijasida hosil bo'lgan qo'shimcha to'rtburchakli $V(z)$

potensial ta'sir qiladi. Bu potensial kristalli panjara potentsiali kabi davriy hisoblanadi va unga davriy potensialga ega Shredinger tenglamasining yechimi qo'llaniladi.

O'ta panjaraning z o'qi bo'ylab tashuvchilarning harakati p_z kvazi impuls yordamida tavsiflanishi mumkin, energiya esa $h/(a+b)$ davrlil davriy funksiya hisoblanadi. Energetik spektr zonal xarakterga ega va ruxsat etilgan va ta'qiqlangan zonalarining almashinuvi hisoblanadi. Bu dastlabki o'tkazuvchanlik zonasi (elektronlar uchun) va valentlik zonasi-ni (kovaklar uchun) bo'linishining natijasi hisoblanadi, shuning uchun ular kichik zonalar deyiladi. O'ta panjara va oddiy kristalli panjara energetik spektrlari orasida katta farqlar mavjud. Birinchidan, faqat o'ta panjaraning z o'qi bo'ylab harakatlanish zonaviy spektri bilan tavsiflanadi. Qatlamlar tekisligida tashuvchilarning harakatlanishi erkin va o'ta panjaraning butun spektri yuqorida ko'rib chiqilgan ikki o'lchamli tizimlardagidek keskin anizotrop hisoblanadi.

Ikkinchidan, o'ta panjaraning davri kristall panjara parametridan ancha katta bo'lganligi sababli, spektrdagi energiya va impulslarning xarakterli masshtabi sezilarli kichikroq bo'ladi. Kichik zonalarining xarakterli kengliklari elektron-voltning o'ndan bir yoki yuzdan bir ulushlari bilan o'lchanadi, bu elektronning issiqlik energiyasi bilan tenglashadi. Shuning uchun, kichik zona bo'yicha harakatlanishni doimiy samarali massa bilan tavsiflab bo'lmaydi. O'ta panjara o'qi yo'nalishidagi dinamika murakkab xarakterga ega, bu qator noodatiy samaralarning sababi bo'lib xizmat qiladi.

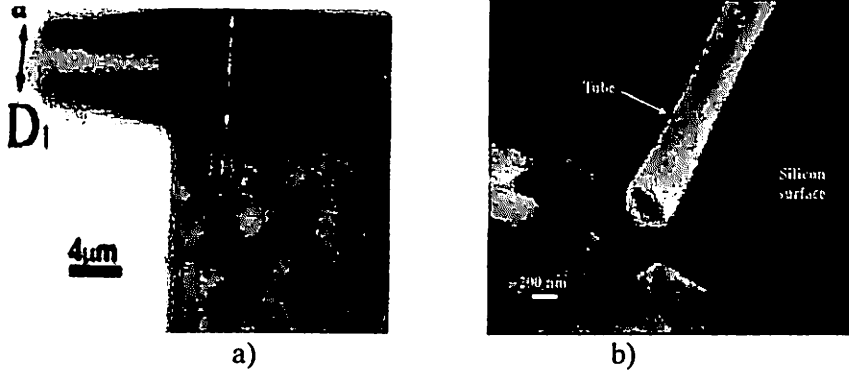
5.3.2. Yarimo'tkazgichli va metalli nanotuzilmalar

Fanlar akademiyasi A. V. Rjanov nomidagi yarimo'tkazgichlar fizikasi instituti Sibir bo'limida RAS GaAs, InP, InAs va Si tagliklarida o'stirilgan AIAs qatlamli kuchlangan geterotuzilmalar yordamida yarimo'tkazgichli nanoqobiqlarni olish texnologiyasini ishlab chiqildi.

InGaAs/GaAs yupqa qatlamlaridan eksperimental tarzda ichki diametri 2 nm dan 100 nm gacha bo'lgan quvurlar olindi. Quvurlarning taglikdagi joylashuvi, uzunligi va yo'nalishi litografiya yordamida turli geometriyali (to'rtburchakli, tasmali va boshqalar) dastlabki mezatuzilmalarni litografiyalash yordamida shakllantirish bilan berildi.

Mezaning atrofidagi soha AIAs qatlamiga selektiv ishlov bergichning kirishini ta'minlash uchun taglikkacha ishlov berilgan. AIAs qatla-

miga selektiv ishlov berish natijasida, kuchlangan geteroyupqa qatlam taglik bilan bog'lanishdan ajratildi va quvurga o'raldi. O'ramlar soni AlAsga ishlov berish vaqti orqali aniqlandi va 40 ga yetishi mumkin edi. Quvur AlAs qatlami olinmagan joyda taglikka mahkamlanib qoladi (5.11-rasm).

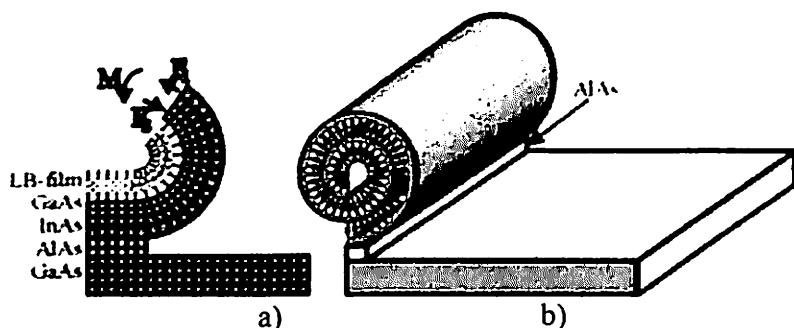


5.11-rasm. 40 ta o'ramlarga ega bo'lgan InGaAs/GaAs nanoquvurning fotosurati: D_1 va D_2 - mos ravishda ichki va tashqi diametrlari (a) va metall Au/Ti nanoquvurning elektron mikroskopik tasviri (b)

O'qlar bilan kuchlangan geterotuzilmaning o'ralishi yo'nalishlari ko'rsatilgan. Tadqiq qilingan quvurlarning odatda uzunligi 1-2 mm, nanoquvurlarning ichki diametri esa 10 nmdan kichikni tashkil qiladi.

Mikro va nanoquvurlarni shakllantirishning taklif qilingan usuli MLE usulida o'stiriladigan yarimo'tkazgich, metall va dielektrik yupqa qatlamlarda qo'llanilishi mumkin. [14] ishda diametri 10 mkmdan 10 nmgacha bo'lgan SiGe/Si quvurlarini ishlab chiqarish texnologiyasi tavsiflangan, kremniyli taglikda Ti/Au yupqa qatlamli metall mikro- va nanoquvurlar tavsirlangan (5.11b-rasm).

5.12-rasmda sxematik ravishda o'ramlar orasidagi masofa Legmyur-Blodjett yupqa qatlamining qalinligi orqali aniqlanadigan radial yo'nalishida davriy tuzilmani yaratishga imkon beradigan usul tasvirlangan. L-B yupqa qatlamlari standart usulda dastlabki tuzilma yuzasiga yuritildi. Shunday qilib, InGaAs/GaAs ikki qatlamli va 2, 4, 6 va 20 ta bir qatlamli L-B yupqa qatlamlar asosida gibril mikro- va nanoquvurlar shakllantirildi. Quvurning ichki diametri 80 nmdan 8 mkmgacha o'zgartirildi.



5.12-rasm. Gibrid nanoquvurlarni shakllantirish jarayoni: a) taglik bilan bog'lanishdan bo'shatish va dastlabki gibrid Legmyur-Blodjett/InAs/GaAs yupqa qatlamining egilishi; b) yupqa qatlamni quvurga o'z-o'zidan o'ralishi

O'rama geteroyupqa qatlamlar keng materiallar to'plamidan, shu jumladan InGaAs/GaAs, SiGe/Si, Lengmyur-Blodjett yupqa qatlamlari, shuningdek, metallar va dielektriklardan tayyorlanishi mumkin. Mikro- va nanoquvurlar yuqori haroratlar ta'siriga barqaror (o'rama qatlamlar tekislar qatlamlarga qaraganda kichik kuchlanganliklarga ega). MLE geterotuzilmalarining yuqori sifati qalinligi bo'yicha silliq, bir xil bir necha santimetrlargacha uzunlikdagi o'rama geterotuzilmalarni olish imkonini beradi.

O'rama geterotuzilmalarni shakllantirish usuli yarimo'tkazgichli asboblarning integral sxemalarni tayyorlash texnologiyasi bilan yaxshi birlashtiriladi. O'rama geterotuzilmalarning fizik xossalari sintezlanadigan geterotuzilma materiallarini tanlash bosqichida aniqlanadi.

Nazorat savollari

1. Mikroelektronika materiali sifatida kremniyning afzalliklari va kamchiliklari nimada?
2. Germaniyni qo'llanishiga misollar keltiring.
3. GaAs va GaN birikmalarining qo'llanilishiga misollar keltiring.
4. ZnO, CdS va SIS birikmalarining qo'llanilishiga misollar keltiring.
5. Grafen nima va uni olish usullarini tavsiflang?
6. Grafenni zonaviy tuzilmasini tushuntiring.
7. Grafendagi elektron tashishning o'ziga xos xususiyatlari nimada?
8. Fullerenlar nima va ularning asosiy xossalari qanday?

9. Uglrodli nanoquvur nima?
10. Uglrodli nanoquvurning asosiy xossalarini tushuntiring?
11. Geterotuzilma nima va uning zonaviy tuzilmasi qanday?
12. O'ta panjara nima va uning xususiyatlarining o'ziga xosligi nimada?
13. Yarimo'tkazgichli va metalli nanotuzilmalarga misollar ?

6 BOB. NANOELEKTRONIKA ASBOBLARI VA QURILMALARI

6.1. NANOelektron tranzistorlar

6.1.1. Kremniyli nanotranzistorlar

Kremniyli nanotranzistorlar mikroelektronikaning zamonaviy elementlar bazasi bo'lgan mikroelektron tranzistorlar asosida paydo bo'ldi. Zamonaviy nanoelektronikaning asosini tashkil etadigan asosiy kremniyli tuzilma kremniyli MDYAO'-tuzilma hisoblanadi. Zamonaviy MDYAO'-tranzistorlarda kanal (va zatvor) uzunligi 30 nm dan kichikni, zatvor osti oksidining qalinligi esa bir necha atomli qatlamlarini tashkil etadi. Bu mikroprotsessorlarning tezkorligini oshirishga va energiya iste'molini kamaytirishga imkon berdi. Shu bilan birga, o'tish toklari, shu jumladan oksidli qatlam orqali tunnel toki hisobiga oshdi. Binobarin, o'tish toklari hatto uzilgan tranzistor uchun ham juda sezilarli bo'ladi. Istok-stok qalinligining kamayishi bilan ularning qarshiligi oshadi, bu esa tranzistorni qayta ulanishi uchun katta kuchlanishni talab qiladi, bu o'z navbatida, iste'mol quvvatini ortishiga olib keladi. Kuchlanishning ortishi bilan atom qatlamlaridan dielektrik qatlamning teshilishi xavfi ortadi. Kanal uzunligining keyingi kamayishi kanaldagi legirlash darajasini 10 smgacha oshirilishini talab qiladi. Bu tashuvchilarning harakatchanligining pasayishiga va tranzistorning ochilishi bo'sag'asining oshishiga olib keladi.

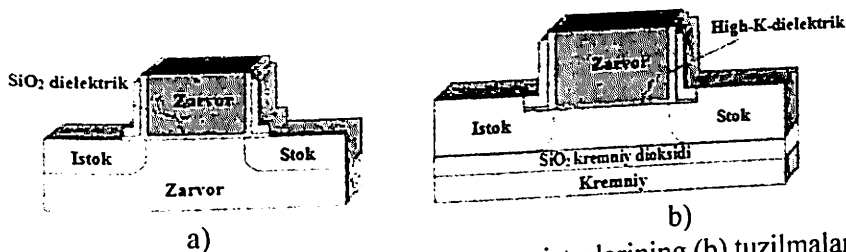
Nanometrli diapazoni texnologiyalari keyingi yarim asrda sanoat texnologiyasi bo'ladi deb taxmin qilinadi. Tadqiqotchilar parametrlarni masshtablashtirishda inqirozdan chiqishning bir necha usullarini taklif qilishdi :

- o'ta yupqa asosli (Ultrathin Body-UTB) IK-tranzistorlar (izolyatordagi kremniy);
- boshqariladigan kanal o'tkazuvchanligiga ega qurilmalar;
- ikki zatvorli tranzistorlar;
- suzgichga o'xshash maydon tranzistor (Fin FET);
- bitta elektronli tranzistorlar.

IK-tranzistorlar tashuvchilari to'liq yoki qisman siyraklashgan yupqa asosga ega. Taglikning siyraklashishi tufayli asbobning inversion qatlamidagi elektr maydon kuchli legirlangan kanal sohasiga ega bo'lgan an'anaviy qurilmalarga qaraganda sezilarli kichik bo'ladi.

O'ta yupqa asosli tuzilmalar turli texnologiyalar bo'yicha ishlab chiqarilgan. Ulardan biri bo'yicha HP Intel firmasi to'liq siyraklangan 30 nm qalinlikdagi kremniy qatlamli asosli TeraNertz tranzistorini yaratdi, ular uchun o'tishning kichik sig'imi va nurlanishga yuqori barqarorlik xos bo'ldi. Bu turdagi tranzistorlar yuqori tezkorlikka va past quvvat iste'moliga ega. Biroq, yupqa taglikli asboblarda sezilarli parazit qarshilikka ega. Bu parazit qarshilikni kamaytirish uchun istok-stok sohalari ko'tarildi.

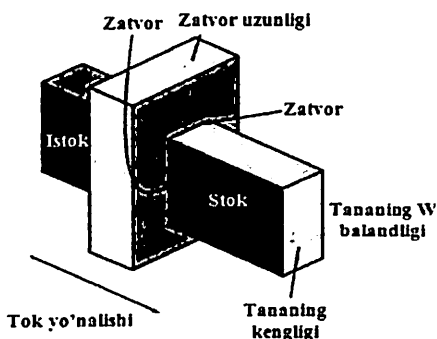
Tranzistorning butun tuzilmas ostidagi oksidli qatlamni shakllantirish dielektrik turiga bog'liq ravishda o'tish tokini 2-4 tartibga kamaytirish imkonini beradi. 6.1-rasmda an'anaviy va TeraNertz tranzistorlarining tuzilmalari tasvirlangan.



6.1-rasm IK-transistor (a) va TeraHertz tranzistorlarining (b) tuzilmalari

Bunday tranzistorlar tuzilmalari ularning asosida 20 nm topologik me'yorlar, 20 GGgacha tezkorlik va 1 V ishchi kuchlanishga ega bo'lgan mikroprotsessorlar yaratishga imkon beradi.

Ikki zatvorli tranzistorlarda tranzistor tokini ikki baravar oshirishga erishildi. Ikki zatvorli tranzistorlarga misollardan biri FinFET-tranzistor (Fin Field Effect Transistor) konstruksiyasi hisoblanadi. U o'z nomini konstruktiv o'ziga xos xususiyatlari tufayli oldi. Bu asbobda yupqa kremniy tana suzgich (fin) shakliga ega va zatvor bilan o'ralgan (6.2-rasm). Zatvor kremniy tananing har ikki tomonida joylashgan ikkita o'z-o'zidan mos keladigan kanallarni hosil qiladi. Tananing old tomondan chiqadigan bo'rtma qism istok, orqa qismi stok hisoblanadi. Kanallar plastinaning har ikkala tomonlaridagi zatvorlardagi kuchlanish orqali induksiyalanadi.



6.2-rasm. FinFET-tranzistorning tuzilmasi

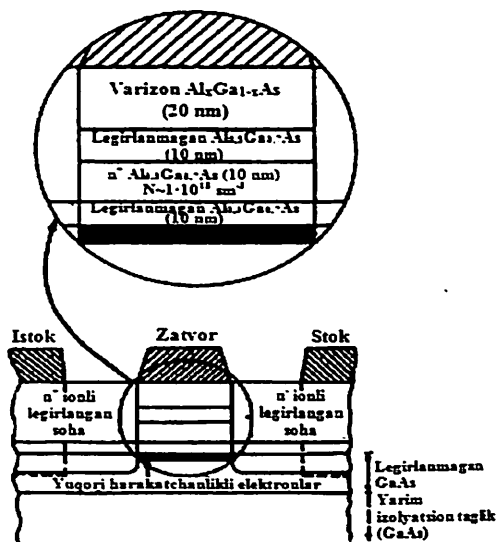
Tranzistordagi tok tananing tekisligiga parallel tekislikda oqib o'tadi. Asbobning aktiv kengligi tananing balandligi - suzgichga teng. Bu tanani istok va stokni tashkil etuvchi ko'plab ustunchalarni parallel kiritish yo'li bilan oshirish mumkin. Shunday qilib, tranzistorning aktiv sohasi shakllantiriladi. FinFET-tranzistorning uch o'lchovli konstruksiyasi issiqlik ajratilishiga yo'qotishlarni sezilarli kamaytiradi. FinFET-tranzistorni tayyorlash texnologik jarayoni fotolitografiya usullari yordamida qalindigi 20 nm va balandligi 180 nm bo'lgan suzgich-qo'shimchani shakllantirishni nazarda tutadi. Stok-istok sohalari plastinaning to'rt tomonidan 45° burchak ostida ionli implantatsiya yordamida tayyorlanadi. Kanal uzunligi taxminan 30 nm bo'lgan tranzistorlarni yaratishga erishiladi.

6.1.2. Geterotranzistorlar

Geterotranzistor bir yoki bir nechta geteroo'tishlarga ega bo'lgan tranzistor hisoblanadi. Geteroo'tishlarning zonaviy diagrammalari zaryad tashuvchilarning geteroo'tish tekisligiga perpendikulyar yo'nalishda harakatlanishini cheklash uchun ishlatilishi mumkin bo'lgan zonalarining bo'linishlariga ega.

Geteroo'tishlarda zaryad tashuvchilar harakatlanish yo'nalishiga bog'liq ravishda o'zini tutadi. Geteroo'tishlar yupqa qatlamlar yordamida shakllantiriladi, shuning uchun qatlamga perpendikulyar yo'nalishda zaryad tashuvchilarning energetik spektri diskret xarakterga ega bo'ladi. Qatlam tekisligining boshqa ikki yo'nalishlarida spektr uzluksiz xarakterga ega bo'ladi va zonaviy tuzilma saqlanib qoladi. 6.3-rasmda geterotranzistorning konstruksiyasi keltirilgan. Geterotranzistor-larning

tuzilmalari MLE usulida o'z-o'zini moslashtirish texnologiyasi yordamida o'stiriladi. 2D tarkibida 300 K bo'lganda $6500 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ va 77 K bo'lganda $120\,000 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ odatiy harakatchanlik qiymatiga ega bo'lgan elektronlar mavjud bo'ladi. Elektronlar sirt zichliklarining mos qiymatlari mos ravishda $5,4 \times 10^{11} \text{ sm}^{-2}$ va $7,8 \times 10^{11} \text{ sm}^{-2}$ qiymatlarni tashkil etadi.

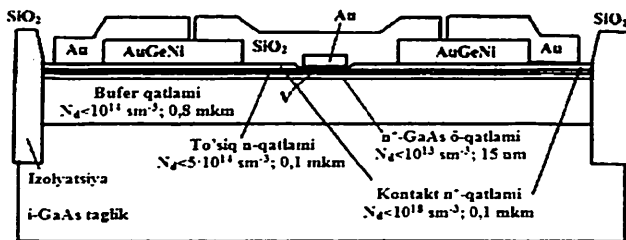


6.3-rasm. AlGaAs-GaAs asosidagi maydon geterotranzistoring sxemasi

Geterotranzistorlarning bir necha turlari mavjud.

Maydon tranzistorlar (Field-Effect Transistor) yoki FET -tranzistorlar VAXning maksimal solishtirma tikligi, shuningdek, chegaraviy chastota bilan tavsiflanadi. Kanal uzunligining kamayishi va passiv stok va istok sohalari qarshiliklarining kamayishida bu parametrlar yaxshilanadi. Eng mashhur aktiv element arsenid-galliy tuzilmasidagi (MESFET) Shottki zatvorli w-kanalli maydoniy tranzistor hisoblanadi (6.4-rasm).

Aktiv qatlam donorlarning yarim izolyatsion taglikka ionli implantatsiyalash usulida shakllantiriladi. Shottki zatvori oltin kontakt sifatida shakllantiriladi. Bunday tranzistoring bo'sag'aviy kuchlanishi legirlash darajasiga, kanal qalinligiga va zatvordan kanalga bo'lgan masofaga bog'liq.



6.4-rasm. GaAs asosidagi MESFET-tranzistorning tuzilmasi

Zatvor osti dielektrigi sifatida Shottki to'sig'i ostidagi elektronlar siyraklangan fazoviy zaryadli soha ishlatiladi. Kanal legirlangan aktiv qatlam va taglik orasida joylashgan yupqa kuchli legirlangan n^+ -GaAs qatlam hisoblanadi. Bu turdagi tranzistorlar 0,13 mikron tartibdagi kanal uzunligiga ega va 50 GGsli chastotada ishlaydi.

MESFET-tranzistorning kamchiliklariga komplementar tuzilmalarni shakllantirish uchun p -kanalli tranzistorlarni yaratishning qiyinligini kiritish kerak bo'ladi. Boshqa kamchilik donorlar konsentratsiyasi 10^{18} sm^{-3} bo'lganda kanalidagi elektronlar harakatchanligining kamayishi ($8000 \text{ sm} / (V \cdot s)$) hisoblanadi.

Elektronlar harakatchanligi yuqori bo'lgan geterotuzilmali maydon tranzistorlari yoki HEMT tranzistorlar (High Electron Mobility Transistor) katta VAX tikligiga ega. HEMT-tranzistorlarning ishlashi asosida kanal sifatida "kvant chuqurchasi"dan foydalanish g'oyasi yotadi. Kvant chuqurchada ikki o'lchamli elektron gaz (IEG) shakllantiriladi. Bir erkinlik darajasini yo'qotilishi tufayli tashuvchilarning harakatchanligi taxminan ikki barobar ortadi va tashuvchilarning samarali konsentratsiyasi ham oshadi.

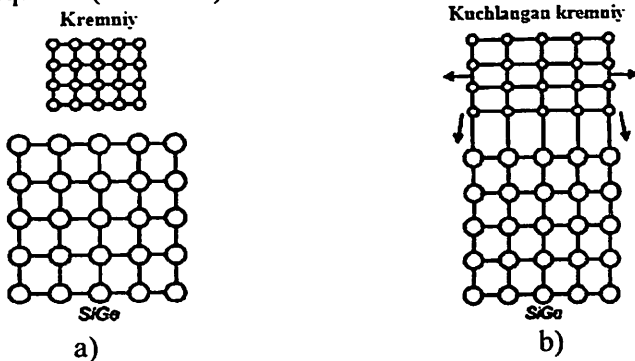
Geteroo'tish keng zonali $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yarimo'tkazgich va tor zonali i -GaAs qatlamdan shakllantiriladi. Ularning chegarasida taxminan 0,38 eVga E_s energiya sathining bo'linishi kuzatiladi. Zatvor osti dielektrigi sifatida energetik zonalarining egriligi tufayli elektronlar siyraklashgan keng zonali AlGaAs yarimo'tkazgich ishlatiladi. Kanal kengroq zonali o'tkazgich bilan chegaradagi tor zonali o'tkazgichda hosil bo'lgan potensial chuqurcha hisoblanadi. Bu kanalidagi elektronlarning sirt zichligi $2 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ ni tashkil qiladi.

$\text{A}^{\text{III}}\text{V}^{\text{V}}$ birikmalaridan tashqari, InGaAs, InGaP, InAlAs, InP birikmalari juda istiqbolli bo'lib chiqdi. Indiy asosidagi birikmalar elektronlarning yuqori harakatchanligi bilan ajralib turadi, o'tkazuvchanlik zonasining bo'linishi ΔE_c 0,5 eVga etadi. n -kanalli va p -kanalli HEMT tran-

zistorlari ishlab chiqilgan bo'lib, ularda tor zonali qatlamdagi, masalan, InGaP qatlamdagi teshiklar uchun potensial chuqurcha yaratiladi. Favqulodda sharoitlarda ishlash uchun quvvatli O'YUCH-qurilmalarda foydalanish uchun GaN va SIS asosidagi HEMT-tranzistorlar ishlab chiqilgan; bunday tranzistorlarda kanal tor zonali AlGaIn qatlamda shakllantiriladi.

AlGaIn/GaN asosidagi HEMT-tranzistorlar chastota va kuchaytirish xususiyatlariga bo'yicha AlGaAs/GaAs birikmalardagi tranzistorlarga yuqozadi, lekin ular ishchi tok zichligi, quvvat va istok-stok ishchi kuchlanishlari bo'yicha ulardan ustun turadi. Shuning uchun O'YUCH-yarimo'tkazgichli elektronikaning asosiy yo'nalishlaridan biri AlGaIn/GaN geterotuzilmalarda Shottki zatvorili geteroo'tishli tranzistorlarini yaratish hisoblanadi. 3.4 eV ta'qiqlangan zona kengligi GaN asosidagi tranzistorlar 500-600 °C gacha bo'lgan haroratlarda ishlash qobiliyatini saqlaydi. GaN-tranzistorlar asosida O'YUCH-diapazoni monolitik integral sxemalari (MIS) yaratiladi, ular aktiv fazalashtirilgan antennalar panjaralarining qabul qilish-uzatish modullarida keng qo'llaniladi.

MODFET-tranzistorlar Si/SiGe geterotuzilmasi asosida shakllantiriladi. Geterocheqaradagi panjara doimiylarining farqi 4,2%ni tashkil etadi, bu esa geterotuzilmaning yupqa qatlamida mexanik kuchanishlarni keltirib chiqaradi (6.5-rasm).



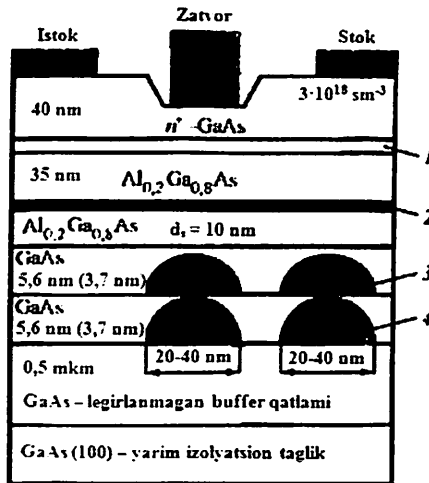
6.5-rasm. Kuchlangan kremniy qatlamining shakllanishi: a - Si va Si/SiGe kristall panjaralari; b – kuchlangan kremniy qatlami

SiGe turdagi tuzilma kremniyni SiGe tagligiga o'tqizish yo'li bilan olinadi. Bunda kuchlangan kremniy qatlami hosil bo'ladi. Bunday kremniyda tashuvchilar dreyfi tezligi oddiy kremniydagiga qaraganda 70%ga

yuqori bo‘ladi. Bu tranzistorlarning tezkorligini taxminan 40%ga oshirish imkonini beradi.

Si/SiGe₀₃ geteroo‘tishlari asosida shakllantirilgan tranzistorlar modulyasion legirlangan Shottki zatvorli tranzistorlar yoki MODFET-tranzistorlar nomini oldi. Bunday tranzistorlar kanalidagi elektronlar va kovaklarning harakatchanligi $t_p = 1300-2800 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ va $t_r = 800 - 1000 \text{ sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ qiymatlariga yetadi. Bu yuqori g_{max} va f_t qiymatlarini olish imkonini beradi. Bu turdagi tranzistorlarda komplementar juftlarni yaratish mumkin.

Kvant nuqtalaridagi tranzistorlar O‘YUCH-elektronika uchun juda istiqbolli asboblari turi hisoblanadi. Kvant nuqtali modulyasion-legirlangan tranzistorning tuzilmasi 6.6-rasmda tasvirlangan.



6.6-rasm. Kvant nuqtali geterotranzistorning tuzilmasi

Kvant nuqtalari ($10^3 - 10^5$ atomlardan tashkil topgan nol o‘lchamli kvant “qutilari”) ham an’anaviy yarimo‘tkazgichlar asosida, ham yangi materiallar, masalan, grafen asosida ham shakllantirilishi mumkin.

GaAs yarim izolyasion taglikka MLE usulida qalinligi taxminan 0,5 mkm bo‘lgan legirlanmagan GaAs bufer qatlami (1) yuritiladi; keyin qalinligi 0,7 dan 1,0 nmgacha bo‘lgan ikkita yupqa InAs qatlamlari (3, 4) yuritiladi, ular qalinligi 3,5 dan 5,6 nmgacha bo‘lgan GaAs legirlanmagan qatlam – “speyser” bilan ajratilgan.

Bunda ikkita kvant nuqtalari qatlami hosil bo‘ladi, ularning o‘lchami va zichligi turli tuzilmalarda turlicha bo‘ladi. Keyin qalinligi 10 nm

bo'lgan ikkinchi "speyzer" - $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ qatlami o'stirildi. Bundan keyin legirlangan $d(\text{Si})$ (2) va 35 nm qalinlikdagi legirlanmagan $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ qatlamlar o'stirildi. Bunday geterotuzilmani shakllantirish qalinligi 6 nm bo'lgan legirlanmagan GaAs qatlam va kremniy bilan legirlangan ($n=3 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-2}$) 40 nm qalinlikdagi GaAs qatlamini o'stirish bilan yakunlanadi. Zatvorlarning uzunligi 0,3-0,4 mkmni tashkil etadi.

Bunday tuzilmadagi ikki o'lchamli gazda elektronlarning harakatchanligi va konsentratsiyasi kvant nuqtalari mavjudligi tufayli kamayishi o'rnatildi. Kvant nuqtalarga ega bo'lgan geterotuzilmalarda elektronlarni tashish ikkita komponentlarga ega. Bitta komponent ikki o'lchamli gazdan harakatlanadigan elektronlar orqali shakllantiriladi, ikkinchi komponent kvant chuqurchalarida lokallashtirilgan elektronlarga bog'liq.

Ikkinchi komponent faqat kuchli elektr maydonlarda elektronlarni tashishga hissa qo'shadi. Kvant nuqtalardagi tranzistorlarda kuchli maydonlarda elektronlarni tashishda ishtirok etadigan elektronlar konsentratsiyasi kuchli maydonlarda zatvordagi kuchlanishga bog'liq emas. Bu turdagi tranzistorlar ma'lum barcha maydon tranzistorlardan tubdan farq qiladi. Bu asboblarda 500 mSm/mm tartibdagi yuqori g_{max} tiklikka ega, bu ularning O'YUCH-asboblarda ishlatilishini aniqlaydigan.

6.2. Optoelektron nanoqurilmalar

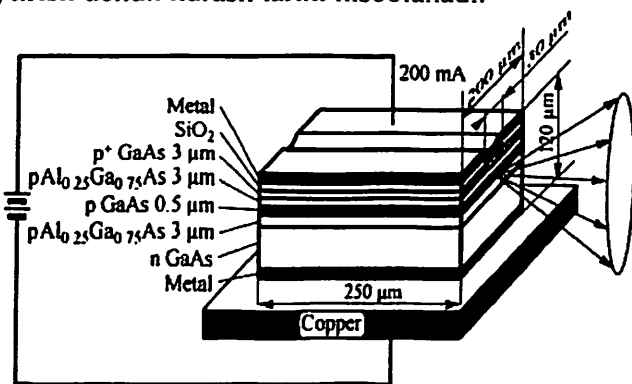
6.2.1. Geterotuzilmalar va o'ta panjaralardagi lazerlar

Yarimo'tkazgichli elektronikada geterotuzilmalardan foydalanish g'oyasi XX asrning elliginchi yillarining boshlarida ilgari surilgan. Geterotuzilmalarni o'rganishning dastlabki bosqichida, 2002 yilda Nobel mukofotini J. I. Alferov bilan bo'lishgan G. Kremer geterotuzilmaning tadqiqotlariga muhim nazariy hissa qo'shdi. 1963 yilda J. I. Alferov va G. Kremer mustaqil ravishda qo'sh geterotuzilma asosidagi yarimo'tkazgichli lazerlarning konsepsiyasini shakllantirishdi.

GaAs/AlGaAs geteroo'tishlarining xususiyatlarini tadqiq qilish va suyuq fazali epitaksiya - tuzilmalarini o'stirish texnologiyasini takomillashtirish 1970 yilda xona haroratida lazerli generatsiyalash uzluksiz rejimini (6.7-rasm) amalga oshirish imkonini berdi. Deyarli bir vaqtning o'zida panjarali-moslashtirilgan geteroo'tishlarni tanlash imkoniyatlarini suzilarli kengaytiradigan yechim - to'rttalik qattiq eritmalardan foydalanish (dastlab bu InGaAsPning turli xil tarkiblari bo'lgan) topildi.

Darhaqiqat, birikmalarning har bir (bu holda, InAs, GaAs, InP, GaP) o'ziga ta'qiqlangan zonasining kengligi va panjara doimiysiga ega bo'ldi. Agar bitta o'qi bo'ylab panjara doimiysi, ikkinchi o'qida ta'qiqlangan zonaning kengligi qo'yilsa va bu birikmalarning parametrlariga mos to'rtta nuqtalar qo'yilsa, u holda ular to'rtburchakni hosil qiladi.

To'rtta komponentli $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ eritmaning tarkibini (turli komponentlarning x va y ulushlarini) o'zgartirish bilan bu to'rtburchak chegaralarida panjara doimiysi va ta'qiqlangan zona kengligining istalgan qiymatlarini olish mumkin. Yarimo'tkazgichli lazerlarning rivojlanish tarixi sezilarli darajada lazerli generatsiyalash boshlanadigan bo'sag'aviy tokni kamaytirish uchun kurash tarixi hisoblanadi.



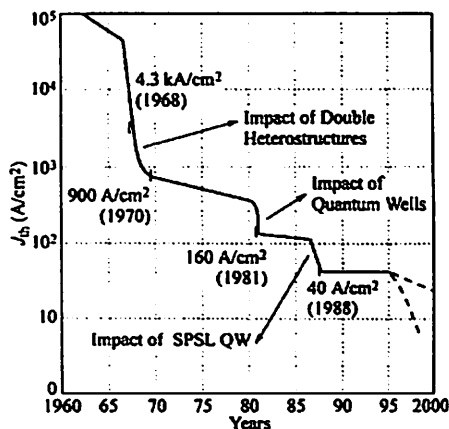
6.7-rasm. Xona haroratida uzluksiz rejimda ishlagan dunyodagi birinchi yarimo'tkazgichli lazerning sxematik tuzilmasi

Darhaqiqat, katta toklar - bu katta sochiladigan quvvat, mos ravishda, yarimo'tkazgichli tuzilmaning o'ta qizib ketishi va tez buzilishi hisoblanadi.

Kichik bo'sag'aviy toklar uzoq xizmat ko'rsatadigan juda kichik lazerli qurilmalar hisoblanadi. 6.8-rasmda yarimo'tkazgichli lazerlar bo'sag'aviy toki zichligining vaqt bo'yicha evolyusiyalanishi tasvirlangan va o'qlar bilan muhim bosqichlar - Impact of Double Heterostructures (qo'sh geterotuzilmalarning ta'siri), Impact Quantum Wells (kvant chuqurchalarining ta'siri), Impact of SPSL QW (qisqa davrli o'ta panjaralar "o'ramida" kvant chuqurchalariga ega bo'lgan geterotuzilmalarning ta'siri) ko'rsatilgan.

Yarimo'tkazgichli kichik o'lchamli geterotuzilmalarning qo'llanishi bo'sag'aviy tok zichligini uch tartibdan ortiqqa kamaytirishga imkon berdi. 1970 yilda L. Esaki va R.Su tomonidan taklif qilingan qator yangi

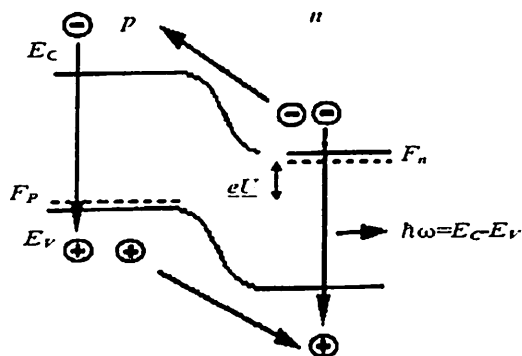
o'ziga xos xususiyatlarga ega bo'lgan yarimo'tkazgichli geterotuzilmalarning yangi turi - o'ta panjaradan foydalanish tufayli bo'sag'aviy tokning zichligi yana bir tartibga kamaytirishga erishildi. 6.8-rasmda kvant nuqtalariga ega bo'lgan geterotuzilmalarni qo'llanishiga bog'liq oxirgi 10-15 yillar ichida erishilgan yutuqlar ko'rsatilmagan.



6.8-rasm Yarimo'tkazgichli lazerlar bo'sag'aviy tokining evolyusiyalanishi

6.2.2. Geteroo'tishli yorug'lik diodlari

Yorug'lik diodlari elektr tokining energiyasini yorug'lik energiyasiga o'zgartiradigan ikkita kontaktli yarimo'tkazgichli qurilma hisoblanadi. Agar namunada *p-n*- birikma hosil qilingan bo'lsa, u holda to'g'ri siljitish qo'yilganda *p-n*-o'tishdagi potensial to'siq ka-mayadi va *n*-sohadan elektronlar *p*-sohaga injeksiyalanadi va *p*-sohadan kovaklar esa *n*-sohaga injeksiyalanadi (6.9-rasm). Injeksiyalangan elektronlar va kovaklar rekombinatsiyalanadi, o'z energiyasini $h\nu$ yorug'lik kvantlariga (nurlanishli rekombinatsiya) yoki nuqsonlar va aralashmalar orqali panjaraning issiqlik tebranishlariga (nurlanishsiz rekombinatsiya) uzatadi. Nurlanishli rekombinatsiya ehtimolligi elektron-kovak juftlarining konsentratsiyasiga proporsional, shuning uchun *p*- va *n*-sohalarda asosiy tashuvchilarning konsentratsiyasi oshishi bilan bir qatorda, rekombinatsiya bo'lib o'tadigan aktiv sohaning qalinligini kamaytirish maqsadga muvofiq.

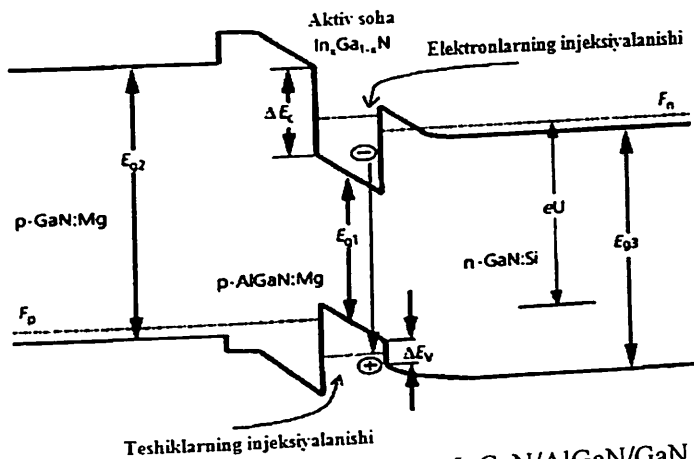


6.9-rasm. U to'g'ri siljitishda yarimo'tkazgichdagi oddiy (gomogen) p - n -o'tishning energetik diagrammasi; og'ma o'qlar bilan elektronlar va kovaklarning injeksiyalanishi, vertikal o'qlar bilan elektronlar va kovaklarning rekombinatsiyalanishi ko'rsatilgan

Oddiy p - n -o'tishlarda bu qalinlik diffuzion uzunlikdan kichik bo'lishi mumkin emas.

Rekombinatsiyalanishning aktiv sohasini cheklash masalasi yuqorida aytib o'tilganidek, XX asr 60-yillarining oxirida J.I. Alferov va uning hamkasblari tomonidan dastlab GaA va uning AlGaAs turdagi qattiq eritmaları asosida, keyin boshqa yarimo'tkazgichli birikmalar asosida geterotuzilmalar yaratish yo'li bilan yechilgan. 6.10-rasmda ta'qiqlangan zonaning katta E_{g2} , E_{g3} kengliklariga ega bo'lgan yarim o'tkazgichning tashqi p - va n -sohalari orasida kichik E_{g1} kenglikli yupqa qatlam joylashgan geterotuzilmaning energetik diagrammasi tasvirlangan. Bu qatlamning d qalinligini yuzlab va hatto o'nlab atom qatlamlari tartibida juda kichik qilish mumkin.

Qatlamning geterochegaralaridagi odatdagi p - n -o'tishning potensial to'sig'idan tashqari, elektronlar uchun ΔE_C va teshiklar uchun ΔE_V potensial to'siqlar hosil bo'ladi. Agar o'tishga to'g'ri siljitish qo'yilsa, har ikkala tomonlardan tor zonali qatlamga elektronlar va kovaklarning injeksiyalanishi vujudga keladi. Elektronlar qatlamdagi potensial chuqurcha tubiga tushish bilan eng kichik energiyali pozitsiyalarni egallashga intiladi, kovaklar esa ularning energiyasi minimal bo'ladigan qatlamdagi valentlik zonasining chetiga – yuqoriga intiladi.



6.10-rasm. U to'g'ri siljitishda p - n InGaN/AlGaIn/GaN geterotuzilmaning energetik diagrammasi

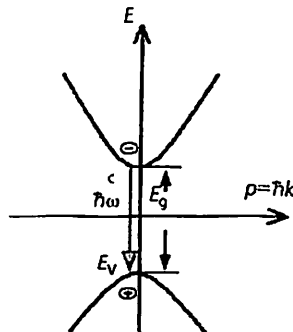
Geteroo'tishning keng zonali tashqi qismlarini ulardagi teng muvozanatli tashuvchilarining yuqori konsratsiyasiga erishish bilan har ikkala tomonlardan kuchli legirlash mumkin. Hatto aktiv tor zonali sohani aralashmalar bilan legirlamasdan injeksiyalanishda bu qatlamda teng muvozanatsiz elektron-kovak juftlarining sezilarli konsratsiyasiga erishish mumkin. Aktiv sohani legirashdan voz kechish juda muhim, chunki aralashma atomlari, yuqorida aytib o'tilganidek, nurlanishsiz rekombinatsiyalanish markazlari bo'lib xizmat qilishi mumkin. Chuqurchaga tushish bilan injeksiyalangan elektronlar ΔE_c potensial to'siq bilan, kovaklar ΔE_v potensial to'siq bilan to'qnashadi va ularda qolib ketadi; shuning uchun ikkalasi ham tarqalishni to'xtatadi va yupqa aktiv qatlamda fotonlar chiqarilishi bilan rekombinatsiyalanadi.

Elektronlarning o'tkazuvchanlik zonasidan valentlik zonasiga optik o'tishida energiyani saqlanishi qonuniga rioya qilish kerak. Shuning uchun diodning aktiv sohasidagi ta'qiqlangan zonaning E_g kengligi nurlanish kvantlarining zarur energiyasiga yaqin bo'lishi kerak. Bir vaqtda kvazi impulsni saqlanishi qonuniga rioya qilish kerak. Kvazi zarrachalarning E energiyalari ularning r kvaziy momentlari bilan erkin zarrachalardagi kabi bog'langan, ya'ni: $E = r^2/2t$ bo'ladi, faqat elektronning $t_0 \sim 10^{-30}$ kg massasi o'rniga kattaligi bo'yicha elektron massasidan sezilarli farq qilishi mumkin bo'lgan bu yarimo'tkazgichdagi elektronlar va teshiklarning m_n va m_p samarali massalari olinadi.

Elektronlarning o'tkazuvchanlik zonasidan valentlik zonasiga optik

o'tishida energiyani saqlanishi qonuniga rioya qilish kerak.

Shuning uchun diodning aktiv sohasidagi ta'qiqlangan zonaning E_g kengligi nurlanish kvantlarining zarur energiyasiga yaqin bo'lishi kerak. Bir vaqtda kvaziimpulsni saqlanishi qonuniga rioya qilish kerak. Kvazi zarrachalarning E energiyalari ularning r kvaziy momentlari bilan erkin zarrachalardagi kabi bog'langan, ya'ni: $E = r^2/2t$ bo'ladi, faqat elektronning $t_0 \sim 10^{-30}$ kg massasi o'rniga kattaligi bo'yicha elektron massasidan sezilarli farq qilishi mumkin bo'lgan bu yarimo'tkazgichdagi elektronlar va kovaklarning m_n va m_p samarali massalari olinadi. Chiqarilgan fotonning r_f impulsi rekombinatsiyalanadigan kvazizarrachalarning kvaziimpulslariga qaraganda juda kichik. Shuning uchun nurlanishli rekombinatsiyalanishda elektronlarning kvaziimpulsi o'zgarmaydi, bu esa faqat valentlik zonasining maksimumi va o'tkazuvchanlik zonasining minimumi Brillouyen zonasining markazida kvaziimpulslar sohasida – kristalldagi kvaziimpuls sohasida joylashgan to'g'ri zonali yarimo'tkazgichlar uchun mumkin bo'lishi mumkin (6.11-rasm).



6.11-rasm. To'g'ri zonali yarimo'tkazgichlar uchun elektronlar energiyasining kvaziimpulsga bog'liqligi: o'q bilan elektronlarning o'tkazuvchanlik zonasidan valentlik zonasiga kvant nurlanish bilan o'tishi ko'rsatilgan

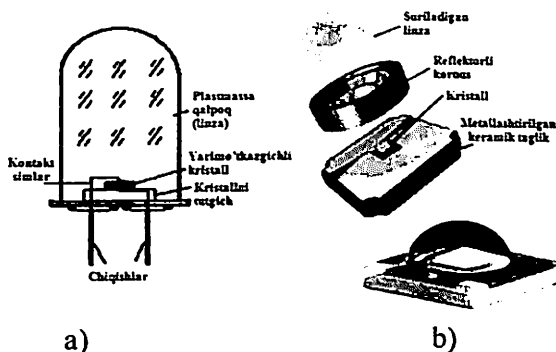
Bundan tashqari, yarimo'tkazgichning kristali turli qatlamlar orasidagi chegaralar kabi iloji boricha nuqsonsiz bo'lishi kerak, chunki ular-dagi nuqsonlar (masalan, dislokatsiyalar) nurlanishsiz rekombinatsiyalanishga olib keladi. Shuning uchun, materiallarning elementar yacheykalarining parametrlarini moslashtirish nuqtai nazaridan materiallarning juftligini tanlash alohida e'tibor talab qiladi; moslashtirilmagan panjara-lar chegarasida ko'plab dislokatsiyalar paydo bo'ladi. Ko'p sonli tadqi-

qotlar shuni ko'rsatdiki, $A^{III}B^V$ turdagi birikmalarining geterotuzilmalarida deyarli ideal geterochegaralarni yaratish mumkin. Tor zonali qatlamda nurlanishli rekombinatsiyalaish ehtimolligi nurlanishning h_{in} ichki kvant chiqishini (bitta elektron-teshik juftiga nurlantiriladigan fotonlar sonini) aniqlaydi. Kvant chuqurchali geterotuzilmalarda h_{in} qiymat 100%ga yaqin bo'lishi mumkin. Amaliyot uchun esa, nurlanishning h_{ext} tashqi kvant chiqishi - tashqi muhitga nurlantiriladigan fotonlar sonini p - n -o'tishni kesib o'tadigan elektron-kovak juftlari soniga nisbati muhimroq bo'ladi. Ichki kvant chiqishdan (h_{in}) tashqari h_{ext} aktiv sohaga injeksiyanalish koeffitsienti (g) va tashqi muhitga yorug'likni chiqarilishi koeffitsientini (h_0) hisobga oladi:

$$h_{ext} = gh_{in}h_0$$

Yorug'likni nurlantiradigan qurilmaning foydali ish koeffitsienti Joul issiqligiga yo'qotishlar bilan ham chegaralanadi, shuning uchun tuzilmaning barcha sohalari va chiqishlardagi omik kontaktlarning qarshiliklari kichik bo'lishi kerak. Nurlantiriladigan yorug'lik kvantlari tashqi muhitga ma'lum bir fazoviy burchak ostida va qurilmaning ichida minimal yutilish bilan chiqishi kerak.

Kam quvvatli va yuqori quvvatli yorug'lik diodlarining konstruksiyalari 6.12-rasmda tasvirlangan.



6.12-rasm. Yorug'lik diodlarining konstruksiyasi va tashqi ko'rinishi: a - kam quvvatli indikatorli yorug'lik diodi; b - yoritish uchun quvvatli yorug'lik diodi

Yorug'likni nurlantiradigan geterotuzilmaga ega bo'lgan yuqori quvvatli yorug'lik diodlarida kristall reflektorli kristall tutgichga o'rnatiladi va bo'rtma shaffof kremniy linzalari bilan yopiladi. Linzaning konstruksiyasi nurlanishni kerakli fazoviy burchakka yo'naltirilishini

ta'minlaydi. Kristallning tutgichi aktiv sohadan issiqlikni ajratadi. Linzaning materialiga lyuminoforlarni qo'shish yo'li bilan kerakli spektral tarkibdagi nurlanish shakllantiriladi.

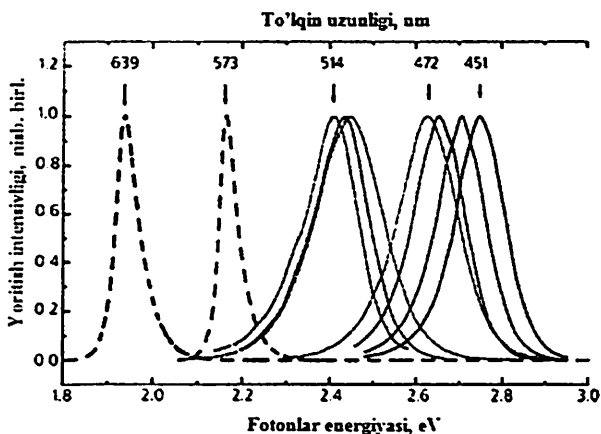
Kam quvvatli yorug'lik diodlarida kristall juda kichik plastinka shaklidagi alyuminiy reflektorning tubiga o'rnatiladi. Bu konstruktsiya tok chiqishlari bilan birga, sharsimon uchli shaffof plastiksilindrga joylashtiriladi, bu ham kristallni ham himoya qilishni, ham yorug'lik oqimining shakllanishini ta'minlaydi. Kam quvvatli yorug'lik diodlari juda kam 20 dan 120 mVtgacha energiya iste'mol qildi va 5-25% FIKda bilan 1-30 mVt (1-30 kd) yorug'lik shaklida nurlantiriladi. Taqqoslash uchun, juda kichik cho'g'lanma lampa taxminan 12 V kuchlanish va 50-100 mA tok kuchida ishlaydi.

1989 yilda S. Nakamura ("Nichiya Kemikal" kompaniyasi) legirlash va issiqlik bilan ishlov berish rejimlarini tanlash bilan GFE MOS usulida o'stirilgan III guruh nitridlari yupqa qatlamlarini o'rganishda GaN geterotuzilmalaridagi yuqori kovaklar konsentratsiyasili samarali injeksiyalanishli p -turdagi qatlamlarni oldi. Bunda bufer qatlamlarini Mg va Zn aralashmalar bilan legirlash qo'llandi. Dastlab $Ga_{1-x}In_xN:Zn$ aktiv qatlamli qo'sh $Ga_{1-x}In_xN/Ga_{1-y}Al_yN$ geterotuzilmalaridan yorug'lik diodlari yaratildi. Yorqinligi 1 va 2 kd bo'lgan ko'k va yashil yorug'likning maksimumlari 460 va 520 nmga to'g'ri keldi, tashqi kvant chiqish esa 3 va 2%ni tashkil etdi. Keyingi bosqichda qalinligi 2-3 nmgacha bo'lgan legirlanmagan aktiv $Ga_{1-x}In_xN$ qatlamli ko'p qatlamli GaN/ $Ga_{1-x}In_xN$ geterotuzilmalari yaratildi.

Turli geterotuzilmalar asosidagi yorug'lik diodlarining nurlanish spektrlari 6.13-rasmda tasvirlangan. Ko'rinib turibdiki, ular ko'rinadigan spektrning butun sohasini qamrab oladi.

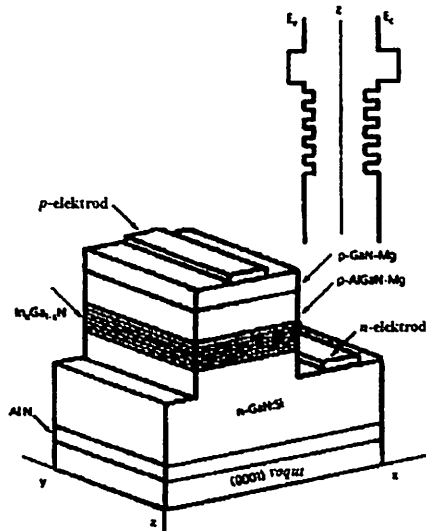
O'ta yupqa qatlamlarda o'lchamli kvantlash samarasi - elektronlar va kovaklar energetik spektrini qatlamning qalinligiga bog'liqligining ta'siri namoyon bo'ladi. Shunday qilib, yarimo'tkazgich tarkibini emas, balki kvant chuqurchasining qalinligini o'zgartirish bilan yoritish rangini boshqarish mumkin bo'ldi.

O'ta panjaralarni o'stirish texnologiyasi chegaralarda nuqsonlarning minimal sonini ta'minlashi kerak. O'ta yupqa qatlamlarda panjaralar parametrlarining mos kelmasligi muayyan hollarda geterochegaralarda faqat elastik deformatsiyalanishga yoki siqilishga olib keladi, u dislokatsiya va nuqsonlar - nurlanishchiz rekombinatsiyalanish markazlarining hosil bo'lishi bilan birga bo'lmaydi.



6.13-rasm. InGaN/AlGaIn/GaN (uzluksiz chiziqlar) va AlInGaP/GaP (uzlukli chiziqlar) geterotuzilmalari asosidagi n yorug'lik diodlarining elektr lyuminessensiya spektrlari.

Ko'p sonli kvant chuqurchalariga ega bo'lgan yorug'lik diodlarining tuzilmasii ancha murakkab hisoblanadi (6.14-rasm).



6.14-rasm. Ko'p kvant chuqurchalariga ega bo'lgan InGaN/AlGaIn/GaN turdagi geterotuzilmalari asosidagi yorug'lik diodlarining sxemasi

Yoqut taglikda AlN bufer qatlamidan (qalinligi 30 nm) keyin nisbatan qalin (4 mkm) n -GaN: Si qatlam o'stiriladi. Keyin beshta navbatma-navbat $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kvant chuqurchalari (3-4 nm) va GaN to'siqlaridan (4-5 nm) iborat legir-lanmagan qatlam bajariladi.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kvant chuqurchalari ta'qiqlangan zonasining samarali kengligi, agar aktiv qatlam tarkibi $x = 0,2-0,4$ chegaralarda o'zgarsa, ko'k sohadan sariq sohangacha (450-580 nm) nurlanishga to'g'ri keladi; u d qalinlikka ham bog'liq. Yuqori joylashgan p -Al_{0,1}Ga_{0,9}N: Mg (100 nm) keng zonali to'siq qatlami kovaklarni injeksiyalaydi va panjarani Ni-Au metall qoplangan yuqori p -GaN: Mg qatlam (0,5 mkm) panjarasi bilan moslashtiradi. Pastki n -GaN qatlamli ikkinchi metall kontakt (Ti-Al) tuzilmaning qismiga ishlov berilgandan keyin yaratiladi.

Agar ko'k rangli yorug'lik diodlari sariq lyuminofor bilan qoplangan bo'lsa yoki yorug'lik ko'k nurlanish bilan paydo bo'ladigan bunday lyuminoforli linzalar bilan yopilsa, u holda ranglarning qo'shilishi oq yoritishni beradi. Yorug'lik diodlarning funksional xususiyatlari, chegaraviy ishlash rejimlari va ishonchliligini aniqlaydigan eng muhim va shu bilan birga, eng murakkab jarayonlar termoelektrik jarayonlar hisoblanadi.

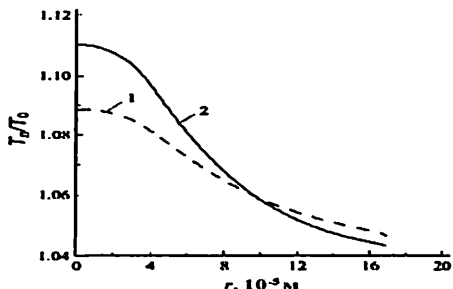
Asboblarni tuzilmasida elektr quvvatning ajralishi uning aktiv sohasining bir xil bo'lmagan qizishiga olib keladi va buning natijasida tuzilmaning yuzasi bo'yicha tok zichligi va quvvatini sezilarli bir xil bo'lmagan taqsimlanishiga olib keladi.

Real qurilmalardagi mavjud nuqsonlar turli termoelektrik teskari aloqa mexanizmlarining (TTAM) ta'siri natijasida bu bir xil emaslikning oshishiga olib keladi, ya'ni qurilmalarning chegaraviy imkoniyatlari va ishonchliligining cheklanishiga olib keladi.

Bu jarayonlarni tahlil qilish uchun TTAM mexanizmlari va qurilmaning tuzilmasi va konstruksiyasida turli fizik xarakterdagi makronuqsonlarning bo'lishi hisobga olinganda yorug'lik diodlarining termoelektrik modeli ishlab chiqilgan. COMSOL Multiphysics kompyuterda modellashtirish muhitidan foydalanish bilan statik va impulsli rejimlarda yorug'lik diodlari tuzilmalaridagi termoelektrik jarayonlarni modellashtirish uchun asl interaktiv dasturiy vositalar yaratilgan.

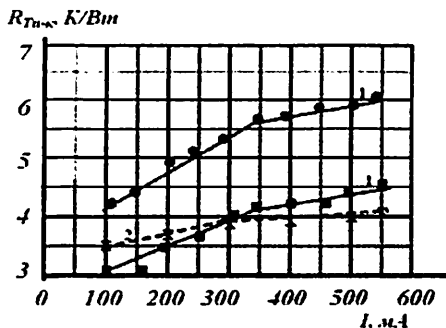
Yuqori quvvatli InGaN/GaN yorug'lik diodlari tuzilmalarida tok zichligi va harorat taqsimotini hisoblash shuni ko'rsatdiki, tok zichligining haroratga bog'liqligi va kvant samaradorligining tok zichligi va haroratga bog'liqligi haroratga bog'liq bo'lmagan yaqinlashishga qara-

ganda geteroo'tish tokining maksimal zichligi va maksimal haroratning oshishiga olib keladi (6.15-rasm).



6.15-rasm. TTAM hisobga olinmasdan (1) va hisobga olinishi bilan yorug'lik diodlari tuzilmasi yuzasida harorat taqsimoti

Hisoblash natijalari eksperimental natijalarga mos keladi (6.16-rasm): past qarshilikli taglikli yorug'lik diodlarining o'tish-korpus issiqlik qarshiligi to'liq tokning oshishi bilan deyarli chiziqli ortadi [51], binobarin, katta toklarda bu bog'liqlikning tikligi sezilarli kamayadi, ya'ni to'yinishga intiladi.



6.16-rasm. Yuqori quvvatli InGaN/GaN yorug'lik diodlarining o'tish-korpus issiqlik qarshiligining to'liq tokka bog'liqligi: 1-tajriba, 2 – hisoblash

Tok tarqaladigan qatlamli yorug'lik diodlari geterotuzilmalaridagi termoelektrik jarayonlarning tahlili shuni ko'rsatdiki, TTAM ta'siri natijasida ulangan yorug'lik diodlaridagi geterotuzilmaning aktiv sohasining o'rtacha va maksimal haroratining ortishi sur'atining τ absolyut qiymati haroratga bog'liq bo'lmagan yaqinlashishga qaraganda sezilarli yuqori (1,3-1,5 barobarga) bo'ladi.

Yorug'likning nurlantiradigan geterotuzilmada tok taqsimotining bir xil emasligini diagnostika qilish uchun informativ parametr bo'lib yorug'lik diodlari issiqlik qarshiligining tokka bog'liqligi tikligi xizmat qilishi mumkin.

6.3. Tunnel samaralaridagi qurilmalar

6.3.1. Rezonansli tunnellashtirish

Elektronlar to'liq uzunligi bilan tenglashadigan va potensial to'siqlar bilan chegaralanadigan fazoda joylashgan bo'lsa, ikkita o'zaro bog'langan samaralar paydo bo'ladi: ulardan birinchisi o'lchamli kvantlash, ikkinchisi ma'lum o'lchamli kvantlash sharoitlarida sodir bo'ladigan rezonans hisoblanadi. Elektron to'liqlar kvant potensial chuqurchasining devorlaridan qaytadi. Agar to'siqlarning har ikkala tomonlari bo'yicha elektronlarning energetik sathlari energiya bo'yicha mos kelsa, u holda elektron to'liqlarining rezonansi haqida aytish mumkin. Bunday holda tunnelli tokining keskin oshishi kuzatiladi.

Aytish mumkinki, o'lchamli kvantlash va rezonans to'g'ri va teskari yo'nalishda harakatlanadigan to'liqlarning interferensiyasi hodisasi natijasi hisoblanadi. Rezonansli tunnellashtirish samarasi asosida yarim-o'tkazgichli elektronika va optoelektronikada qo'llaniladigan tunnel-rezonansli tuzilmalar (TRT) yaratildi. Kichik o'lchamli tuzilmada elektronlarning tunnellashtirish nafaqat uni tashkil etadigan potensial to'siqlarining xarakteristikalarini orqali, balki tuzilmaning ichida joylashgan elektronlar uchun ruxsat etilgan energetik holatlari orqali ham aniqlanadi. Ikki potensial to'siqlar bilan chegaralangan kichik o'lchamli tuzilmada injeksiyalaydigan elektroddagi Fermi sathi va kichik o'lchamli tuzilmadagi diskret sathi mos kelganda, u orqali o'tadigan tunnelli tokning keskin oshishi o'z o'rniga ega bo'ladi. Bu hodisa rezonansli tunnellashtirish deyiladi. U volt-amper xarakteristikasida manfiy differensial qarshilikka ega bo'lgan oraliqning paydo bo'lishiga olib keladi, bu qattiq jisimli o'ta yuqori chastotali generatorlarni yaratish uchun juda o'ziga tortadi.

Bu samarani kuzatish uchun odatiy tuzilmalar kvant chuqurchalari hisoblanadi. a qalinlikdagi kvant yupqa qatlam ikki o'lchamli tuzilmada $E_1 = \hbar^2 n^2 / (2m \cdot a^2)$ ga mos keladigan energiyaga ega bo'lgan kichik zona hosil bo'ladi. Tashqi kuchlanish bo'lmasa, u to'siqlar bilan ajratilgan

elektrodlarda Fermi sathidan yuqori joylashgan deb olinadi. Elektronlarning injeksiyanishi amalga oshiriladigan elektrod emitter, to'playdigan elektrod esa kollektor deyiladi. Tuzilmaga kichik tashqi kuchlanish qo'yilganda kuchlanishning asosiy tushishi to'siqlar sohasiga to'g'ri keladi, chunki ularning elektr qarshiligi chuqurchaning qarshiligidan ancha katta bo'ladi. Ularda energetik sathlarning eng katta egriligi bo'lib o'tadi, lekin tuzilma orqali o'tadigan elektr toki sezilarsiz bo'ladi.

Qo'yiladigan kuchlanishning ortishi bilan chuqurchadagi E_1 sath kamayadi, bu esa emitter to'sig'i orqali tunnelli tokni paydo bo'lishini ta'minlaydi. Elektronlarning chuqurchadan kollektorga tunnellashtirish hech qanday cheklovlarni keltirib chiqarmaydi, chunki u yuqori energetik sathdan pastroq sathga o'tadi. Emitterdagi Fermi sathi va chuqurchadagi E_1 energetik sath mos kelganda, tunnelli tokning qiymati maksimal bo'ladi. Bunda elektronlar o'z energiyasi va impulsini saqlashi bilan chuqurchaga tunnellashtiriladi. Bu tufayli ular u yerda qolmaydi va tezda kollektorga o'tadi. Chuqurcha orqali elektronlarning rezonansli o'tishi bo'lib o'tadi.

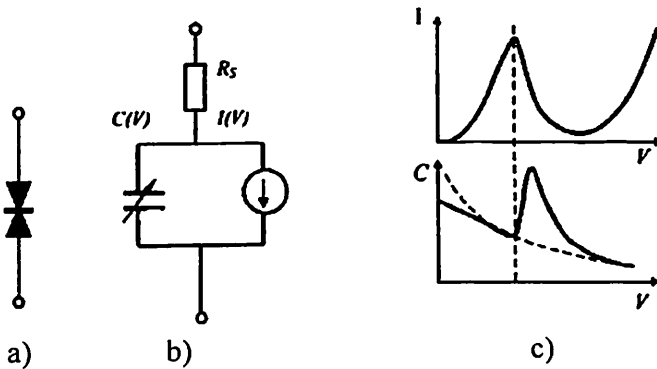
6.3.2. Rezonansli tunnellashtirishdagi qurilmalar

Rezonansli tunnellashtirish hodisasi ps ning birliklarini va o'ndan bir qismini tashkil etadigan qayta ulanish bilan, ya'ni bir necha TGs (10^{12} Gs) chastotalar diapazonida ishlaydigan diodlar va tranzistorlarni yara-tishga imkon beradi.

Rezonansli-tunnelli diod potensial to'siqlar bilan ajratilgan va ketma-ket joylashgan kvant chuqurchalaridan tashkil topgan va ikkita chetki qarama-qarshi sohalarga elektr kontaktlarga ega bo'lgan davriy tuzilma hisoblanadi (6.17-rasm). Bu tuzilmadan oqib o'tadigan tok qo'yiladigan kuchlanishning qiymatiga bog'liq.

Agar qo'yiladigan kuchlanish kichik bo'lsa va potensial to'siq orqali o'tadigan elektronlarning energiyasi diskret sath energiyasidan kichik bo'lsa, u holda to'siqning shaffofligi va oqib o'tadigan tok kichik bo'ladi. Elektronlar energiyasi diskret sathdagi energiyaga teng bo'ladigan kuchlanishlarda tok maksimal qiymatga yetadi. Yuqoriroq kuchlanishlarda elektronlarning energiyasi diskret sathdagi energiyadan katta bo'ladi va elektronlar uchun to'siqning shaffofligi kamayadi. Bunda tok ham kamayadi.

Rezonansli tunnelli diodning volt-amper xarakteristikasi 6.17v-rasmda tasvirlangan. Ko‘rinib turibdiki, volt-amper xarakteristikasida maksimum va manfiy differensial qarshilikka ega oraliq mavjud (6.17c-rasm, kuchlanish ortishi bilan tokning kamayishi sohasi), bu ko‘p darajali mantiqiy elementlar, xotira elementlari va qattiq jismlari o‘ta yuqori chastotali generatorlarni yaratish uchun juda o‘ziga tortadi.



6.17-rasm. Rezonansli-tunnelli diodning shartli belgilanishi (a), uning ekvivalent semasi (b), volt-amper va volt-farad xarakteristikalari (c)

Rezonansli tunnellashtirishdagi tranzistorlar. Boshqaruv elektrodini rezonansli-tunnelli diodga qo‘shish uni rezonansli-tunnelli tranzistorga aylantiradi va uning qo‘llanishi imkoniyatlarini kengaytiradi. Shuningdek, rezonansli-tunnelli diodni oddiy tranzistor bilan birlashtirish mumkin. Bu variant rezonansli-tunnelli bipolyar tranzistor va qaynoq elektronlardagi rezonansli-tunnelli tranzistorlarni yaratish uchun ishlatilgan. Rezonansli-tunnelli bipolyar tranzistor emitter-baza o‘tish yoki baza sohasiga o‘rnatilgan rezonansli-tunnelli tuzilmaga ega bo‘lgan bipolyar tranzistor hisoblanadi.

Unga issiq elektronlardagi rezonansli-tunnelli tranzistor o‘xshash bo‘lib, unda rezonansli-tunnel tuzilma emitterga o‘rnatiladi. Aytib o‘tilgan qurilmalardan tashqari, tranzistorli tuzilmalar ham mavjud bo‘lib, ular zatvor bilan boshqariladigan rezonansli-tunnelli diodlar hisoblanadi. Ulardagi zatvorlar dioddagi tok rezonansi shartlarini tashqi boshqarish uchun emitter atrofidagi Shottki to‘siqlari yoki $n-p$ -o‘tishlar ko‘rinishida yaratiladi.

Rezonansli-tunelli qurilmalaridagi mantiqiy elementlar. Rezonansli-tunelli diodlar va tranzistorlar ham analog, ham raqamli integral sxemalarda manfiy differensial qarshilik oralig'iga ega bo'lgan volt-ampere xarakteristikasiga ega bo'lgan elementlar sifatida ishlatiladi. Ta'kidlash joizki, tunelli samaralardagi nanoelektron qurilmalarning eng muhim o'ziga xos xususiyatlari an'anaviy qurilmalarga qaraganda volt-ampere xarakteristikalarining noyobligi va yuqori tezkorligiga bog'liq ularning kengaytirilgan funksional imkoniyatlari hisoblanadi. Shu tufayli bu qurilmalar o'ta yuqori integratsiyalanish daradasili o'ta tezkor integral sxemalarni ishlab chiqishda muhim rol o'ynaydi.

Nazorat savollari

1. Kulon qamali samarasini tushuntiring.
2. Kontakt-kvant nuqta tizimidagi tashish mexanizmlarini tushuntiring.
3. O'tkazuvchanlik kvantining ma'nosini tushuntiring.
4. Bitta elektronli qurilmalarning asosiy afzalliklari nimada?
5. Bitta elektronli tranzistorlarning tuzilmasiga misollar keltiring.

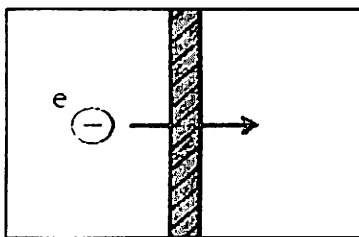
7 BOB. BIR ELEKTRONIKA VA MOLEKULYAR NANOELEKTRONIKA ASBOBLARI VA QURILMALARI

7.1. Bir elektronika asboblari va qurilmalari

7.1.1. Bir elektronika g'oyasi

Mikrosxemalarning integratsiyalanishi darajasini oshirishning eng istiqbolli yo'nalishlaridan biri tom ma'noda bitta elektronning harakatlanishi nazorat qilinadigan qurilmalarni ishlab chiqishga asoslangan. Bitta elektronli tranzistorlar deyiladigan bunday qurilmalarda ma'lumotlar biti bitta elektron bilan ifodalanadi. Bunday tranzistorlarda elektronning harakatlanish vaqti tunnellashtirish jarayoni orqali aniqlanadi va juda kichik bo'lishi mumkin.

Bir elektronli tunnellashtirish nazariyasi 1986 yilda K.K.Lixarev tomonidan taklif qilingan. Lixarevning birinchi maqolasidan bir necha yil o'tgach, Lixarev bashorat qilgan ta'sirlarni eksperimental kuzatuvlari tavsiflangan ko'plab asarlar paydo bo'la boshladi: nazariya eksperiment bilan ajoyib tarzda tasdiqlandi. Elementar ko'rinishda bu nazariyaning asosiy qoidalarini quyidagicha ko'rsatish mumkin. Yaqin joylashgan va bir-birlaridan izolyasyon qatlam bilan ajratilgan ikkita metall elektrodlardan hosil bo'lgan tunnelli o'tish mavjud bo'lsin (7.1 -rasm).



7.1-rasm. Ajratuvchi yupqa izolyasyon qatlamli elektrodlar tizimi

Bunday tizimning sig'imini C bilan belgilaymiz, u holda bu tizimning energiyasi uchun ifodani quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$E = Q^2/2C, \quad (7.1)$$

bu yerda Q - kondensator qoplamalaridagi zaryad.

Zaryad elektron zaryadiga karrali bo'lgani uchun energiyani o'zgarishining minimal qiymati quyidagini tashkil qiladi:

$$\Delta E = e^2/2C. \quad (7.2)$$

Zaryadlarning diskret tabiatiga bog'liq bo'lgan samaralarning namoyon bo'lishi energiyaning minimal o'zgarishi harorat bo'yicha o'zgarishlardan katta bo'lishi uchun kerak, ya'ni $\Delta E \gg kT$ bo'ladi, bu yerda k - Bolsman doimiysi, T - harorat. Shuningdek, bu o'zgarish kvant tebranishlarining energiyasidan ortishi kerak, uning qiymati Geyzenberg no-anqlik nisbatlaridan baholanishi mumkin bo'ladi va qaralayotgan tizim uchun quyidagi shaklda yozilishi mumkin:

$$E\tau \gg h \quad (7.3)$$

bu yerda $\tau = RC$ - zanjirning vaqt domiysi, $R = \max(R_i; R_s)$ - o'tish yoki o'tishni shuntlaydigan o'tishning qarshiligi.

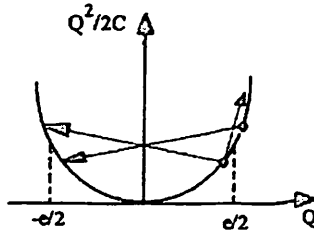
(7.3) shartdan $E \gg h/RC$ cheklov kelib chiqadi, u (7.2) ifodani hisobga olish bilan $R \gg R_Q$ shaklda yozilishi mumkin, bu erda $R_Q = h/4e^2 = 6.45 \text{ k}\Omega$ -qarshilik kvanti deyiladi.

Bir elektronli tunnellashtirish nazariyasining muhim farazlaridan biri shundaki, tunnelli o'tishdagi Q_0 boshlang'ich zaryad 0 dan farq qilishi mumkin va bundan tashqari, butun sonli elektronlar soniga karrali bo'lmagan qiymatlarni qabul qilishi mumkin. Bu shu bilan tushuntiriladiki, zaryad yaqin atrofdagi elektronlar, zaryadlangan aralashmalar va boshqalarning qutblanishi natijasida hosil bo'lishi mumkin va shu bilan istalgan qiymatga ega bo'ladi.

Tizimning Q zaryadi uchun ifodani $Q = Q_0 \pm ne$ ko'rinishda ifodalaymiz.

Ko'rsatish mumkinki, agar Q_0 $e/2$ dan $e/2$ gacha bo'lgan qiymatlarga ega bo'lsa, u holda butun sonli elektronlarni qo'shish yoki ayirish tizimning umumiy energiyasini oshiradi, ya'ni energetik jihatdan foydasiz bo'ladi (7.2 -rasm).

Kulon qamali nuqtada elektronlarning kontaktlarda elektrondan qaytarilishi, shuningdek, nuqtadagi elektron hosil qiladigan qo'shimcha Kulon potensial to'sig'iga bog'liq bo'lgan ikkita tunnelli kontaktlar orasida joylashgan kvant nuqtasi orqali elektronlarning o'tishini to'silishi hisoblanadi. nuqta Alfa-parchalanishda yadroviy kuchlar maydoni alfa-zarrachalarning chiqib ketishiga to'sqinlik qilishiga o'xshash tarzda Kulon to'sig'i ham elektronning nuqtadan chiqib ketishiga, shuningdek, unga yangi elektronlarning tushishiga to'sqinlik qiladi.



7.2-rasm. Tizim energiyasining zaryad qiymatiga bog‘liqligi

Ekspirimental Kulon qamali nuqtaning o‘tkazuvchanligini nuqtaning potensialiga, ya’ni qo‘shimcha elektroddagi (zatvordagi) kuchlanishiga eng yuqori nuqtali bog‘liqligi sifatida namoyon bo‘ladi. Bu hodisa kvant nuqtasining $e^2/2C$ Kulon energiyasi (hatto e zaryadli bitta elektronga bog‘liq bo‘lgan) issiqlik potensialidan va kvant nuqtasi sathlari orasidagi energiya farqidan sezilarli katta bo‘lganda kuzatiladi.

Bu hodisani quyidagicha tushunish mumkin. Qo‘shimcha elektrod yordamida nuqta potentsiali V qiymatga o‘rnatilgan va nuqtada N qo‘shimcha elektronlar joylashgan bo‘lsin. S nuqta sig‘imi bo‘lsin. U holda nuqtaga qo‘shimcha elektron qo‘yish uchun quyidagi ish bajarilishi kerak:

$$\left(\frac{(N+1)^2 e^2}{2C} - \frac{N^2 e^2}{2C} \right) - eV + \delta\varepsilon = \left[\left(N + \frac{1}{2} \right) \frac{e}{C} - V \right] + \delta\varepsilon, \quad (7.4)$$

bu yerda $\delta\varepsilon$ - nuqta va kontaktlardagi elektronlarning Fermi sathlaridagi farqlari tufayli qo‘shimcha energiya.

Zatvorda kuchlanishni ma’lum bir tanlovda va kontaktlarning Fermi sathlarining $(N + 0,5)e/C - V = 0$ va nuqtaning $\delta\varepsilon = 0$ nisbiy holatlarida elektronning kontaktdan nuqtaga o‘tishi uchun potensial to‘siq yo‘qoladi. Bu nuqta o‘tkazuvchanligining eng yuqori nuqtasi sifatida kuzatiladi. Nuqtaning chekli harorati tufayli kontaktlardagi Fermi sathi biroz xiralashadi, bu Kulon qamali eng yuqori nuqtalarining kengligini chekli qiladi. Ya’ni, odatda, eV birliklarida eng yuqori nuqtalarning kengligi kT birliklarida nuqta harorati tartibida bo‘ladi.

7.1.2. Bir elektronli qurilmalar

Bir elektronli qurilmalarning yaratilishi ma’lumotlar biti bitta elektron bilan ifodalanadigan raqamli bir elektronika uchun o‘ziga tortadigan istiqbollarni ochadi. Bunday qurilmalarda elektronning harakatlanishi

tunnel orqali bo‘lib o‘tadi. Elektronni tunnellashtirish vaqtlari juda kichik bo‘lgani uchun, bitta elektronli qurilmalarning tezkorligi nazariy chegarasi juda yuqori bo‘ladi. Boshqa tomondan, bitta elektronni ko‘chirish uchun zarur bo‘ladigan ish ham kichik bo‘ladi, shuning uchun bitta elektronli sxemalarning energiya iste‘moli juda kichik bo‘lishi kerak. Shunday qilib, K. K. Lixarevning baholashlaricha, bitta elektronli asbob tezkorligining nazariy chegarasi yuzlab TGslarni, bitta qurilmaning energiya iste‘moli $3 \sim 10^{-8}$ Vtni tashkil qiladi (7.1-jadval). Bir elektronli tizimlar va jarayonlarning o‘ziga xos xususiyatlari tufayli birinchi tajribalar juda past haroratlarda - bir necha millikelvinlarda o‘tkazildi.

Hozirgi vaqtda bitta elektronli samaralar xona haroratida kuzatiladi. Bu skanerlaydigan tunnelli mikroskop (STM) yordamida amalga oshirildi. Shunga qaramay, xona haroratida barqaror ishlaydigan bir elektronli qurilmalar hali yaratilmagan. Takrorlanadigan xarakteristikalariga ega bo‘lgan barqaror ishlaydigan qurilmalar faqat 4,2 K haroratda mavjud.

7.1 -jadval.

Bir elektronli tunnelli o‘tishlardagi qurilmalarning asosiy parametrlarini baholash (K.K.Lixarev ma’lumotlari bo‘yicha)

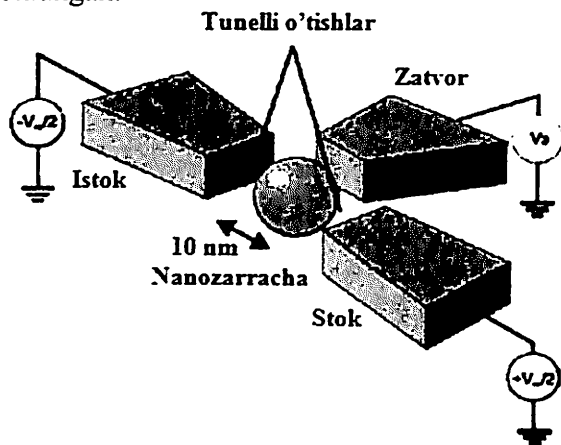
Texnologiya darajasi	O‘tish yuzasi, nm ²	Sig‘im, aF	Quvvat sathi, Vt	Tezkorlik, ps	Integratsiya darajasi, sm ² ga zatvorlar
An’anaviy texnologiya	100 x 100	300	10^{-7}	10	10^8
Yaqin istiqbol	30 x 30	30	10^{-8}	1	10^9
Nanolitografiya chegarasi	10 x 10	3	10^{-9}	0,1	10^{10}
Molekulyar daraja	3 x 3	0,3	10^{-11}	0,03	10^{11}

Shu bilan birga, xona haroratidagi bitta elektronli samaralar uzoq vaqt davomida kuzatilmoqda va tadqiq qilinmoqda; muammo ishlash qobiliyatiga ega bo‘lgan qurilmalarni yaratishda yotadi.

Kulon qamali samarasidagi bir elektronli tranzistor g‘oyasini 1986 yilda K. K. Lixarev va D. V. Averin taklif qilgan. Ham maydon tranzistor, ham bitta elektronli tranzistor istok, stok va zatvor deyiladigan uchta elektrodarga ega (7.3-rasm).

Elektrodlar orasida qo‘shimcha metall yoki yarimo‘tkazgichli “nanorolcha” - nanozarrachalar yoki nanometrlar o‘lchamlardagi klaster joylashgan bo‘lib, u elektrodlardan dielektrik qatlamlar orqali ajratilgan,

ular orqali ma'lum sharoitlarda elektronlarning harakatlanishi bo'lishi mumkin. Agar tranzistoring istoki va stoki orasida kuchlanish qo'yilsa, u holda tok oqib o'tmaydi, chunki bu momentda elektronlar nanozarrachalarda bloklangan.



7.3-rasm. Bitta elektronli tranzistor

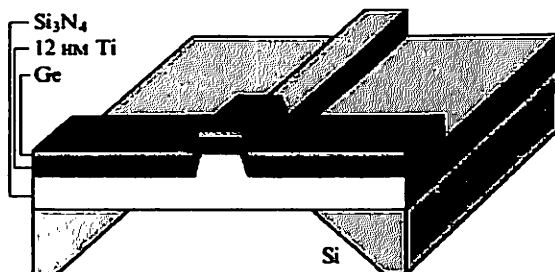
Tok paydo bo'lishi uchun boshqarish elektrodi - zatvordagi potensialni oshirish kerak. Faqat zatvordagi potensial ma'lum bir bo'sag'aviy qiymatdan oshganda, bloklash buziladi, elektron to'siqdan o'tish qobiliyatiga ega bo'ladi va istok-stok zanjirida tok oqa boshlaydi. Bunda zanjirda elektr toki porsiyalarda oqib o'tadi, bu esa bittalik elektronlarning harakatlanishiga mos keladi. Shunday qilib, zatvordagi potensialni boshqarish bilan bittalik elektronlar to'siqlardan o'tishi mumkin. Nanozarrachadagi elektronlar soni 10 dan oshmasligi (yaxshisi kamroq bo'lishi) kerak. Bunga o'lchamlari 10 nm bo'lgan kvant tuzilmalarda erishish mumkin.

7.1.3. Bir elektronika qurilmalari

Rossiya Fanlar akademiyasi A.V.Rjanov nomidagi yarimo'tkazgichlar instituti Sibir bo'limi olimlari 10 nm o'lchamdagi yupqa kremniy nitridli taglikda metall tasmalarni tayyorlashga erishildi, ularni bo'lish yo'li bilan Kulon qamali samarasi tuzilgan (7.4 -rasm).

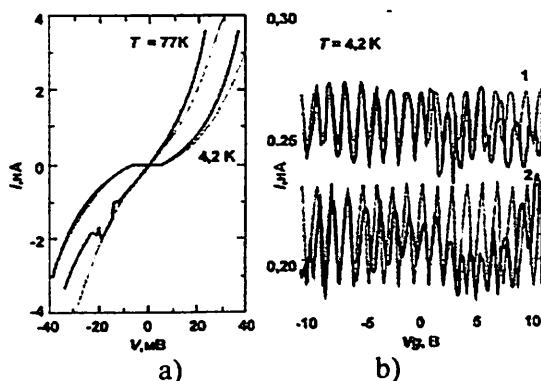
Metall o'tkazgich nanotola bo'lib, u taglik rel'efining sun'iy bajarilgan zinalari tufayli bo'linadi va bu bilan tunnelli o'tishlar hosil bo'ladi.

Bitta elektronli tashishning belgisi Kulon itarilishi tufayli oʻta kichik kondensatorlarda yoki tuzilmalarda elektronlarni tashish bloklanadigan kuchlanishlar diapazoni mavjud boʻladigan Kulon tirqishlarining boʻlishi hisoblanadi.

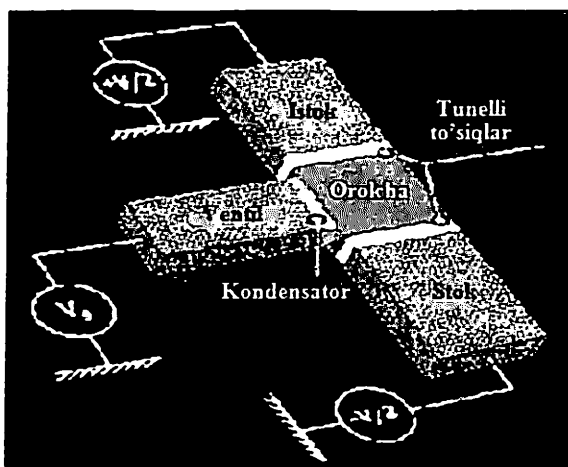


7.4-rasm. Metall tasmani boʻlish natijasida yaratilgan bitta elektronli tranzistor

Kulon orolchasidagi elektron yetkazish kontaktlaridan elektronlarning tunnelli oʻtishdan oʻtishiga toʻsquinlik qiladi. Bunday tuzilma orqali oʻtadigan tok suyuq geliy haroratida kuzatiladigan bir elektronli tebranishlar bilan tavsiflanadi (7.5-rasm). Kembrij universiteti va Tokio Japan Science & Technology Corporation korporatsiyasida xona haroratida ishlaydigan nanooʻlchamli metall tasmlardan bitta elektronli tranzistor tayyorlandi (7.6-rasm).



7.5-rasm. Bitta elektronli tranzistor Kulon tirqishining volt-ampere bogʻliqligi (a) va bitta elektronli tashish keltirib chiqaradigan zatvor kuchlanishining tebranishlari (b)



7.6-rasm. Nanoo'lchamli metall tasmlardagi bitta elektronli tranzistor

Tranzistorning o'tkazuvchi kanali (orolcha) stok va istokdan yupqa izolyator qatlamlaridan tunnelli to'siqlar bilan ajratilgan.

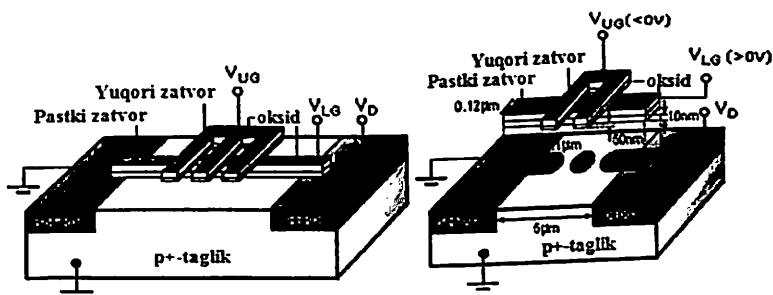
Tranzistor xona haroratida ishlashi uchun orolchaning o'lchami 10 nmdan oshmasligi kerak. Orolcha uchun material sifatida alohida amorf kremniy klasteri xizmat qiladi, uning yuzasi yupqa to'siq qatlamini hosil qilish uchun past haroratda oksidlangan.

Kremniyli bitta elektronli qurilmalar MOYAO'-tranzistorli tuzilmalarni yaratishda texnologik yutuq natijasida paydo bo'ldi.

7.7-rasmda MOYAO'-tranzistor inversion qatlami asosida shakllantirilgan bitta elektronli kremniyli tranzistor tasvirlangan.

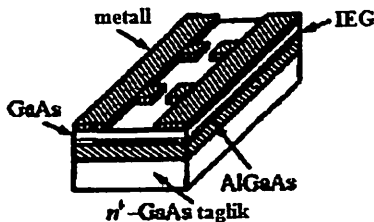
Zatvor elektr ajratilgan yuqori va pastki ikkita qismlardan iborat. Pastki zatvorga musbat kuchlanish berilganda p -turdagi taglikda inversion n -kanal hosil bo'ladi. Yuqori P -simon zatvorga manfiy kuchlanish berilganda kanal siyrak sohalarga bo'linadi. Potensial to'siqlar paydo bo'ladi va kvant nuqtasi shakllanadi.

Geterotuzilmalar asosidagi bitta elektronli tranzistorlarda ikki o'lchamli elektron gaz (IEG) sohasida, masalan, GaAs-AlGaAs turdagi geterotuzilmada kvant nuqtalari shakllanadi. Bunday tuzilmalarda IEGni cheklash va turli usullarda orollarchalarni hosil qilish amalga oshiriladi. Bunday cheklash usullari bo'yicha tuzilmalarni bir necha turlarga ajratish mumkin.



7.7-rasm. Ikki zatvorli va bitta kvant nuqtali kremniyli bitta elektronli tranzistorning konstruksiyasi

7.8-rasmda GaAs/AlGaAs geterotuzilmasi asosidagi qo'sh tunnelli o'tish bo'lgan asbob tasvirlangan. Bu asbobda IEGni cheklash va kvant nuqtalarining shakllanishi tuzilmaning yuzasida joylashgan metalli bo'linadigan Shottki zatvorlariga kuchlanishni qo'yilishi orqali amalga oshiriladi. GaAs va AlGaAs qatlamlarining bo'linishi chegarasida IEG hosil bo'ladi, uning zichligi o'tkazuvchi taglikga qo'yiladigan kuchlanish bilan boshqariladi.



7.8-rasm. Shottki zatvori bo'linadigan GaAs/AlGaAs asosidagi tuzilma

Bo'linadigan zatvorlarga manfiy kuchlanish qo'yilganda ularning ostidagi IEGning siyraklashishi bo'lib o'tadi. Natijada IEGda siyrak oraliqlar (to'siqlar) orasida kichik segmentlarga (orolchalarga) ega bo'lgan kanal shakllanadi. Qurilmaning ishlash harorati taxminan 0,5 K ni tashkil qiladi.

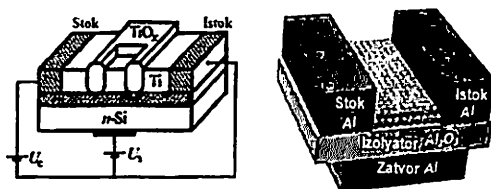
GaAs/AlGaAs geterotuzilmalarida kvant nuqtalarining, shuningdek, zatvor, istok, stok va kanal sohalarining shakllanishi elektron-nurli litografiya va dastlabki plastinada ariqchalarga reaktiv ionli ishlov berish orqali amalga oshirilishi mumkin. Bunday texnologik jarayonlar natijasida bu sohalarda IEGni cheklash amalga oshiriladi.

Zatvor bo'linadigan tuzilmada elektr maydoni IEGga perpendikulyar qo'yiladi. Gorizontall elektr maydon qo'yilganda kelib chiqadigan planar

Shottki zatvoridagi kuchlanish induksion kuchlanish IEGga parallel yoʻnalishda elektronlarga taʼsir qiladi va bu uning qoʻshimcha cheklanishiga olib keladi.

Metall bitta elektronli tranzistorlarda elektron-nurli litografiya, changlatish va lokal oksidlanish texnologik jarayonlari yordamida olinadigan $Me/Me_xO_u/Me$ turdagi tuzilmalar ishlatiladi. Metall (Me) sifatida koʻpincha Al, Ni, Cr ishlatiladi.

Ti/TiO_x/Ti tuzilmasidagi tunnelli oʻtishlar asosidagi tranzistor 7.9-rasmda tasvirlangan. Tranzistorlar tuzilmasi tunnelli mikroskop yordamida oksidlanish natijasida shakllantiriladi. Metall (Ti) yupqa qatlami yotqizilgandan soʻng, uning yuzasi katod sifatida STMdan foydalanish bilan anodlash orqali oksidlanadi. Tranzistorlardagi zatvor konfiguratsiyasi turlicha, ulardan biri qarama-qarshi-taroqli konfiguratsiyaga, boshqalari parallel tekisliklar koʻrinishidagi konfiguratsiyaga ega. Bunday tranzistor xona haroratida ishlashi mumkin.



7.9-rasm. Metall bitta elektronli tranzistorning tuzilmasi

Metallarda erkin zaryadlangan zarrachalarning konsentratsiyasi shunchalik yuqori boʻladiki, izolyasion zatvor orqali qoʻyiladigan tashqi elektr maydon metallga deyarli kirmaydi. Ammo, agar oʻsha metall bir nechta atomlar miqdorida olingan boʻlsa, u holda bunday hosila - nanoklasterning elektron xossalari yarimoʻtkazgichlarning xossalariga oʻxshash boʻladi. Bu izolyator sifatida oksiddan foydalanish bilan metall atomlari asosida nanometrli oʻlchamlardagi tranzistorlarni loyihalashtirishga imkon beradi.

7.2. Molekulyar nanoelektronika asboblari va qurilmalari

7.2.1. Molekulyar nanoelektronika

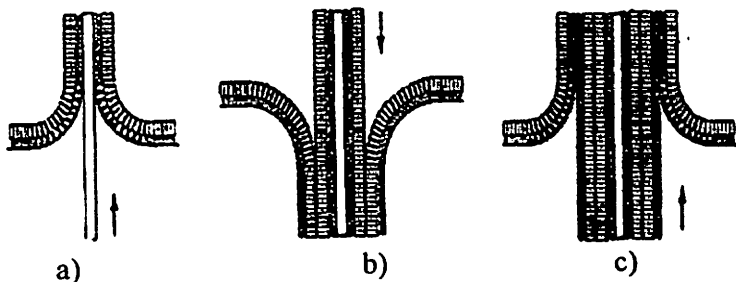
Raqamli elektronikaning asosiy funksiyalari - toʻgʻrilash, kuchaytirish va xotirada saqlash funksiyalarini bajaradigan bir nechta molekula-

larni yoki hatto bitta molekulani elektrodlar orasiga joylashtirish mumkin degan g'oya birinchi marta XX asrning 70-nchi yillari o'rtalarida ilgari surilgan. Hozirgi vaqtda bu konsepsiya alohida komponentlar uchun amalga oshirilgan, ammo molekulyar darajada integral zanjirlarni zavodda ishlab chiqarish hali ham molekulalar orasida ishonchli va nazorat qilinadigan kontaktlarni amalga oshirish qiyinligi tufayli muammo bo'lib qolmoqda.

Bu muammoning bo'lishii mumkin yechimi alohida molekula ham elementar jarayonlarni, ham hisoblashlar uchun zarur bo'ladigan o'zaro bog'lanishlarni birlashtiradigan "monomolekulyar" elektronika hisoblanadi. Amalda bu vazifalarni amalga oshirish uchun monomolekulyar yupqa qatlamlarni yaratish va molekulaga ma'lumotlarni uzatish kerak edi. Hozirgi vaqtda monomolekulyar yupqa qatlamlar turli usullarda, shu jumladan turli epitaksial usullarda, shuningdek, Lengmyur-Blodjett (L-B) usulida olinadi.

Ma'lumki, yog' kislotalari va ularning tuzlari suv yuzasida yupqa qatlam hosil qilish qobiliyatiga ega. Bu molekulalarda gidrofil (suvga tortiladigan) va gidrofob guruhlar mavjud.

Suvning katta yuzasida molekulalar tasodifiy joylashadi, agar bu sirt maxsus to'siq yordamida kamaytirilsa, molekulalar sirtga perpendikulyar joylasha boshlaydi, sirt bosimining yanada oshishida tartiblangan ikki o'lchamli molekulyar qatlamga o'tish paydo bo'ladi. Bu yupqa qatlamlarni asta-sekin suvga botirish (yoki tortish) bilan qattiq taglikka o'tkazish mumkin (7.10-rasm). Bunda yupqa qatlamning qalinligi 1 dan 100 molekulyar qatlamlargacha o'zgarishi mumkin.



7.10-rasm. Qattiq taglikka bitta (a), ikkita (b) va uchta (c) L-B yupqa qatlamlarini o'tkazish

Turli molekulalarning navbat-navbat qatlamlari - molekulyar o'ta

panjara yotqizilishi mumkin. Yog' kislotalari L-B usuli qo'llanilishi mumkin bo'lgan yagona molekular emas. Boshqa molekularni organik erituvchi bilan birgalikda suv yuzasiga yuritilishi mumkin, so'ngra ularni taglikka o'tkazish mumkin. Ularga bo'yoq molekulari, biologik oqsillar va fermentlar, oligomerlar va polimerlar, shuningdek, fullerenlar kiradi.

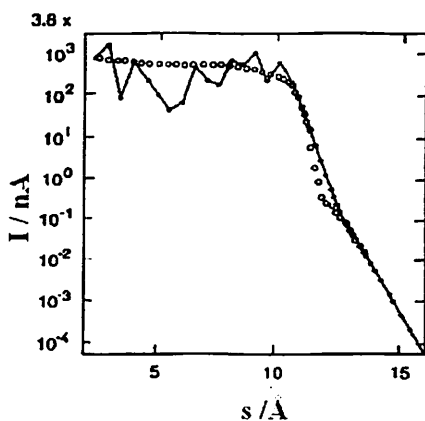
Hozirgi vaqtda bitta molekulada elektron tashishni yaratishning bir necha usullari mavjud. Ulardan biri skanerlash tunnelli mikroskop (STM) bilan bog'liq. STMdagi asosiy jarayon elektronlarni mikroskop ignasidan taglikka (u o'rganilayotgan moddaning yupqa molekulyar qatlamiga ega bo'lgan o'tkazuvchan bo'lishi kerak) kvant-mexanik tunnel-lashtirish hisoblanadi.

Oqib o'tayotgan tunnel toki metall ninaning atom orbitallari va taglikning molekulyar orbitallarining qoplanishi bilan aniqlanadi. Bir o'lchamli hol uchun S qalinlikdagi tirqishdagi tok quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$I \approx \exp(-2kS)$$

bu yerda k - igna va namuna to'liqin funksiyalarining o'rtachalash-tirilgan so'nish doimiysi.

Ignaning holati 0,1 Å aniqlikdagi STM pyezoelementi orqali nazorat qilinadi. Shunday qilib, stearin kislotasining alohida molekularini, shuningdek, fulleren molekularini uglerod klasterlari orqali tashish tadqiq qilindi. 7.11-rasmda metall (Au) - fulleren - STM ignasi orqali o'tadigan tokning tirqishning qiymatiga bog'liqligi tasvirlangan.



7.11-rasm. Igna va molekula orasidagi tirqishning S qalinligiga bog'liq ravishda Au/C₆₀/nina tuzilmasidagi tok

Katta S qiymatlarda tok tunnelli xarakterga ega va yuqoridagi ifodaga muvofiq eksponensial tarzda S ga bog'liq. $S = 12,4 \text{ \AA}$ qiymatiga yetganda molekula bilan kontakt o'rnatiladi (uning qarshiligi $54 \text{ M}\Omega$ ga baholanadi).

Masofaning keyingi kamayishi molekulaning deformatsiyalanishiga, molekulyar sathlarning metallning Fermi sathiga o'tishiga olib keladi, bunda tashish rezonansli bo'ladi va qarshilik $h/2e^2 \sim 12 \text{ K}\Omega$ kvant chegarasiga yaqinlashadi. Shunday qilib, qaralayotgan tuzilmalardagi tashish molekulaning energetik sathlarining taqsimoti xarakteri orqali aniqlanadi. U yoki bu omillar hisobiga bu sathlarning pozitsiyalarini o'zgartirish tashish xususiyatining keskin o'zgarishlariga olib keladi.

7.2.2. Molekulyar elektronika asboblari va qurilmalari

Molekulyar elektronikadagi elementlarning roliga da'vogarlar orasida sintetik molekularlar (masalan, rotaksanlar) va biomolekularlar, masalan, yarimo'tkazgichlik xossalari topilgan DNK mavjud.

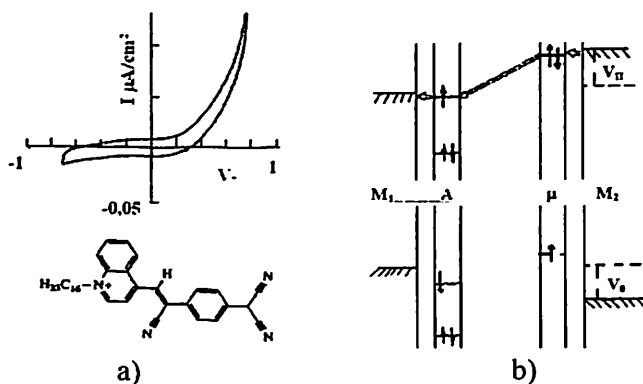
Molekulyar elektronika qurilmalarining namunalari hozirda yaratilgan. Xususan, rotaksan molekulasida har bir kvadrat santimetrga taxminan 100 Gbit/s yozish zichligi xotira elementi shakllantirilgan. Molekulyar elektronikadagi asosiy funksional bloklarni tanlashdan qiyin bo'lmagan muammo elektronlarni to'siqsiz o'tishini ta'minlaydigan bu bloklar va metall-molekula kontaktlari orasidagi bog'lanishlarni yaratish hisoblanadi.

Hozircha bu yo'nalishdagi eng muvaffaqiyatli urinish metall (xususan, oltin) o'tkazgich yuzasida molekularlarni mahkamlash uchun "langar" guruhlaridan foydalanish bo'ldi. Bunday guruhlar rovida molekularlar tarkibiga kiritiladigan tiol birikmalari o'ynagan. Ammo ularning jiddiy kamchiliklari mavjud, bu guruhlarini elektronlar harakatiga sezilarli potensial to'siqni shakllantiradi, elektronlar ular orqali faqat tunnelashtirish orqali o'tish mumkin. Bu holda o'tkazuvchanlik keskin pasayadi, demak mantiqiy element sifatida asosiy molekulaning xossalari sezilarli yomonlashadi.

Leyden Universitetidan (Gollandiya) YAn van Ruytenbek va uning Avstriya, Ispaniya va Germaniyadagi hamkasblari benzol molekulasining platina bilan oraliq tiol guruhlarisiz kontakt yaratish va bu kontaktdagi elektronlar deyarli to'siqsiz harakatlanishini isbotlashga muvaffaq bo'lishdi, bunda o'tkazuvchanlik metallarda elektronlarning dreyfida mak-

simal bo'lishi mumkin qiymatning 0,1 dan 1,0 gacha tashkil yetishi mumkin. Bunda benzol molekulari tuzilmaviy o'zgarishlarga uchramaganligi ko'rsatildi. Bu molekulyar kontaktni yaratish usuli istalgan organik molekulaning metall bilan ishonchli bog'lanishini yaratishga imkon beradi, chunki bog'lanish to'g'ridan -to'g'ri uglerod atomi va metall yuzasidagi atom orasida hosil bo'ladi. Benzol ma'lum molekulyar xususiyatlari tufayli eksperimental model sifatida tanlangan.

Molekulyar to'g'rilagich. Tarixan birinchi molekulyar asbob molekulyar to'g'rilagich bo'lgan, uning modeli 1974 yilda Aviram va Ratner tomonidan taklif qilingan. Bu g'oyaning turli molekular uchun amaliy qo'llanilishi 1990-1993 yillarga to'g'ri keladi. Bu holda *p-n*-o'tishning analogi donor-akseptor molekula hisoblanadi. 7.12-rasmda metall-L-B-metall yupqa qatlamli tuzilmasining kimyoviy formulasi va volt-ampere xarakteristikasi keltirilgan.

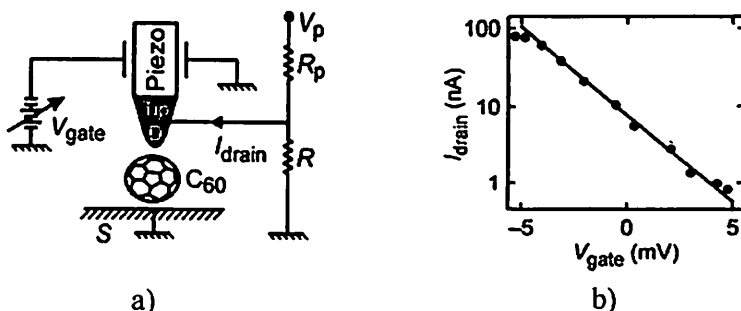


7.12-rasm. Molekulyar to'g'rilagich: a - D-A molekulaning kimyoviy tuzilmasi va tuzilmaning VAXi; b - to'g'ri va teskari siljtitishdagi zonaviy diagramma

To'g'rilash molekulaning o'ziga bog'liqligi va to'g'rilash xarakteristikasi metall turiga bog'liq emasligi ko'rsatilgan. Bu molekulada kuchlanish bo'lmaganda moslashtirilgan ko'prik orqali donor uchidan akseptor uchigacha zaryadning o'tishi kuzatiladi, shuning uchun uning muvozanat holati (A-D+) bo'ladi. Bu shuni anglatadiki, donor asosiy holati qo'zg'algan akseptor holatidan yuqorida bo'ladi. Musbat siljtitish qo'yilganda ortiqcha elektron akseptor holatidan elektrodga o'tkaziladi, elektrodan boshqa elektron donor holatiga o'tadi va keyin molekula

ichidagi uzatish yordamida akseptorga o'tadi (7.12b-rasm). Teskari siljishda tok yo'q, chunki tashuvchi molekulyar ichki to'siqni yengib o'tolmaydi. Samara 1, 7, 5 molekular monoqatlamli yupqa qatlamlar uchun kuzatilgan. Katta molekular qatlamli tuzilmalarda (masalan, Kulon qamali) o'lchamlar samaralari kuzatilmagan.

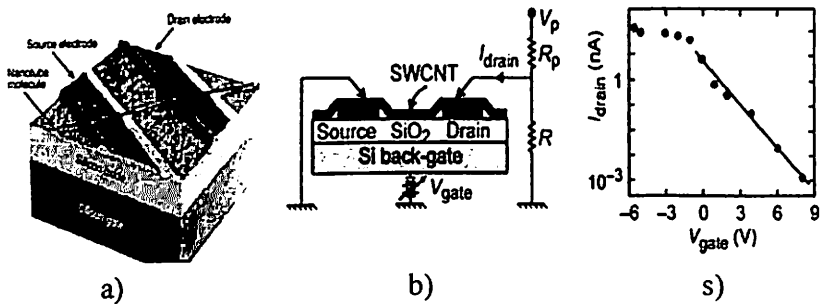
Molekulyar tranzistorlar. 7.13- va 7.14-rasmlarda ikkita molekulyar tranzistorlar tasvirlangan bo'lib, ulardan biri C_{60} molekulasini va tunnelli mikroskopga, ikkinchisi bitta devorli yarimo'tkazgichli nanoquvur va kremniy taglikka asoslangan.



7.13-rasm. C_{60} asosidagi elektromexanik tranzistor (a) va uning VAXi (b)

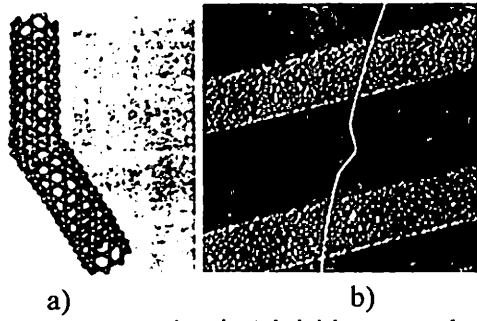
Birinchida boshqarish zatvori mikroskop ninasiga ulangan pyezelementdagi kuchlanish hisoblanadi, 7.13b-rasmda yana bunday zatvordagi kuchlanishga bog'liq ravishda tuzilma orqali oqib o'tadigan tok tasvirlangan. Ikkinchi tranzistor Delftda (Gollandiya) aktiv element sifatida bitta molekula bilan amalga oshirilgan.

Tranzistor bitta katta molekula - SiO yuzasida tayyorlangan ikkita metall kontaktlar (Pt) bo'ylab ko'ndalang yotadigan bitta devorli ugle-rodli nanoquvurdan (diametri 10 Å) bajarilgan bo'lib, zatvor kuchlanishi tashuvchilarni (kovaklarni) quvurga injeksiyalanishi uchun o'tkazuvchi taglikka qo'yiladi. Bunday asbob p -turdagi maydon tranzistorning analogi hisoblanadi, bunda asbobning qarshiligi zatvordagi kuchlanishga bog'liq ravishda bir necha tartiblarga o'zgaradi (7.14-rasm). Ta'kidlash joizki, asbob xona haroratida ishlaydi, 0,1 TGs ish chastota asosan kontaktlarning qarshiligi (1 MΩ) orqali aniqlanadi. Agar kontaktlarning qarshiligi kvant qarshiligi chegarasiga (10 kΩ) kamaytirilsa, u holda asbob maksimal 10 TGs chastotada ishlashi mumkin.



7.14-rasm. Bir devorli nanoquvur asosidagi maydon tranzistor: a - tashqi ko'rinishi, b - tuzilmasi, c - volt-amper xarakteristikasi

Quvurning o'zini ichida geteroo'tishni yaratish uchun uglerodli nanoquvurlarini tadqiq qilish davom etmoqda. Yondashuvlardan biri turli xususiyatlarga ega ikkita quvurlarni ikkita 6 atomli halqa o'rniga 5 va 7 atomli halqalarga ega bo'lgan topologik nuqson orqali ulashdan iborat. Bunda, nanoquvurning bir qismi (nuqsongacha) yarimo'tkazgichli, ikkinchi qismi metalli bo'lib qoladi. Shunday qilib, bitta molekula ichida to'g'rilagich sifatida ishlaydigan metall-yarimo'tkazgichni shakllantiriladi (7.15a-rasm).



7.15-rasm. Uglerodli nanoquvurning ko'rinishi, a - topologik nuqsonli, b - deformatsiyalangan nanoquvurdagi geteroo'tish

Yana bir yondashuv nanoquvurni deformatsiyalash orqali (tunnelli mikroskop ninasi yordamida) o'tishni shakllantirishga bog'liq (7.15b-rasm). Bu misollarda ikkita va uchta terminalli molekulyar asboblarni yaratish mumkinligi ko'rsatilgan.

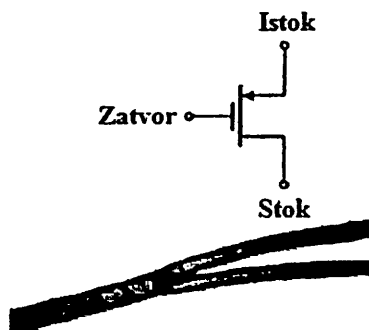
1998 yilda Lawrence Berkeley National Laboratoryda (AQSH) ham dastlab uglerodli nanoquvurlar asosida nanotranzistorlar namunalari

yaratildi. Keyinchalik C_{60} fulleren klasterlari asosidagi nanotranzistorlar olindi. Nanowriter elektron-nurli litografiya mashinasi yordamida bunday nanotranzistorlar tayyorlash uchun kremniy plastinasida kengligi 200 nm va qalinligi 10 nm bo'lgan tor oltin o'tkazgichlar panjarasi yaratilgan.

Panjara orqali yuqori zichlikdagi elektr toki o'tkazilganda oltin atomlarining elektr migratsiyalanishi natijasida o'tkazgich simlar nanometrlar o'lchamlarigacha ingichkalashdi va qat'iy belgilangan joylarda uzildi, kengligi taxminan 1 nm bo'lgan bo'shliqlarni hosil qildi. Keyin plastina fulleren klasterlarining suvli eritmasining yupqa qatlami bilan qoplangan. Keyin eritma bug'langan, C_{60} klasterlari esa ikkita elektrodlar - istok va stok orasidagi bo'shliqda qoldi. Zatvor elektrodi boshqa elektrodlardan kremniy dioksidning izolyasion qatlami ajratildi.

Uglerodli nanoquvurlar asosidagi nanotranzistorlar yordamida Delft Texnika Universiteti (Gollandiya) xodimlari 2001 yilda YOKI-YO'Q mantiqiy elementini joriy qilishgan. Noodatiy kichik o'lchamlari va yuqori elektr o'tkazuvchanligi tufayli bunday nanotranzistorli sxemalar xona haroratida ishlay oladi. Uglerodli nanoklasterlar alohida tayyorlangan, so'ngra taglikka joylashtirilgan. Ommaviy ishlab chiqarish uchun to'g'ridan - to'g'ri chipda nanoquvurlarni o'stirish texnologiyasini ishlab chiqish zarur.

Kaliforniya universiteti olimlari aniqladilarki, Y-simon nanoquvur yuqori tezkorlikka ega bo'lish bilan tranzistorning funksiyalarini to'liq bajaradi (7.16-rasm). Bunday Y-nanoquvurlar zamonaviy MOYAO'-tranzistorlarini almashtirishi va yangi elementlar bazasi uchun asos bo'lib xizmat qilishi mumkin, tarmoqlangan nanoquvurlar tarmog'i esa elektron chipni almashtirishi mumkin.

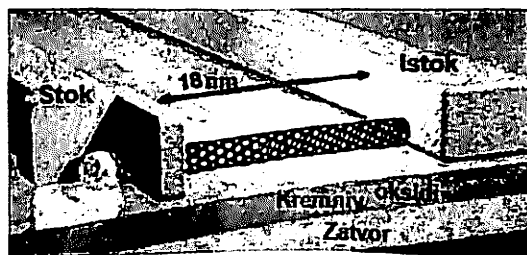


7.16-rasm. Y-nanoquvur asosidagi tranzistor sxemasi

Y-simon nanoquvurlarni yaratish uchun olimlar yangi o‘stirish texnologiyasini ishlab chiqishdi. Dastlab oddiy to‘g‘ri “nanoquvur” o‘stirildi, keyin uning yuzasiga maxsus ishlov berilgan titan nanozarrachalari yuritildi, ular shakllantirilgan nanoquvur yuzasida yana bir tarmoqni o‘stirish uchun katalizator vazifasini o‘tadi. Nanotizimning volt-amper xarakteristikalarini o‘lchash natijalari ko‘rsatganidek, nanoquvurning “stvoliga” kuchlanish berilgandan so‘ng, elektronlarning bir tarmoqdan boshqa tarmoqqa o‘tishi to‘xtaydi. Bu tranzistorli kalitlarning o‘ziga xos xususiyati hisoblanadi, va aksincha, nanotranzistorning “stvoliga” musbat kuchlanish berilganda ”tarmoq” orqali tok oqishi qayta tiklandi.

Infineon Technologies AG kompaniyasining laboratoriyalarida nanoquvurlar asosida o‘tkazuvchan kanal uzunligi atigi 18 nm bo‘lgan ishlash qobiliyatiga ega bo‘lgan nanotranzistorni yaratishga erishildi. Mikroprotsessorlardagi zamonaviy nanotranzistorlar o‘tkazuvchi kanalning to‘rt barobar katta o‘lchamlari bilan ajralib turadi. Infineon kompaniyasining Myunxen laboratoriyasi tadqiqotchilari kompaniya mutaxassislari tomonidan o‘stirilgan diametri 0,7 dan 1,1 nm gacha bo‘lgan nanoquvurdan foydalanishdi. “Balistik elektron tashish” tufayli nanoquvurlar eng kam qarshilik bilan elektr tokini o‘tkazadi va misga qaraganda 1000 baravar yuqori elektr o‘tkazuvchanligi bilan xarakterlanadi. Yangi nanotranzistor (7.17-rasm) unga atiga 0,4 V kuchlanish berilganda 15 mA gacha bo‘lgan toklarni o‘tkaza oladi (oddiy nanotranzistorlar 0,7 V kuchlanishda ishlaydi).

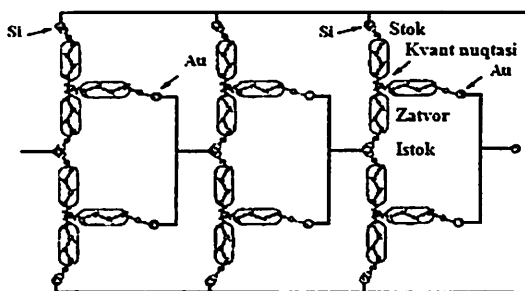
Yangi chip asosida mikroelektron komponentlarni ishlab chiqarishda tranzistorlarni joylashtirish zichligi zamonaviy chiplardagiga qaraganda o‘n baravar yuqori bo‘ladi, past ta‘minot kuchlanishi tufayli yangi tranzistorlardagi chiplar zamonaviy chiplarga qaraganda ancha tejamkor bo‘ladi.



7.17-rasm. Infineon kompaniyasidan nanoquvur asosidagi maydoniy nanotranzistor

Molekulyar mikroelektronikani yaratishda keyingi qadam molekulyar zanjirlarni yaratish bo'ladi, bu yerda polimerlar va uglerod nanoquvurlari molekulyar o'tkazgichlar vazifasini bajaradi. Kimyoviy reaksiyalar yordamida molekulalarni o'z-o'zini tashkil qilishga bog'liq yondashuv ham taklif qilingan. 7.18-rasmda oltin va tiol, shuningdek, kremniy va organik kislotalar orasidagi kimyoviy reaksiyalar natijasida olingan uch terminalli molekulyar asboblarga ega bo'lgan zanjir sxematik tasvirlangan.

Molekulyar mikroelektronikaning yutuqlari va kutilayotgan istiqbol-lariga qaramay, u zaryad tashish fundamental mexanizmlari hozirgidan ko'ra aniqroq tushunilsa, mahsuldor ilmiy predmetga aylanadi. Bunday fundamental masalalarga quyidagilar kiradi:



7.18-rasm. O'z-o'zini tashkil qilish yordamida olingan sxematik molekulyar zanjir (turli kimyoviy reaksiyalar)

- elektron korrelyatsiyalari molekuladagi zaryad tashilishiga qanday ta'sir qiladi;
- molekula geometriyasidagi o'zgarishlar tashishni qanday o'zgartiradi;
- elektron fononning o'zaro ta'sirlashishii lokalashtirishga ta'sir qiladimi;
- energiya (issiqlik) dissipatsiyasi qanday bo'lib o'tadi va bu jarayonni qanday nazorat qilish kerak va hokazo.

Nazorat savollari

1. Kulon qamali samarasini tushuntiring.
2. Kontakt-kvant nuqta tizimidagi tashish mexanizmlarini tushuntiring.
3. O'tkazuvchanlik kvantining ma'nosini tushuntiring.

4. Bitta elektronli qurilmalarning asosiy afzalliklari nimada?
5. Bitta elektronli tranzistorlarning tuzilmasiga misollar keltiring.
6. Molekulyar elektronika nima?
7. Lengmyur-Blodjett yupqa qatlamlari nima?
8. Molekulyar to'g'rilagich prinsipini tushuntiring.
9. Fulleren va UNQdagi molekulyar tranzistorlarga misollar keltiring.
10. Y-nanoquvur asosidagi tranzistorning ishlash prinsipini tushuntiring.

8 BOB. FUNKSIONAL NANOELEKTRONIKA

8.1. FunkSIONAL nanoasboblar

8.1.1. Nanoxotira

Ko'plab nanoishlab chiqish firmalari xotirada saqlash qurilmalari bozoriga yo'naltirilgan. Bunda yangi muqobil texnologiyalar ishlab chiqilmoqda, chunki an'anaviy saqlash qurilmalarini oddiy masshtablash to'plash kondensatorlarining o'tish yo'qotishlari, tuzilmaning ortadigan murakkabligi va kiruvchi nurlanishlar keltirib chiqaradigan tasodifiy uzilishlarga sezgirlik kabi omillar bilan cheklangan.

Mavjud xotira qurilmalarining kamchiliklari, shuningdek, statik xotirada saqlash qurilmalar xotira yacheykalarining katta o'lchamlaridan, dinamik xotira qurilmalari va mantiqiy sxemali flesh-xotirani integratsiyalashdagi qiyinchilik, flesh-xotiradan ma'lumotlarni o'qishning past tezligidan va ularning cheklangan xizmat ko'rsatishi muddatidan iborat.

Xotirada saqlash qurilmalari sohasida yigirmaga yaqin muqobil texnologiyalar mavjud. Bu magnit, ferroelektrik, molekulyar, MEMS-texnologiyalar, nanoquvurdagi xotira va boshqalar hisoblanadi.

Eng "ilg'or" zamonaviy flesh-xotira taxminan 90 nm yacheyka o'lchamlariga ega. Raqamli kameralar, MP3 pleerlar, USB-biriktirishlar va videokameralarda oddiy foydalanish tufayli Flash-xotira ommaviylashib ketdi. Ishlab chiqarish jarayonida qo'yiladigan fizik cheklavlar tufayli Flash-chiplarni kamaytirishga bo'lgan barcha urinishlar muvaffaqiyatsiz tugadi.

Infineon olimlari uch o'lchamli hajmiy tuzilmaga ega bo'lgan maydoniy FinFET-tranzistor (4.1-bo'limga qarang) tufayli 20-nanometrli yangi flash-xotira chipini yaratishga muvaffaq bo'lishdi. Yangi flash-xotira chipi qurilmani energiya bilan ta'minlamasdan, bir bitni uzoq vaqt saqlay oladi. Bunda 32 Gbitgacha ma'lumotni saqlashi mumkin bo'lgan yangi flash-chip an'anaviy chiplarga qaraganda 8 baravar kichik bo'ladi.

Chiplarni ishlab chiqaruvchi kompaniyalar SRAM-xotira (Static Random Access Memory) yacheykalarini yaratish misolida yangi texnologiyalarni aktiv ravishda sinovdan o'tkazmoqda. 2000-nchi yillarning o'rtalarida IBM kompaniyasi dunyodagi eng kichik SRAM-xotira chipini ishlab chiqdi. Yangi SRAM-yacheykalari atigi oltita tranzistordan iborat bo'lib, oldingi tayyorlangan namunalarning yarmiga teng va ommaviy

ishlab chiqarishda ishlatilgan namunalardan 10 barobar kichikroq o'lchamlarga ega.

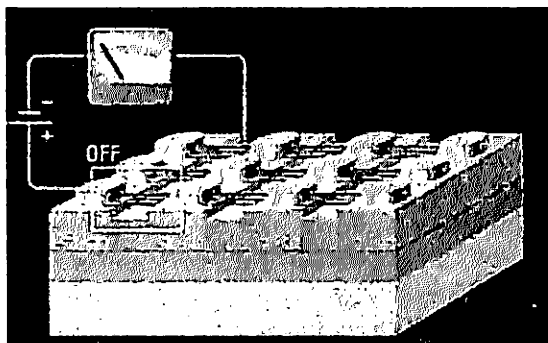
Nantero (Massachusetts, AQSH) kompaniyasi uglerodli nanoquvurlar asosidagi elektron xotiraning yangi eksperimental modeli - NRAM (Nanotube-based Random Access Memory) yaratilganligi haqida xabar berdi. Bunday xotira xotirada saqlash qurilmalarining eng yaxshi sifatleri - arzonligi (DRAM) va energiyaga bog'liq emasligi (flesh-xotira) sifatlarini o'zida birlashtiradi, shuningdek, harorat va magnit maydonlar ta'siriga yuqori barqarorlikka ega bo'ladi.

Kompaniya muhandislariga standart o'lchamdagi kremniyli plastinada har biri bir nechta nanoquvurlardan tashkil topgan 10 milliard xotira yacheykalarini joylashtirishga erishildi. Xotirani ishlab chiqarish uchun standart fotolitografiya jarayonidan foydalaniladi: dastlab kremniy oksididan taglikka nanoquvurlar yotqiziladi, keyingi ishlov berish jarayonida esa noto'g'ri yo'naltirilgan quvurlar chiqarib tashlanadi. Keyin oddiy litografiya usulida bir-birlariga nanoquvurlarning "qalin" tasmalari bilan bog'langan elektr kontaktlari "chiziladi". Bunda nanoquvurlarning fazoviy yo'nalishi va ularning bir xilligi darajasi muhim emas; asosiysi, tasmalar kerakli mexanik xususiyatlarga ega bo'lishidan iborat. Shunday qilib, ishlab chiquvchilarga fazoda bir xil yo'naltirilgan nanoquvurlarni joylashtirish qiyinchiliklarini engishga erishildi.

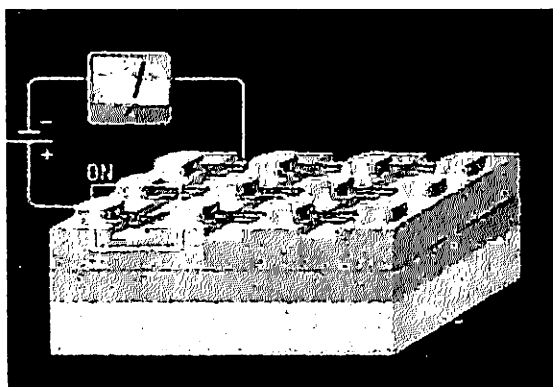
Xotira sxemasi taxminan bir-birlarining ustida 100 nm masofada joylashgan ikkita kremniy oksidlari plastinasidan iborat. Nanoquvurlar xuddi yuqori plastinada osilgan va elektr zaryad paydo bo'lguncha van-der-Vals kuchlari ta'siri ostida shunday holatda saqlanadi. Pastki plastinaga tok berilganda quvurlar ikkita plastinalarni bog'lash bilan o'z holatlarini o'zgartiradi. Bu holat yacheykada "1" qiymatli bitni bo'lishiga mos keladi. Agar quvurlar plastinalarni tutashtirmasa, u holda yacheykada "0" qiymatga ega bit bo'ladi (8.1- va 8.2-rasmlar).

Nanoquvurning holati elektr ta'minotining bo'lishidan qat'iy nazar ta'sir etadigan Van-der-Vals kuchlarining ta'siri orqali aniqlanadi. Elektr impulsleri faqat quvurlarning holatini o'zgartirish uchun kerak bo'ladi.

Ko'rsatilgan holatlar orasidagi har bir alohida o'tishda bir necha o'nlab nanoquvurlar ishlatiladi, tizimni ma'lumotlarni tasodifan yo'qotishidan himoya qiladigan ortiqchalik yaratiladi. "Yopiq" va "ochiq" holatlarda nanoquvurlar tizimi turli elektr qarshiliklarga ega bo'ladi, buning natijasida ma'lumotlarni o'qish mumkin.



8.1-rasm. NRAM yacheykasida "0" yozilgan



8.2-rasm. NRAM yacheykasida "1" yozilgan

Bunda qayta ulanishga zamonaviy operativ xotiradagi taxminan 2 ns oʻrniga taxminan 0,5 ns talab qilinadi. NRAM yacheykalaridagi axborotni yozish zichligi operativ xotira mikrosxemalaridagi axborotni yozish zichligi bilan tenglashadi. Istiqbolda maʼlumotlarni yozish zichligi 1 sm²ga trillion bitga yetishi mumkin, bu zamonaviy operativ xotiradagidan 1000 barobar koʻp.

8.1.2. Superkondensatorlar

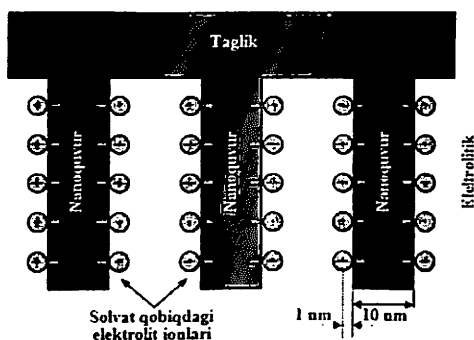
Superkondensatorlar qisqa vaqt ichida katta miqdorda energiya bera oladigan elektr energiyasini saqlash uchun qurilmalar hisoblanadi. Dvigatellarni past haroratlarda ishonchli ishga tushirish uchun, shuningdek, akkumulyatorlar batareyalari zaryadsizlanganda va kuchli va qisqa energiya impulsi zarur boʻladigan boshqa joylarda superkondensatorlar

talab qilinadi. Superkondensatorlar yuqori quvvat va past o'tish toklar bilan ajralib turadi, o'n minglab zaryad-razryad sikllariga chidaydi, ular qisqa vaqtlar ichida zaryadlanishi mumkin.

Rossiya Fanlar akademiyasi Sibir filialining noorganik kimyo instituti olimlari superkondensatorlarni yaratish uchun uglerodli nanoquvurlardan foydalanishni taklif qilishdi. Ma'lumki, eng oddiy kondensatorning sig'imi qoplamalar yuzasiga proporsional va ular orasidagi masofaga teskari proporsional hisoblanadi. Ionistorda elektrodning zaryadlangan yuzasi va elektrolit ionlari qatlami orasidagi masofa juda kichik, g'ovakli o'tkazgichning (masalan, aktivlashtirilgan uglerodning) solishtirma yuzasi $1000-1500 \text{ m}^2/\text{g}$ ga tengligi tufayli bunday qurilmaning sig'imi 100 F/g dan oshishi mumkin. Ta'kidlaymizki, an'anaviy elektrolitik kondensatorlar uch tartibga kichik solishtirma sig'imga ega.

Ikki qatlamli kondensatorning juda katta sig'imini ta'minlash uchun elektrod materiali yaxshi elektr o'tkazuvchanlik, yuqori solishtirma yuza, kimyoviy va issiqlikka barqarorlik kabi xususiyatlarga ega bo'lishi kerak. Bu xususiyatlarning barchasi uglerodli materiallarga xos. So'nggi yillarda elektr kimyoviy aktiv elektrodni tayyorlash uchun istiqbolli bo'lgan uglerodli nanomateriallar ro'yxati bir qatlamli va ko'p qatlamli **nanoquvurlar** hisobiga kengaydi.

Uglerodli nanoquvurlar qator ko'rsatkichlar bo'yicha an'anaviy materiallardan ustun hisoblanadi. Uglerodli nanoquvurlar massivi asosan tok o'tkazuvchi taglik yuzasiga perpendikulyar yo'naltirilgan geometriya alohida qiziqish uyg'otadi, bu elektrodning samarali yuzasini sezilarli oshirish va elektr tokini oqib o'tishi shartlarini yaxshilash imkonini beradi (8.3-rasm).



8.3-rasm. Superkondensatordagi nanoquvurlar massividan katodning tuzilish sxemasi

Nanoquvurning holati elektr ta'minotining bo'lishidan qat'iy nazar ta'sir etadigan Van-der-Vals kuchlarining ta'siri orqali aniqlanadi. Elektr impulslari faqat quvurlarning holatini o'zgartirish uchun kerak bo'ladi.

Ko'rsatilgan holatlar orasidagi har bir alohida o'tishda bir necha o'nlab nanoquvurlar ishlatiladi, tizimni ma'lumotlarni tasodifan yo'qotilishidan himoya qiladigan ortiqchalik yaratiladi. "Yopiq" va "ochiq" holatlarda nanoquvurlar tizimi turli elektr qarshiliklarga ega bo'ladi, buning natijasida ma'lumotlarni o'qish mumkin.

Oddiy kondensatorlardan farqli ravishda superkondensatorida ikkinchi elektrod aslida elektrolit bo'lib, u 1 V tartibdagi kuchlanishda elektrod yuzasida taxminan 1 nm xarakteristik masofali suv molekullaridan tashkil topgan solvat qobiqdagi ionlar qatlamini shakllantirishga imkon beradi.

Hozirgi vaqtda Rossiya Fanlar akademiyasi Kimyo instituti Sibir filialida uzunligi 3 mmgacha bo'lgan uglerodli nanoquvurlar massivlarini sintezlash usullari ishlab chiqilgan. Massivning eng katta qalinligiga 800 °C haroratda katalizator bilan uglevodorod aralashmasining uzluksiz injeksiyalanishi natijasida erishildi. Suvli elektrolitlardagi yo'naltirilgan uglerod nanoquvurlari massividan superkondensatorlarning solishtirma sig'imi 100-120 F/g ni tashkil qiladi.

8.1.3. Uch o'lchovli nanoo'lchamli yarimo'tkazgichli asboblari

Aytish kerakki, uch o'lchovli integral mikrosxemalarni yaratishga urinishlar o'tgan asrning 70-nchi yillari boshidan beri universitetlar, tadqiqot laboratoriyalari va alohida olimlar tomonidan amalga oshirilgan. Tuzilmasi lazer nurlari yordamida o'zgartirilishi kerak bo'lgan polikristalli kremniydan foydalanishdan tashqari, bir nechta ikki o'lchamli mikrosxemalarni ustma-ust qo'yishga imkon beradigan boshqa konstruktiv yechimlar ham ko'zda tutilgan.

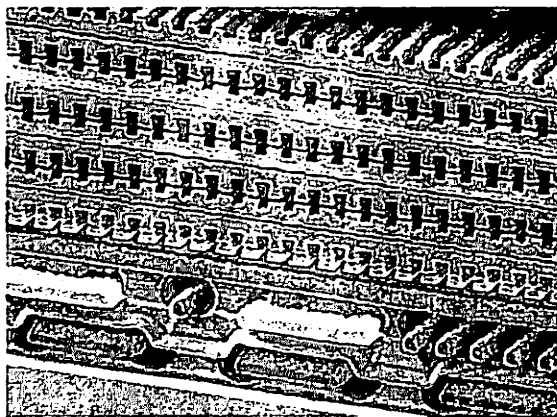
Zamonaviy integral mikrosxemalar ikki o'lchamli (planar) hisoblanadi, chunki yaxshi tranzistorlar yaratish uchun zarur bo'ladigan kristallarning sifati faqat taglikda yoki kremniy asosining o'zida saqlanib qoladi. Natijada tranzistorlar faqat kremniy taglikining yuqori qatlamida yaratiladi, taglik ostidagi bo'shliq esa faqat o'zaro bog'lanishlar uchun ishlatiladi.

Uch o'lchovli texnologiya ikkita ma'lum afzalliklarga ega. Birinchidan, bu har bir qurilma uchun narxlarning sezilarli kamayishi va

ikkinchidan, kristalldagi tranzistorlar sonining yuza birligiga to'g'ri keladigan elementlar soniga hisoblaganda Mur qonunida nazarda tutilganidan kam bo'lmagan sur'atlarda oshirish hisoblanadi.

Binobarin, uch o'lchovli integral sxemaning tuzilmasi ikki o'lchovli arxitektura asosida qurilgan, u holda uch o'lchovli sxema yarimo'tkazgichli qurilmalar sohasida mavjud barcha yutuqlardan foydalanishi va yangi texnik yechimlar diapazonini yaratishi mumkin. Elementlarning vertikal joylashishi tufayli mumkin bo'ladigan zichlikning keskin ortishi o'sha bir ishlab chiqarish texnologiyasiga ega an'anaviy mikrosxemalarga qaraganda, 3D-mikrosxemalarni ishlab chiqarishga xarajatlarni ko'p karrali kamayishiga yordam beradi.

Matrix Semiconductor firmasining yangi mahsulotlari asosiga tranzistorlarni ko'p qatlamli joylashtirish texnologiyasi qo'yildi. Kompaniyaning investorlari sifatida Nintendo, Microsoft, Seagate, Sony va Thomson kabi yirik korporatsiyalar qatnashadi. Taiwan Semiconductor Manufacturing Corporation (TSMC) va Matrix Semiconductor kompaniyasining dunyodagi birinchi Matrix 3-D Memory uch o'lchovli yarimo'tkazgichli tijorat modeli 2001 yil oxirida taqdim etildi. Bir qator kechikishlarga qaramay, 2004 yilda Matrix Semiconductor Tayvan yarimo'tkazgichli gigant TSMC asosida turkum uch o'lchovli xotira mikrosxemalarini chiqardi. Asosiy qatlamlarni olish uchun kristallarni ishlab chiqarishda 0,15 mkm, keyingi ishlab chiqarishda 0,13 mkm loyihaviy me'yorlarga rioya qilindi. Flesh-xotiradan farqli ravishda Matrix 3-D Memory mikrosxemalari (8.4-rasm) bir marta yoziladigan DXQLar hisoblanadi. Shu sababli ular uchun potensial bozor ancha tor.



8.4-rasm. Matrix 3D Memory kristalli to'rt qatlamli tranzistorlarga ega

Biroq, bunday mahsulotlarning narxi flesh-xotira narxining deyarli yarmiga teng. Shu sababli, kompaniyaning e'tibori birinchi navbatda audio, video yozuvlar va boshqa o'zgarmas fayllarga ega bo'lgan kristallarni ishlab chiqaradigan buyurtmachilarga qaratilgan.

2005 yilda Matrix Semiconductor to'rt darajali tranzistorlarga ega, sig'imi 1 Gbit va o'lchami atigi 31 mm² bo'lgan yangi uch o'lchovli xotira kristallini o'zlashtirdi.

Adabiyotlarni tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, mikro- va nanoelektronika texnologiyalarining rivojlanishidagi bu yo'nalish juda istiqbolli hisoblanadi.

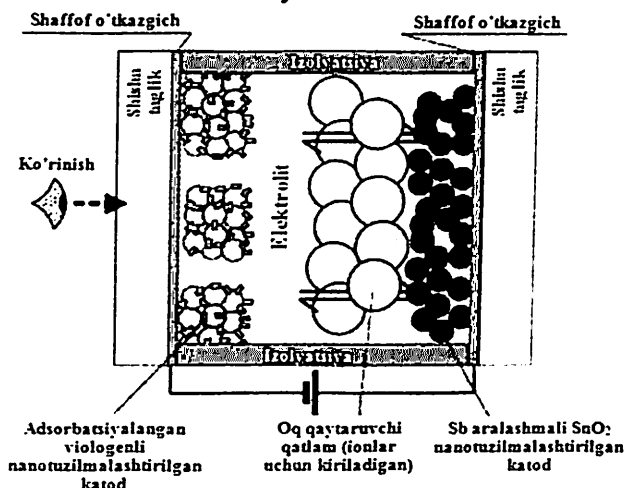
8.2. Nanoelektronikaning funksional qurilmalari

8.2.1. Nanodispleylar

Nanotexnologiyalar yordamida tayyorlangan displeylar hozirda bozorni aktiv egallamoqda. Misol bo'lib Irlandiyaning Ntera nomli kompaniyasining NanoChromics Display (NCD) nanodispleyi hisoblanadi. Bu displeyning nomlaridan biri "qog'ozdagi siyoh turdag displey" (*ink-on-paper display*) hisoblanadi, chunki displeyda hosil bo'lgan rasm siyoh bilan chizilgan qog'ozdagi rasmga o'xshaydi. Sinovlar shuni ko'rsatdiki, tasvir haqiqatan ham zid, bu ekran uchun ko'rish burchagi esa 180 darajani tashkil etadi. Istalgan displeylar uchun bu parametrning maksimal qiymatiga mos keladi. NCD -ekranlarida matritsaning reaksiyasi tezligi ham yetarlicha yuqori va sekundiga 60 kadrlar chastotani ta'minlay oladi.

Hatto ta'minot o'chirilgan bo'lsa ham, tasvir displeyda qoladi. Bu samaraga piksellarni shakllantiradigan pigment qatlamlarini qayta ulanishi tufayli erishiladi. Tasvir pigmentdan hosil bo'lganligi sababli, displey qo'shimcha past yoritishni talab qilmaydi, bu uning energiya iste'molini sezilarli kamaytiradi. Ta'kidlash joizki, ekran dastlabki tasvirni chizish uchun yetarlicha ko'p energiya sarflaydi. Biroq, olingan tasvir ko'p kunlar yoki haftalar davomida qo'shimcha elektr ta'minoti talab qillmasdan ekranda qoladi. Bir xil o'lchamlarga ega bo'lgan NCD-qurilma SK-displey iste'mol qiladigan energiyaning atigi 10% ni iste'mol qiladi. NCD uzoq vaqt davomida tasvirni shakllantirish uchun energiya iste'mol qilmasligi (energiya faqat pigment qatlamlarini qayta ulanishi uchun kerak) bu asboblarning asosida turli vizual aks ettirish

elementlarini yaratishga imkon beradi. Ta'kidlaymizki, NCD-panelning ishchi kuchlanishi 1 Vdan oshmaydi.



8.5-rasm. NCD-ekranning ishlash prinsipi

Displeyda yuqori zidlikli tasvirni aks ettirish uchun ishlab chiquvchilar elektroxrom polimerlarning g'ayrioddiy xususiyatlaridan foydalanadi. NanoChromics displeyining ishlash prinsipi 8.5-rasmda tasvirlangan. Ekran bir nechta qatlamlardan iborat bo'lib, ularning ikkitasi - titan dioksidi nanozarrachalaridan tashkil topgan tashqi aks ettiruvchi qatlam va rang beruvchi pigmentli elektroxrom qatlam tasvirni shakllantiradi. Titan dioksidi va viologen orasidagi bo'shliq maxsus elektrolit bilan to'ldiriladi. Tashqi potensial bo'lmaganda ekran butunlay oq rangda ko'rinadi, lekin kuchlanish qo'yilganda viologen qora rangga yaqin bo'ladi. Agar kuchlanishning qutblari o'zgartirilsa, u holda qatlam faqat titan dioksidi pigmentin aks ettiruvchi ko'rinadigan holatga "qayta ulanadi". Buning hisobiga tasvir shakllantiriladi. Shunday qilib, NanoChromics displeyining alohida oraliqlarini "yoqish" yoki "o'chirish" bilan yaxshi zidlikli tasvirni yaratish mumkin. Elektroxrom nanozarrachalar asosidagi pigment qatlamining sezilarli harakatchanligi tufayli yetarlicha yuqori qayta ulanish tezligiga erishiladi, bu esa o'z navbatida zarur kadrlarni almashishi chastotasiga (sekundiga 60 kadrgacha) erishish imkonini beradi. Yangi monitorlar atrof-muhit haroratiga chidamli hisoblanadi. Masalan, NCD-displeyli stol soati -35 °Cdan + 80 °C gacha bo'lgan harorat diapazonida ishlaydi.

2011 yilda Samsung Electronics kompaniyasi *kvant nuqtalari* asosidagi birinchi to'liq rangli displey – QLED displeyini ishlab chiqish natijalarini taqdim etdi. Bu aktiv matritsa bilan boshqariladigan 4 dyuyimli displey bo'lib, unda kvant nuqtali har bir rangli piksel yupqa qatlamli tranzistor orqali yoqilishi va o'chirilishi mumkin. Namuna shisha va egiluvchan plastmassadan ikkita variantlarda tayyorlangan. Baholashlarga ko'ra, kvant nuqtalaridagi displeylar an'anaviy SK-displeylarga qaraganda besh marta kam energiya iste'moliga, shuningdek, OLED-displeylarga qaraganda katta xizmat ko'rsatish muddatlariga ega. Bunda ishlab chiqarish narxi suyuq kristalli va OLED-ispleylarni tayyorlash xarajatlarining yarmiga teng bo'lishi mumkin. Hozirgi vaqtda QLED -displeylar bozorda keng tarqalgan.

8.2.2. Kimyoviy sensorlar

Noyob xususiyatlar tufayli **grafen** (5.2-bo'limga qarang) turli nanoelektronika qurilmalarda keng qo'llaniladi. Qator ishlarda yupqa qatlam yuzasiga biriktirilgan kimyoviy moddalarning alohida molekularlarini (masalan, NH_3 , CO , H_2O , NO_2) aniqlash uchun sezgir sensor sifatida grafendan foydalanish taklif qilingan. Alohida NO_2 molekularlarining grafenga biriktirilishini aniqlash uchun 1×1 mkm o'lchamli sensor ishlatilgan. Bu sensingning ishlash prinsipi shundaki, turli molekularlar donor va akseptor vazifasini bajarishi mumkin, bu esa o'z navbatida grafen qarshiligining o'zgarishiga olib keladi. Ma'lumki, turli aralashmalar grafenning o'tkazuvchanligiga turlicha ta'sir etadi. Xususan, NO_2 molekulasi o'z paramagnit xossalari tufayli yaxshi akseptor hisoblanadi, diamagnit N_2O_4 molekulasi elektr neytrallik nuqtasiga yaqin sathni hosil qiladi. Umumiy holda, molekulari o'ziga xos magnit momentga ega bo'lgan (juftlanmagan elektron) aralashmalar kuchli legirlash xususiyatlariga ega bo'ladi.

8.2.3. Magnetoelektronika qurilmalari

Sanoatda ishlab chiqariladigan magnit raqamli qurilmalarni ishlab chiqishdagi taraqqiyot sezilarsiz bo'lishiga qaramay, Rossiyada va chet elda mos elementlar bazasini ishlab chiqish uchun jadal tadqiqotlar olib borilmoqda. Yaqin kelajakda o'ta katta axborot sig'imiga ega bo'lgan

xotirada saqlash qurilmalarining (XSQ) magnetoelektron mikrosxemalari ixtiyoriy tanlovli XSQlarning sezilarli qismini tashkil qiladi.

Hozirgi vaqtda saqlangan ma'lumotlarni o'qish uchun magnetorezistiv yoki tunnelli magnitli boshqariladigan samaralardan foydalanish bilan xotiraning magnit elementlarini tadqiq qilishga katta e'tibor qaratilmoqda. Eng katta amaliy qiziqishga ixtiyoriy tanlovli magnit XSQlar mikrosxemalari - MRAMlarni ishlab chiqishga qaratilgan tadqiqotlar ega. Bunday XSQlar nanoo'lchamli magnit xotira yacheykalaridan foydalanishda terabitli diapazonining axborot sig'imiga ega bo'lgan XSQ mikrosxemalari uchun asos bo'ladi. Nanoo'lchamli bitta domenli tuzilmalar asosidagi XSQlarni ishlab chiqish qiyinchiliklarga duch kelmoqda, ular orasida quyidagilarni ajratib ko'rsatish kerak bo'ladi:

- xotira yacheykalariga ularning yuqori joylashtirish zichligida ma'lumotlarni yozish muammosi, chunki boshqarish shinalari bo'yicha o'tkazish mumkin bo'lgan toklarning qiymatiga sezilarli cheklavlarda elementlarning magnitlanishini ta'minlash kerak;

- xotira yacheykalaridan ma'lumotlarni o'qish muammosi, uning yechimi hozirgi vaqtda yetarlicha yuqori magnetorezistiv o'zgartirish koeffitsientini ta'minlash uchun qidirilmoqda (boshqa o'qish usullari hali raqobatbardosh emas).

Magnit XSQlarning asosi metall elementlar va dielektrik qatlamlar bo'lib, ularning minimal o'lchamlari magnitlanishni barqaror saqlash prinsipial mumkinligi bilan cheklangan. Umuman olganda, XSQlarda yozish va o'qishning tashqi boshqarish talab qilinadi, ko'pchilik tuzilmalar uchun esa o'z kommutatsion elementiga (tranzistorga) ega bo'lish zarur. Hozirgi vaqtda metall magnit elementlarni kremniyli yarim o'tkazgichli KMDYAO' texnologiyalari bilan birlashtirish gibrid texnologiyalarini rivojlantirishga e'tibor qaratilmoqda.

Yarimo'tkazgichli tuzilmalarda erkin tashuvchilarning spinlarini (aylanishini) boshqarishga asoslangan **spintron** aktiv elementlar bo'yicha yo'nalishi istiqbolli hisoblanadi. Spin diodlari va spin tranzistorlari tuzilmalari va modellarining variantlari taklif qilingan. Bir turdagi spin harakatchan tashuvchilari ansamblini o'tish orqali tashishni boshqarish ham potentsiallar farq bilan, ham magnit maydon kuchlanganligi bilan amalga oshirish mumkin, u holda bunday elementlar xotira elementlarini raqamli tartibga solish va magnit sezgir o'qish o'zgartirgichlarini qurish uchun qiziqarli bo'ladi.

Ishlanmalarning yangi istiqbolli yo'nalishlari muntazam nano- va

mikroo'lchamli magnit tuzilmalarda spin to'liqlarining tarqalishi bilan bog'liq fizik jarayonlardan (**magnonika**), shuningdek, boshqariladigan turli tashqi ta'sirlar ta'siri ostida vujudga keladigan elastik deformatsiyalar hisobiga materiallarning magnit xususiyatlarining o'zgarishini o'rganuvchi steyntronikadan foydalanish bo'lishi mumkin. Magneto-elektronikaning prinsipial muammosi bunday tuzilmalarni yaratishning yangi fizik va texnologik prinsiplarini ishlab chiqish zaruratidan iborat.

Nazorat savollari

1. UNQ asosidagi xotira elementlarining ishlash prinsipiini tushuntiring.
2. Superkondensatorning tuzilishi va ishlash prinsipini tavsiflang.
3. Uch o'lchovli nanoo'lchamli ISlarning afzalliklari nimada?
4. Uch o'lchovli ISlari ishlab chiqarishning texnologik qiyinchiliklari qanday?
5. "Qog'ozdagi siyoh" turdagi nanodisplay qurilmasini tushuntiring.
6. Grafen asosidagi nanokimyoviy sensorning ishlash prinsipini tavsiflang.
7. Magneto-elektronika qurilmalar qanday samaralarda ishlaydi?

GLOSARIY

Ballistik tashish	Erkin yo‘l uzunlikdan kichik o‘lchamli tuzilmalarda zaryad tashuvchilarni ularni sochilishsiz bo‘lib o‘tadigan tashilishi
Korpussiz mikrosxema	Kristallar va chiqishlarga ega bo‘lgan IS
“Murdagidan katta” (More than Moore)	Yarimo‘tkazgichli an’anaviy texnologiyalar va qo‘lanishlardan tashqari, texnologiyalar yordamida amalga oshiriladigan yangi mikro va nanoelektronika sohasi
Vakuimli ISlar	Juda kichik vakuumli O‘YUCH-qurilmalar asosida qurilgan O‘YUCH-integral mikrosxemalar
Geteroo‘tish	Geterotuzilmaning ikkita qismlarini ajratadigan chegaraviy qatlam
Geterotuzilma	Ikki yoki undan ortiq turli yarimo‘tkazgichli moddalardan (materiallardan) tayyorlangan sun‘iy tuzilma bo‘lib, unda ikkita moddalarning (materiallarning) bo‘linishi chegarasi muhim rol o‘ynaydi
Geteroo‘tishli bipolyar tranzistorlar (GBPT yoki HBT (ing.))	Emitterga noasosiy tashuvchilarning injeksiyalanishini so‘ndiradigan va legirlashni oshirish bilan baza qarshiligini kamaytirishga imkon beradigan bipolyar tranzistor
Geterotranzistor	Bir yoki bir nechta geteroo‘tishlarga ega bo‘lgan geterotranzistor
FinFET-tranzistor (Fin Field Effect Transistor)	“Suzgichli” turdagi vertikal maydon tranzistor bo‘lib, o‘z nomini konstruktiv o‘ziga xos xususiyatlari tufayli olgan. Bu asbobda yupqa kremniy tana suzgich (fin) shaklida bo‘lib, zatvor bilan o‘ralgan
Grafen (ing. Grafen)	Olti burchakli ikki o‘lchamli kristall panjaraga sp^2 bog‘lanishlari bilan bog‘langan uglerod atomlari qatlami
Ikki o‘lchamli elektron gaz (IEG)	Potensial chuqurchada va kuchsiz elektr maydonlarida to‘plangan va faqat o‘tish chegarasiga parallel harakatlanishi mumkin bo‘lgan elektronlar
Gann diodi	O‘z konstruksiyasi asosida “metall-yarimo‘tkazgich” to‘g‘rilash kontaktiga ega bo‘lgan va impulslarning sezilarli quvvatlarida gigagersli chastotalar diapazonida ishlaydigan diod
Shottki to‘sig‘ili diod	“Metall-yarimo‘tkazgich” to‘g‘rilash kontakti
Mur qonuni	Eng tezkor protsessorlarda har ikki yilda tranzistorlarning shartli soni ikki marta ortadi

“KMOYAO‘ chegara-laridan tashqarida” (Beyond CMOS)	Bu nanotexnologiyalar, yangi materiallarni o‘zlashtirilishi
Integral texnologiya	Yagona texnologik jarayonda ko‘p sonli mahsulotlarni ishlab chiqarish yo‘llari
Integral sxema (IS)	Ma‘lum o‘zgartirish, signallarga ishlov berish, axborotni saqlash funksiyalarini bajaradigan va bir butun sifatida qaraladigan elektr bog‘langan elementlarning yuqori zichligiga ega bo‘lgan mikroelektron mahsulot
Kvant tolasi (simi)	Bu bitta o‘lchamli (1D) tuzilma bo‘lib, u bir emas, balki ikki nanometrligacha o‘lchamlarga ega va zaryad tashuvchilar faqat to‘la o‘qi - x o‘qi bo‘ylab erkin harakat qilishi mumkin
Kvant-o‘lchamli tuzilma	O‘lchamlaridan biri fonon to‘lqin uzunligiga teng bo‘ladigan nanoo‘byekt
Kvant nuqtasi	Nol o‘lchamli (0D) ob‘ekt bo‘lib, unda zaryad tashuvchilarning harakatlanishi har uchala o‘lchovlar yo‘nalishlarda cheklangan
Kvant chuqurchasi	Qalinligi zaryad tashuvchilar uchun de-Broyl to‘lqin uzunligiga tenglashadigan kristallning yupqa qatlami, u ikki o‘lchamli (2D) tuzilma bo‘lib, unda kvant cheklolvar faqat qatlamga perpendikulyar bo‘lgan bitta yo‘nalishda amal qiladi
Komponent	Mustaqil mahsulot sifatida ajratilishi mumkin bo‘lgan ma‘lum radioelement funksiyasini bajaradigan integral mikrosxemaning bir qismi
Kontakt yuzalar	IS korpusining chiqishlariga ulash uchun mo‘ljallangan kristalldagi metallashtirilgan oraliqlar
IS kristali	Bitta platinada bir nechta funksional qurilmalar bajarilganidan uni kesishdan keyin olingan platinaning qismi
Kulon qamali	Kulon itarilishi tufayli tunnelli o‘tishga kuchlanish berilganda ikkita tunnelli kontaktlar orasiga qo‘yilgan kvant nuqtasi orqali elektronlarning o‘tishini bloklash (to‘shish)
Magnonika	Muntazam nano- va mikroo‘lchamli magnit tuzilmalarda spin to‘lqinlarining tarqalishiga bog‘liq fizik jarayonlardan foydalanishni o‘rganadi
Memristor	Magnit oqimining o‘zgarishini zaryadning o‘zgarishi bilan bog‘laydi (<i>memory</i> va <i>resistor</i> so‘zlaridan qisqartma)

Metall o'tkazgich	Taglik rel'yefining sun'iy yaratilgan zinalari hisobiga qadamlari tufayli uziladigan va bu bilan tunnelli o'tishlarni shakllantiradigan nanosim
Metamorfiu NEMT (m-NEMT)	GaAs-taglikda AlInAs/InGaAs tuzilmaga ega bo'lgan tranzistorning modifikatsiyasi
Mikropolosali liniyalar	Yuqori ϵ dielektrik singdiruvchanlikli h qalinlikdagi taglikda joylashgan to'rtburchakli kesimli W kenglikdagi tasmali turdagi o'tkazgich
Mikroelektronika	Integral guruhli texnologiya asosida ishlab chiqariladigan minimal o'lchamli va yuqori ishonchlilikka ega elektron qurilmalarni ishlab chiqish, ishlab chiqarish va ulardan foydalanish bilan shug'ullanadigan elektronika bo'limi
Molekulyar elektronika	Biologik ob'ektlar va biologik jarayonlar bilan molekulyar va to'qimalar darajasida shug'ullanadigan va ekologiya, tibbiyot, qishloq xo'jaligi, milliy mudofaa va xavfsizlikning ko'plab muammolarini yechishga yordam beradigan nanobiotexnologiyaning tarkibiy qismi
NanoChromics Display (NCD) nanodispleyi	"Qog'ozdagi siyoh turdagi displey" (<i>ink-on-paper display</i>), displeyda shakllantirilgan tasvir siyoh bilan chizilgan qog'oz rasmga o'xshaydi
Nanomateriallar	Nanometrli xarakteristik o'lchamlar va fizik va/yoki kimyoviy o'zaro ta'sirlarning alohida namoyon bo'lishiga ega bo'lgan asosiy elementlarning sun'iy yoki tabiiy tartiblangan yoki tartiblanmagan tizimi bo'lgan moddalar va moddalar kompozitsiyalari
Nanotexnologiya	O'lchamlari molekulyar o'lchamlarga, ya'ni nanometrning ulushlaridan o'nlab yoki ba'zi hollarda bir yoki ikki yuz nanometrlarga tenglashadigan alohida tuzilmaviy elementlarga ega bo'lgan funksional elementlar va ulardan yig'ilgan tizimlar, shuningdek, nanomateriallarni olish usullari
Nanotexnika	Nano o'lchamlarga o'tishda tizimlarning yangi xususiyatlari va funksional imkoniyatlari yordamida yaratilgan va oldin erishib bo'lmaydigan vazn-hajm va energetik ko'rsatkichlar, texnik-iqtisodiy parametrlar va funksional imkoniyatlarga ega bo'lgan mashinalar, mexanizmlar, asboblarni, qurilmalar, materiallar
Nanoelektronika	Elementlarning 100 nmdan kichik bo'lgan o'ziga xos topologik o'lchamlariga ega bo'lgan integral elektron sxemalarni yaratish fizik va texnologik asoslarni ishlab chiqish bilan shug'ullanadigan elektronika

	sohasi
Kuchlangan kremniy (strained sillicon)	Atomlar orasidagi masofa kristall panjaraning tabiiy qadamiga teng bo'lgan kanal uchun kremniy qatlamini shakllantirish
Bir elektronika	Bitta elektronli qurilmalarni yaratish, ularning ishlashi elektronni tunnellashtirish orqali harakatlanishiga asoslangan va axborot bitta elektron bilan ifodalanadi
IS tagligi	Gibrid va yuqqa qatlamli IS elementlari, elementlararo va komponentlararo ulanishlar, kontakt yuzalarni tayyorlashga mo'ljallangan asos
Yarimo'tkazgichli plastina	ISlar yaratish uchun ishlatiladigan asos
Elektronlar yuqori harakatchanligi psevdomorfik tranzistor	Legirlangan AlGaAs qatlami (30 - 40 Å) va legirlanmagan GaAs (1 mkm) qatlami orasiga qalinligi 200 Å bo'lgan TnGaAs ikki o'Ichovli elektron gazning kiritilishi bilan tranzistorning modifikatsiyalanishi
Rezonansli-tunnelli diod	Potensial to'siqlar bilan ajratilgan, ketma-ket joylashgan kvant chuqurchalaridan tashkil topgan, ikkita chetki qarama-qarshi sohalarga elektr kontaktlarga ega bo'lgan davriy tuzilma
Rezonansli-tunnelli bipolyar tranzistor	Emitter-baza yoki baza sohasiga o'rnatilgan rezonansli-tunnelli tuzilmaga ega bo'lgan bipolyar tranzistor
Yorug'lik diodi	Elektr tokining energiyasini yorug'lik energiyasiga o'zgartiradigan ikkita kontaktli yarimo'tkazgichli asbob
Integral mikrosxemalar turkumi	Turli funksiyalarni bajaradigan, yagona konstruktiv-texnologik konstruksiyaga ega bo'lgan va birgalikda foydalanish uchun mo'ljallangan IMS turlari to'plami
Elektronning spini (aylanishi)	Elektron magnit energiyasining ikkita holatlaridan iborat tizim
Spinli ventill	Ishlashi spin-qutblangan tokni o'tkazish yoki to'xtatish bo'lgan qurilma
Spintron aktiv elementlar	Yarimo'tkazgichli tuzilmalarda erkin tashuvchilarning spinlarini boshqarishga asoslangan elementlar
Spintronika	Elektronlarning kvant spin holatidan foydalanish va ularning zaryad bilan o'tkazish
Spinli tokli o'tkazish (spinli- qutblangan tok)	Magnit maydon ta'sirida magnitlangan metallarda Fermi sathda ikki turdagi spinlarning muvozanatsiz joylashishi natijasida vujudga keladigan tok

Spin-Xoll samarasi	Namunaning turli qismlaridan turli spinli elektronlarni tokka perpendikulyar yo'nalishda itarilishi
Streytronika	Boshqariladigan turli tashqi ta'sirlarda elastik deformatsiyalar hisobiga materiallar magnit xususiyatlarining o'zgarishini o'rganish.
Superkondensatorlar	Elektr energiyasini saqlash qurilmalari bo'lib, qisqa vaqt ichida katta miqdorda energiya bera oladi
HEMT tranzistor (High Electron Mobility Transistor)	Elektronlarning yuqori harakatchanligiga ega bo'lgan tranzistorlar tuzilmasi
"Uch zatvorli" tranzistor	Moslashtirish sirti bitta tekislik bo'lgan planar tranzistorga qaraganda uchta tomonlardan zatvor bilan o'ralgan kanalli tranzistor
Tunnelli diod	Keng polosalilik, past shovqin, yuqori haroratga barqarorlikka ega bo'lgan tunnel samarasidagi $n-p$ -o'tish
Tunnel samarasi	Zarrachani potensial to'siqqa ega bo'lgan soha orqali o'tkazish, binobarin, bu to'siqning balandligi zarrachaning to'liq energiyasidan katta bo'ladi
Uglerodli nanoquvurlar	Ma'lum tarzda quvurlarga o'ralgan grafen qatlamlari
Fulleren	Ko'p burchakli (poliedrik) uglerod klasteri
Raqamli bir elektronika	Ma'lumotlarning bir biti bitta elektron bilan ifodalanadi bitta elektronli qurilmalarning yaratilishi
Element	Mustaqil mahsulot sifatida ajratib bo'lmaydigan ma'lum elektr radioelement funksiyasini bajaradigan integral sxemaning bir qismi
Energetik spektr	Ma'lum bir sharoitlarda zarracha E energiyasining bo'lishi mumkin qiymatlari to'plami
3D tizimlar	Energiyasi zonalar chetiga yaqinlashganda to'liq in vektoriga bog'liq bo'ladigan hajmiy qattiq jismlar
2D tizimlar	Elektronlarning bitta z koordinata bo'ylab harakatlanishi cheklangan bir o'lchamli kvant chuqurchasiga ega bo'lgan d qalinlikdagi yupqa qatlamlar
1D tizimlar	Harakati ikki koordinatalar bo'yicha cheklangan ikki o'lchamli kvantli chuqurchali kvant tolalari yoki simlari
0D tizimlar	Harakati uchta koordinatalar bo'yicha cheklangan kvant chuqurchalariga ega bo'lgan kvant nuqtalari

ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Asosiy adabiyotlar

1. Лучинин, В. В. Введение в индустрию наносистем / В. В. Лучинин // Нано- и микросистемная техника. - 2005. - №5. - С. 2-10.
2. Асеев, А. Л. Наноматериалы и нанотехнологии / А. Л. Асеев // Нано- и микросистемная техника. - 2005. - №3. - С. 2-9.
3. Пустовалов, В. К. Нанотехнологии: состояние, проблемы, перспективы / В. К. Пустовалов // Новости науки и технологий. - 2006. - №1. - С. 43-51.
6. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю. А. Чаплыгина - М. : Техносфера, 2005. - 448 с.
7. Ткалич, В. Л. Физические основы наноэлектроники : учебное пособие / В. Л. Ткалич, А. В. Макеева, Е. Е. Оборина. - СПб. : СПбГУ ИТМО, 2011. - 83 с.
8. Макушин, М. Мировая микроэлектроника: чем меньше размеры, тем крупнее игроки / М. Макушин // Электроника : Наука, Технология, Бизнес. - 2007. - № 6. - С. 104-112.
9. Красников, Г. Я. Основные тенденции и перспективы развития микро- и наноэлектроники [Электронный ресурс] / Г. Я. Красников. - Режим доступа: http://www.nanometer.ru/2008/07/06/mikron_53429.html (дата обращения 11.12.2016).
10. Драгунов, В. П. Основы наноэлектроники : учебное пособие / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000. - 332 с.
11. Наноэлектроника. Часть 1. Введение в наноэлектронику / Под. Ред. А.А. Орликовского - М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 720 с.
12. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. - М. : Физматлит, 2007. — 416 с.
13. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / отв. редактор А. Л. Асеев. - Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004.- 368 с.
14. Суздаев, И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздаев. - М. : КомКнига, 2006. - 592 с.
15. Щука, А. А. Наноэлектроника / А. А. Щука. - М. : Физматкнига, 2007. - 464 с.

16. McCord, M. A. SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication / M. A. McCord, M. J. Rooks. - 2000.

17. Прецизионная изображающая многослойная оптика для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов / М. М. Барышева [и др.] // Успехи физических наук. - 2012. - №7. - С. 727-747.

2. Qo'shimcha adabiyotlar

1. Мирзиёев Ш.М. Эркин ва фаровон, демократик Ўзбекистон давлатини биргаликда барпо этамиз. Ўзбекистон Республикаси Президентининг лавозимига киришиш тантанали маросимида бағишланган Олий Мажлис палаталарининг кўшма мажлисидаги нутқи. –Т.: “Ўзбекистон” НМИУ, 2016. – 56 б.

2. Мирзиёев Ш.М. Қонун устуворлиги ва инсон манфаатларини таъминлаш – юрт тараққиёти ва халқ фаровон-лигининг гарови. Ўзбекистон Республикаси Конституцияси қабул қилинганининг 24 йиллигига бағишланган тантанали маросимдаги маъруза 2016 йил 7 декабрь. – Т.: “Ўзбекистон” НМИУ, 2016. – 48 б.

3. Мирзиёев Ш.М. Буюк келажагимизни мард ва олижаноб халқимиз билан бирга қураимиз. - Т.: “Ўзбекистон” НМИУ, 2017. – 488 б.

4. Ўзбекистон Республкасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида. - Т.:2017 йил 7 февраль, ПФ-4947-сонли Фармони.

5. Ergashov Y. S. Composition and Properties of Nanoscale Si Structures Formed on the $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ Surface by Ar^+ Ion Bombardment // Technical Physics, 2017, -V. 62, No. 5, pp. 777–780.

6. Эргашов Ё.С., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. Получение наноразмерных фаз силицидов металлов в приповерхностной области Si и изучение их электронных структур методом прохождения света. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. Россия, 2017, №4, -С. 104-108. (№40.Research Gate; IF=0,52).

7. Умирзаков Б.Е., Донаев С.Б. Модификация поверхности Pd и Pd-Wa ионной бомбардировкой //Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. 2014. вып. 2 (521), с.65–72.

8. Donaev S.B., Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A. Electronic Structure of $Ga_{1-x}Al_xAs$ Nanostructures Grown on the GaAs Surface by Ion Implantation // Technical Physics, 2015, Vol. 60, No. 10, pp. 1563–1566.
9. Donaev S.B., Djurabekova F., Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A. Formation of nanodimensional structures on surface of GaAs and Si by means of ion implantation // Physica status solidi (c) (2015), No. 1-2, p. 89-93.
10. Tashmukhamedova D.A., Ruzibaeva M.K., Tashatov A.K., Umirzakov B.E., Donaev S.B., Mavlyanov B.B. Analysis of the Structure and Properties of Heterostructured Nanofilms Prepared by Epitaxy and Ion Implantation Methods // Journal of Technical Physics, 2013, Vol. 58, No. 9., p. 1383–1386.
11. Донаев С.Б. Оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения наноструктур на основе Si и GaAs // Узбекский физический журнал. № 4, 2015, С. 229-233.
12. Щука, А.А. Самоорганизация ключ к нанотехнологиям в электронике / А. А. Щука // Вестник международной академии наук (русская секция). - 2008. - №1. - С. 52-58.
13. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин ; под ред. д-ра хим. наук Ю. А. Чизмаджаева. - М. : Мир, 1979. - 512 с.
14. Малыгин, А. А. Нанотехнология молекулярного наслаивания / А. А. Малыгин // Российские нанотехнологии. - 2007. - №3-4. - С. 87-100.
15. Громов, Д. Г. Металлизация в системах с наноразмерными элементами : учебное пособие / Д. Г. Громов. - М. : МИЭТ, 2011. - 204 с.
16. Металлизация ультрабольших интегральных схем [Электронный ресурс] : учебное пособие / Д. Г. Громов [и др.] - 3-е изд. (эл.). - М. : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2015. - 280 с.
17. Диэлектрики в нанoeлектронике / В. А. Гриценко [и др.]. - Новосибирск : Издательство СО РАН, 2010. - 257 с.

MUNDARIJA

KIRISH	3
1 BOB. MIKROELEKTRONIKANING ASOSIY TAMOYILLARI VA TUSHUNCHALARI	7
1.1. Asosiy atamalar va ta'riflar, integral mikrosxemalar turlari va ularning tasniflanishi	7
1.1.1. Asosiy atamalar va ta'riflar	7
1.1.2. Integral mikrosxemalar turlari va ularning tasniflanishi	12
1.1.3. IMS belgilashlar tizimi	20
2 BOB. IZOLYATSIYALASH USULLARI, MIKROELEKTRONIKANING ELEMENTLARI VA QURILMALARI	27
2.1. Elementlarni izolyatsiyalash usullari.....	27
2.1.1. Elementlarni izolyatsiyalash turlari va maqsadi.....	27
2.1.2 p-n-o'tish bilan izolyatsiyalash usullari.....	30
2.1.3. Dielektriklar qo'llanishi bilan izolyatsiyalash usullari	31
2.2. Integral tranzistorlar va diodlar	34
2.2.1. Integral tranzistorlari.....	34
2.2.2. Integral diodlar.....	40
2.3. Maxsus maqsadlardagi transistor tuzilmalari	44
2.3.1. Ko'p emitterli tranzistorlar	44
2.3.2. Ko'p kollektorli tranzistorlar	46
2.3.3. Shottki to'sig'ili tranzistorlar.....	47
2.3.4. Metall yarimo'tkazgich boshqarish o'tishiga ega bo'lgan maydon tranzistorlar	50
2.4. Yarimo'tkazgichli doimiy xotira qurilmalarining elementlari va zaryadli aloqa qurilmalar	52
2.4.1 MDYAO'-tranzistorlaridagi DXQ	52
2.4.2. MNOYAO' tranzistor	53
2.4.3. Suriladigan zatvorli MDYAO'-tranzistor.....	54
2.4.4. Ikki zatvorli MDYAO'-tranzistor.....	55
2.4.5. Zaryadli aloqali qurilmalar	57
2.5. Integral sxemalarning passiv elementlari	63
2.5.1. Integral rezistorlar	63
2.5.2. Integral kondensatorlar va induktivliklar	67
2.5.3. Kommutatsion bog'lanishlar	72
3 BOB. MIKROELEKTRONIKANING RIVOJLANISHIDAGI ZAMO-NAVIY YO'NALISHLAR	77
3.1. O'YUCH diapazoni IMS lari.....	77
3.1.1. O'YUCH elektronikasining elementlar bazasi	77
3.1.2. O'YUCH diapason integral tranzistorlari haqida tushunchalar	82

3.1.3. Monolit galiy arsenidli ISlar	85
3.2. Zamonaviy mikroelektronikada geterotuzilmalar	86
3.2.1. Geteroo'tishning asosiy xususiyatlari	86
3.2.2. Geteroo'tishda muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning o'ta injeksiyanishi	88
3.2.3. Ikkio'lchovli elektron gaz haqida tushuncha	89
3.3. Geterotuzilmali maydon va bipolyar tranzistorlar	90
3.3.1. Yuqori harakatlanuvchan elektronlarli tranzistor	90
3.3.2. Pseudomorfik va metamorfik tuzilmalar (p-NET va m-NET)	92
3.3.3. GaN tagliklardagi HEMT	95
3.3.4 Geteroo'tishli bipolyar tranzistorlar	96
3.3.5. Geteroo'tishli maydon tranzistorlardagi integral mikrosxemalar	97
4 BOB. NANOELEKTRONIKANING FIZIK-TEXNIK ASOSLARI.100	
4.1. Nanotexnologiyaning asosiy tushunchalari va rivojlanish yo'nalishlari	100
4.1.1. Nanotexnologiyalarning asosiy tushunchalari	100
4.1.2. Nanotexnologiyalarning rivojlanishi yo'nalishlari	103
4.2. Mikroelektronikaning rivojlanish yo'nalishlari va cheklovlari	108
4.2.1. Texnologik cheklovlar: Mur qonuni	108
4.2.2. Nanoelektronika qonunlari bo'yicha chegaralangan mikroelektron modellarning chegaralari	111
4.3. Kichik o'lchamli tuzilmalar va kichik o'lchamli ob'ektlardagi elektronlarning energetik spektri	113
4.3.1. Kichik o'lchamli tuzilmalar	113
4.3.2. Kichik o'lchamli ob'ektlardagi elektronlarning energetik spektri	115
4.4. Kichik o'lchamli tuzilmalarning kinetik xususiyatlari	120
4.4.1. Elektronlarni ballistik tashish	120
4.4.2. Tunnel samarasi	122
4.4.3. Issiqlik uzatish mexanizmlari	123
5 BOB. NANOELEKTRONIKA MATERIALLARI VA TUZILMALARI	127
5.1. Nanoelektronikada mikroelektronika yarimo'tkazgichli materiallari	127
5.1.1. Yarimo'tkazgichli oddiy materiallar	127
5.1.2. Yarimo'tkazgichli murakkab materiallar	129
5.2. Nanoelektronika materiallari	131
5.2.1. Grafen	131
5.2.2. Fullerenlar	137
5.2.3. Uglerodli nanoquvurlar	138
5.3. Nanoelektronikadagi nanotuzilmalar	141
5.3.1. Nanoelektronikadagi geterotuzilmalar	141

5.3.2. Yarimo‘tkazgichli va metalli nanotuzilmalar	144
6 BOB. NANOELEKTRONIKA ASBOBLARI VA QURILMALARI.....	148
6.1. Nanoelektron tranzistorlar	148
6.1.1. Kremniyli nanotranzistorlar.....	148
6.1.2. Geterotranzistorlar	150
6.2. Optoelektron nanoqurilmalar.....	155
6.2.1. Geterotuzilmalar va o‘ta panjaralardagi lazerlar	155
6.2.2. Geteroo‘tishli yo‘rug‘lik diodlari	157
6.3. Tunnel samaralaridagi qurilmalar.....	166
6.3.1. Rezonansli tunnellashtirish.....	166
6.3.2. Rezonansli tunnellashtirishdagi qurilmalar	167
7 BOB. BIRELEKTRONIKA VA MOLEKULAR NANOELEKTRONIKA ASBOBLARI VA QURILMALARI.....	170
7.1. Bir elektronika asboblari va qurilmalari.....	170
7.1.1. Bir elektronika g‘oyasi	170
7.1.2. Bir elektronli qurilmalar	172
7.1.3. Bir elektronika qurilmalari	174
7.2. Molekulyar nanoelektronika asboblari va qurilmalari	178
7.2.1. Molekulyar nanoelektronika.....	178
7.2.2. Molekulyar elektronika asboblari va qurilmalari	181
8 BOB. FUNKSIONAL NANOELEKTRONIKA	189
8.1. Funktsional nanoasboblari	189
8.1.1. Nanoxotira.....	189
8.1.2. Superkondensatorlar	191
8.1.3. Uch o‘lchovli nanoo‘lchamli yarimo‘tkazgichli asboblari	193
8.2. Nanoelektronikaning funktsional qurilmalari.....	195
8.2.1. Nanodispleylar	195
8.2.2. Kimyoviy sensorlar.....	197
8.2.3. Magnetoelektronika qurilmalari	197
GLOSARIY	200
ADABIYOTLAR RO‘YXATI	205

**Pak S.S., Gulyamova S.T.,
Maxmudov M.M., Rashidova A.A.**

MIKRO VA NANOELEKTRON ASBOBLAR VA QURILMALAR

Darslik

Muharrir: X. Tahirov
Texnik muharrir: S. Meliquziyeva
Musahhih: M. Yunusova
Sahifalovchi: A. Muhammad

Nashr. lits № 1940. 29.01.2022.
Bosishga ruxsat etildi 15.09.2022.
Bichimi 60x84 1/16. Ofset qog‘ozi. “Times New Roman”
garniturası. Hisob-nashr tabog‘i. 13,5.
Adadi 200 dona. Buyurtma № 3.

«HISTORY AND PAGE» MCHJ bosmaxonasida chop etildi.
Manzil: Toshkent vil., Chirchiq sh., Saodat ko‘chasi, 17/1.

