

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM
VAZIRLIGI

ALISHER NAVOIY NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI
FIZIKA FAKULTETI

QATTIQ JISMLAR FIZIKASI KAFEDRASI

5140900 - K-T ELEKTRONIKA VA MIKROELEKTRONIKA YO'NALISHI
BO'YICHA BAKALAVR AKADEMIK DARAJASINI Olish uchun

BITIRUV MALAKAVIY ISHI

**MAVZU: CHUQUR SATHLI ARALASHMALARNING KREMNIYNING
FOTOO'TKAZUVCHANLIGIGA TA'SIRINI O'RGANISH**

Himoyaga tavsiya etildi

Bajardi: 4 - kurs kunduzgi

bo'lim talabasi Otaboyeva Mohinur

Jonuzoqovna

Kafedra mudiri

_____dots. Axrorov S.Q.

Ilmiy rahbar:

“ _____ ” _____2013 y.

_____dots. X.R. Abdukarimova

S A M A R Q A N D - 2013

MUNDARIJA

	Bet
KIRISH	3
I BOB. CHUQUR SATHLI ARALASHMALARNING KREMNIYNING ELEKTROFIZIKAVIY VA FOTOELEKTR XOSSALARIGA TA’SIRI (Adabiyotsharhi).....	8
1.1. Yarim o’tkazgichlarda chuqur sathli aralashmalar.....	8
1.2. Yarim o’tkazgichlarda zaryad tashuvchilar rekombinatsiyasi va uni tavsiflovchi parametrlar.	12
1.3. Zaryad tashuvchilarning mahalliy markazlar orqali rekombinatsiyasi uchun Shokli- Rid modeli va uni ko’p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiya holi uchun tatbiq etish chegaralari.	19
1.4. Zaryad tashuvchilarning ko’pzaryadli markazlar orqali rekombinatsiyasi.	29
II BOB. RUX MARKAZLARI OPTIK QAYTA ZARYADLANISHINING KREMNIY FOTOOTKAZUVCHANLIGIGA TA’SIRI.	32
2.1. Hisoblashlar uchun boshlang’ich shartlar va kremniyda rux markazlarining rekombinatsiyaviy parametrlari	32
2.2. Kremniyda ruxning ko’pzaryadli markazlari orqali rekombinatsiya jarayonlarining nazariy tahlili	33
2.3. Rux bilan kompensirlangan kremniy materialining optoelektronikada qo’llanilishi.	37
2.4. Hisoblashlar natijalari va ular bo’yicha qilingan xulosalar. .	40
Foydalanilgan adabiyot ro’yxati.....	41
Ilova.....	42

KIRISH

Mavzuning dolzarbligi va masalaning qo'yilishi: Ta'lim sohasini tubdan isloh qilish, uni o'tmishdan qolgan mafkuraviy qarashlar va sarqitlardan to'la xalos etish, rivojlangan demokratik davlatlar darajasida, yuksak ma'naviy va axloqiy talablarga javob beruvchi malakali kadrlar tayyorlashning milliy tizimini yaratish Kadrlar tayorlash milliy dasturining asosiy maqsadi hisoblanadi. Bu maqsadga erishish uchun ta'lim jarayoniga yangicha nazar bilan qarash talab etiladi: "... Oliy ta'limni butun ta'lim tizimining katalizatori sifatida ko'rish va undan foydalanish ... oliy ta'lim butun ta'lim tizimining rivojiga yanada faol, shu jumladan, pedagogik ta'limni takomillashtirish yo'li bilan ulush qo'shishi ... o'z faoliyatiga tanqidiy yondashuvchi yuqori malakali va o'qimishli insonlar ommasini yaratuvchi adekvat oliy ta'limsiz va ilmiy tadqiqot muassasalarisiz birorta mamlakat real barqaror rivojlanishni taminlay olmaydi, rivojlanayotgan mamlakatlar esa, o'zlari va rivojlangan mamlakatlar o'rtasidagi farqni qisqartira olmaydilar. Bilimlardan hamkorlikda foydalanish, xalqaro hamkorlik va yangi texnologiyalar bu uzilishni kamaytirishga yangi imkonlar yaratadi... Oliy ta'lim o'quvchilarning shunday ta'limini ta'minlashi kerakki, ular tanqidiy fikrlash, ijtimoiy muammolarni tahlil qilish, jamiyat oldida turgan muamolar yechimini topish va ulardan foydalanish hamda o'z zimmasiga ijtimoiy ma'suliyatni olishga qodir bo'lishi, yangi pedagogik va didaktik yondashuvlarga, ularning rivojlanishiga yo'l ochishi kerak. Ular ko'nikmalarga ega bo'lishda ko'mak berishi, bilimdonlik va kommunikatsiya, ijodiy – tanqidiy tahlil, mustaqil fikrlash va ijod hamda an'anaviy yoki mahalliy ko'nikma va bilimlar zamonaviy fan va texnika birikuviga asoslangan ko'p madaniyatli kontekstda birgalikdagi mehnat bilan bog'liq qobiliyatlarni rivojlantirishi zarur" ["XXI asr uchun oliy ta'lim haqidagi jahon deklarasiyasi: yondashish va amaliy choralar" (UNESKO, Parij, 1998)].

Ta'lim tizimimizning yuqori pog'onasi hisoblangan oliy va o'rta maxsus ta'lim tizimida bu muammo o'zining dolzarbligi bilan muhim ahamiyat kasb etadi. Dunyoqarashi keng, uddaburon, yuqori malakali mutaxassis kadrlarni tayorlash

respublikamiz pedagoglari oldidagi eng muhim mas'uliyatli vazifadir.

Respublikamiz Prezidenti Islom Karimov ta'lim tushunchasiga milliy didaktik nuqtai nazardan yondashib quyidagicha ta'riflaydi: "Ta'lim O'zbekiston xalqi ma'naviyatiga yaratuvchilik faoliyatini baxsh etadi. O'sib kelayotgan avlodning barcha eng yaxshi imkoniyatlari unda namoyon bo'ladi, kasb-kori, mahorati uzluksiz takomillashadi, katta avlodlarning dono tajribasi anglab olinadi va yosh avlodga o'tadi" [1]. Ilmiy texnikaviy taraqqiyot ishlab chiqarishning ko'p sonli tarmoqlari (sanoat, qishloq xo'jaligi, tibbiyot va boshqa) bilan bir qatorda madaniyat sohasiga, ijtimoiy-gumanitar bilimlar doirasiga ham yangi texnologiyalarni joriy etishni taqozo etmoqda. Shu boisdan kadrlar tayyorlash milliy dasturida o'quv-tarbiyaviy jarayonni ilg'or pedagogik texnologiyalar bilan ta'minlash e'tirof etildi, uning ikkinchi va uchinchi bosqichlarida bajariladigan jiddiy vazifalardan biri sifatida belgilandi.

Hozirgi zamonda oliy va kasb-hunar ta'limi oldida turgan dolzarb muammolardan biri ta'lim turlari, usullari va vositalarini takomillashtirishdir. Bunday o'quv maskanlari uzluksiz ta'lim tizimining muhim tarkibiy qismi sifatida o'quvchilarning tanlagan yo'nalishlari bo'yicha ixtisosliklarini egallashlariga imkon beradi. Bu vazifani hal etishda ularga umumta'lim fanlari bilan bir qatorda maxsus fanlardan ham chuqur bilim berish talab etiladi. Buni amalga oshirish uchun zamonaviy pedagogik texnologiyaning muhim vositasi hisoblangan axborot texnologiyalaridan foydalanish ta'lim samaradorligini oshirish omili sifatida muhim rol o'ynaydi [1].

Shunday qilib, jamiyat va mamlakatning rivojlanishi o'zaro bog'langan yagona jarayonning asosiy elementi hisoblangan ta'lim tizimining yangilanishi va rivojlanishi davr talabidir. Ilmiy asoslangan yangi va yaxlit tizimning shakllanishi shubhasiz, ham milliy, ham umumbashariy qadriyatlarni anglab olgan erkin shaxsni kamol toptirishga xizmat qiladi.

Ta'lim tizimini, jumladan, uning prinsiplari, mazmuni, ta'lim-tarbiya jarayonining shakl va usullari kabilarni tubdan isloh qilishdagi asosiy muammolardan biri – ta'limni kompyuterlashtirish muammosidir.

Ta'limni kompyuterlashtirish «inson-mashina» tizimini jamiyat hayotining barcha sohalariga jadal olib kirish shakllaridan biri hisoblanadi. Bunday tizimlar nazariyasiga ko'ra, inson faoliyati yetakchi komponent hisoblanib, mashina uni samarali amalga oshirish vositasi sifatida namoyon bo'ladi. Inson faoliyatining ko'pgina ko'rinish va shakllari mavjud bo'lib, ularning genetik boshlang'ich asosini mehnat faoliyati tashkil etadi. Uning tarixiy rivojlanishi natijasida boshqa faoliyat turlari, masalan, o'yin, o'quv, ilmiy-izlanish va boshqa turlari kelib chiqqan. Talabalarning o'quv-ilmiy faoliyatini kompyuter yordamida tashkil qilish bu faoliyatning samarali natija berishiga imkon yaratadi. Shuningdek, o'quv jarayonini kompyuterlashtirish oliy ta'lim tizimini, qolaversa, jamiyatni axborotlashtirishning negizini tashkil etadi. Jamiyatni axborotlashtirishdagi eng muhim yo'nalishlardan biri ta'lim tizimini axborotlashtirishdir. Ta'limni axborotlashtirish jamiyatni axborotlashtirish jarayonini muvaffaqiyatli amalga oshirishining muhim shartidir. Bu jarayon o'ziga rivojlantiruvchi ta'limni amalga oshirish maqsadida yangi axborot texnologiyalarini qo'llashni, uning metod-vositalaridan foydalanishni, ta'lim-tarbiya jarayonining barcha bosqichlarini jadallashtirishni, uning sifat va samaradorligini oshirishni, umumiy qilib aytganda, yoshlarni axborotlashgan jamiyat sharoitida yashashga tayyor qilib tarbiyalash masalalarini qamrab oladi [3]. Uzluksiz ta'lim tizimining muhim yuqori bosqichi hisoblangan oliy ta'limni kompyuterlashtirish ayniqsa, muhim ahamiyat kasb etadi. Kasbiy ta'lim yo'nalishi bo'yicha talabalarni zamonaviy ta'lim texnologiyalari asosida o'qitish ularning ilmiy tadqiqot ishlari samaradorligini oshirish, fanlarning nazariy-uslubiy asoslarini puxta egallashlari, bir so'z bilan aytganda, ta'limiy-kasbiy darajalarini ko'tarishda asos bo'ladi.

Bitiruv malakaviy ishining maqsadi. Yuqoridagi mulohazalardan kelib chiqib, mazkur bitiruv malakaviy ishi ilmiy – tadqiqot olib borishda zamonaviy

axborot-kommunikatsiya texnologiyasi vositalaridan foydalanishga qaratilgan. Unda chuqur sathli aralashmalar bilan kompensirlangan kremniyning fotoelektr xossalarini o'rganish maqsadida amalga oshirilgan ruxning ko'pzaryadli markazlari orqali kechadigan rekombinatsiyaviy jarayonlarning nazariy tahlili keltirilgan. Bitiruv malakaviy ishida qo'yilgan tadqiqot mavzusining dolzarbligi va ilmiy-amaliy ahamiyati yana quyidagilar bilan belgilanadi.

Bitiruv malakaviy ishining amaliy ahamiyati. Yarim o'tkazgich materialning turli xossalarini tadqiq qilish asbobsozlik nuqtai nazaridan katta amaliy ahamiyatga ega. Xususan, chuqur sathli aralashmalar bilan kompensirlangan kremniydan turli fotoelektr asboblari yasashda keng foydalaniladi. Malakaviy bitiruv ishida maqsad qilib qo'yilgan masala – rux markazlari orqali rekombinatsiya jarayonlarining material fotoo'tkazuvchanligiga ta'sirini o'rganish ham zarur parametrlarga ega bo'lgan yarim o'tkazgich material olish nuqtai nazaridan muhim amaliy ahamiyatga ega. Yana ahamiyatli tomoni shundaki, malakaviy bitiruv ishi talabalarning tanqidiy tafakkurini rivojlantirish, ularda mustaqil ravishda ilmiy tadqiqot olib borish, axborot kommunikatsiya vositalaridan foydalanish ko'nikmalarini shakllantirishga qaratilgan.

Bitiruv malakaviy ishida qo'yilgan maqsadga erishish uchun **amalga oshirilgan vazifalar** quyidagilardan iborat:

- Yarim o'tkazgichlarda chuqur sathli aralashmalarining o'ziga xos xususiyatlari va ularning namoyon bo'lishi bilan bog'liq bo'lgan hodisalarni o'rganishga oid adabiyot sharhini tayyorlash;
- Zaryad tashuvchilarning mahalliy markazlar orqali rekombinatsiyasi uchun Shokli-Rid modelini ko'p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiya hali uchun tatbiq etish chegaralarini aniqlash;
- Zaryad tashuvchilarning ko'pzaryadli markazlar orqali rekombinatsiyasini nazariy tahlil qilish usulini o'rganib chiqish;

- Adabiyot sharhida keltirilgan ma'lumotlar asosida hisoblashlar uchun zarur bo'lgan boshlang'ich shartlar va kremniyda rux markazlarining rekombinatsiyaviy parametrlarini tanlash;

- Kremniyda ruxning ko'pzaryadli markazlari orqali rekombinatsiyaviy jarayonlarni nazariy tahlil qilish;

- Olingan natijalar asosida rux bilan kompensirlangan kremniy materialidan turli optoelektron asboblari yasashda foydalanish bo'yicha uslubiy tavsiyalar ishlab chiqish.

Malakaviy bitiruv ishning tuzilishi va hajmi. Bitiruv malakaviy ishi kirish qismi, ikki bob, 7 ta paragraph, xulosalar, foydalanilgan adabiyot ro'yxati va ilovadan iborat.

Kirish qismida mavzuning dolzarbligi, masalaning qo'yilishi, bitiruv malakaviy ishining maqsadi, va ishning tuzilishi yoritilgan. Bitiruv malakaviy ishning birinchi bobida chuqur sathli aralashmalarning kremniyning elektrofizikaviy va fotoelektr xossalari ta'sirini o'rganish bo'yicha adabiyot sharhi keltirilgan bo'lib, unda kremniyda chuqur sathli aralashmalarning o'ziga xos xususiyatlari va ularning namoyon bo'lishi bilan bog'liq bo'lgan hodisalar yoritib berilgan.

Bitiruv malakaviy ishning ikkinchi bobida rux markazlari optik qayta zaryadlanishining kremniy fotoo'tkazuvchanligiga ta'sirini o'rganish maqsadida amalga oshirilgan nazariy tahlil hamda uning natijalari asosida rux bilan kompensirlangan kremniy materialidan turli optoelektron asboblari yasashda foydalanish bo'yicha ishlab chiqilgan amaliy tavsiyalar bayon etilgan.

I BOB. CHUQUR SATHLI ARALASHMALARNING KREMNIYNING ELEKTROFIZIKAVIY VA FOTOELEKTR XOSSALARIGA TA'SIRI (Adabiyot sharhi)

1.1 YARIM O'TKAZGICHLARDA CHUQUR SATHLI ARALASHMALAR

Zarur parametrlarga ega bo'lgan yarimo'tkazgich material olish yarimo'tkazgichlar asbobsozligida eng dolzarb masalalardan hisoblanadi. Yarim o'tkazgichning taqiqlangan zonasida chuqur energyaviy sathlarning mavjudligi bunday material asosida yasalgan asboblarda turli foydali hodisalarning kuzatilishiga olib keladi. Xususan, qayta ulanish vaqti nanosekundlarga teng bo'lgan kremniyli o'tishlarda jadal rekombinatsiya markazlari sifatida oltindan foydalaniladi. Taqiqlangan zonasi keng bo'lgan fotoo'tkazgichlarda chuqur sathli markazga bir turdagi zaryad tashuvchining tutilishi natijasida yuqori fotoelektr kuchaytirishga erishiladi. Chuqur sathli markazlarning namoyon bo'lishi bilan bog'liq bo'lgan amaliy jihatdan muhim jarayonlardan yana biri aralashmali fotoo'tkazuvchanlik hisoblanadi. Chuqur sathli aralashmalar kiritilgan yarim o'tkazgichlardan 10 – 100 mkm oraliqdagi to'lqin uzunliklariga sezgir detektorlar, issiqlikka sezgir elementlar, yorug'lik diodlari yasashda keng foydalaniladi. Nisbatan past haroratlarda ruxsat etilgan zonadan 0.1 eV dan kam bo'lgan energiyaviy holatda joylashgan energiyaviy sathlarni hosil qiluvchi aralashmalar chuqur sathli markazlar hisoblanadi. Odatda yuqorida qayd etilgan hodisalarni amalda qo'llash uchun kremniy va germaniyga oltin, rux, kadmiy, simob va boshqa elementlar kiritiladi. Chuqur sathli aralashmalar kiritilgan yarim o'tkazgichlarda boshqa bir qator qiziqarli hodisalar ham kuzatiladiki, ular hozircha o'z amaliy tadbiqini topmagan. Bular – mexanik bosimga sezgirlik, manfiy differensial qarshilikning paydo bo'lishi, turli noturg'unliklarning kuzatilishi va hokazolar. Ayrim hollarda yarim o'tkazgichdagi chuqur sathli aralashmalar zararli effektlarni ham keltirib chiqarishi mumkin.

Kremniyning elektrfizikaviy va fotoelektr parametrlariga chuqur sathli aralashmalarning ta'sirini o'rganish bo'yicha ilmiy izlanishlar shuni ko'rsatadiki,

rekombinatsiya markazlarining konsentratsiyasi va ularga elektron va kovaklarning tutilish kesimi bilan aniqlanadi.

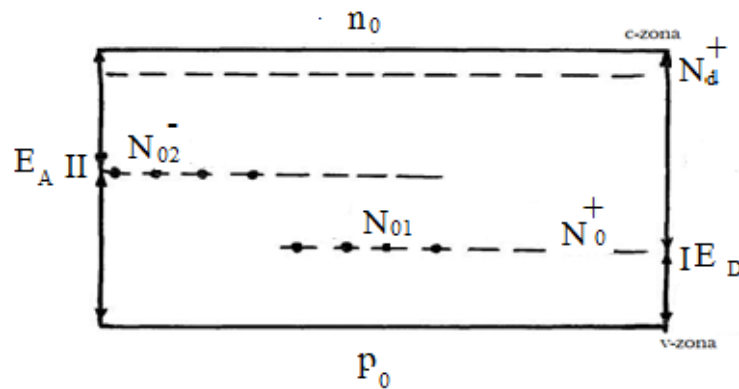
Amalda turli mexanikaviy, kimyoviy, issiqlik, radiasiyaviy va boshqa turdagi ta'sir hamda kirishma kiritilishi natijasida yarim o'tkazgichning ta'qiqlangan zonasida bir necha turdagi sodda va ko'p zaryadli (ikki va undan ortiq zaryad holatida mavjud bo'la oladigan markazlar) markazlar mavjud bo'lishi mumkin.

Ko'p zaryadli markazlarning energiyaviy spektri murakkab bo'lib, ta'qiqlangan zonadagi bir necha sathdan iborat bo'ladi. Masalan, oltin germaniyda besh zaryad holatida: neytral, bir karra manfiy, ikki karra manfiy, uch karra manfiy, bir karra musbat holatlarda mavjud bo'la oladi va quyidagi to'rtta sathni hosil qiladi: $E_v+0.05eV$; $E_v+0.15eV$; $E_c-0.15eV$; $E_c-0.14eV$.

Nikel germaniyda ikkita akseptor sathni hosil qiladi: $E_v+0.22eV$; $E_c-0.3eV$; va uch zaryad holatida: neytral, bir karra manfiy, ikki karra manfiy zaryadli hollarda mavjud bo'la oladi. Ko'p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiya holida turli zaryad holatidagi markazlar o'zaro ta'sirda bo'lib, u yoki bu sathning rekombinatsiya jarayonidagi faolligini aniqlash lozim bo'ladi. Bunday hol uchun Shokli-Rid modelini faqat bir necha xususiy hollarda qo'llash mumkin. Xususan yorug'likning past darajalari hamda rekombinatsiya markazlari konsentratsiyasi kam bo'lgan hollarda ko'p zaryadli markazga tegishli bo'lgan alohida energiyaviy sathning rekombinatsiya jarayonlardagi ishtiroki ustuvor bo'lish mumkin. Ko'p zaryadli markazlar orqali zaryad tashuvchilar generatsiyasi va rekombinatsiyasi kinetikasini o'rganish shuni ko'rsatadiki, yoritilganlik darajasi va harorat o'zgarishi bilan ko'p zaryadli markazlarning optik va termik qayta zaryadlanishi sathlarning rekombinatsiyaviy faolligiga ta'sir ko'rsatadi. Binobarin yarim o'tkazgichning fotoelektr xossalari o'zgaradi.

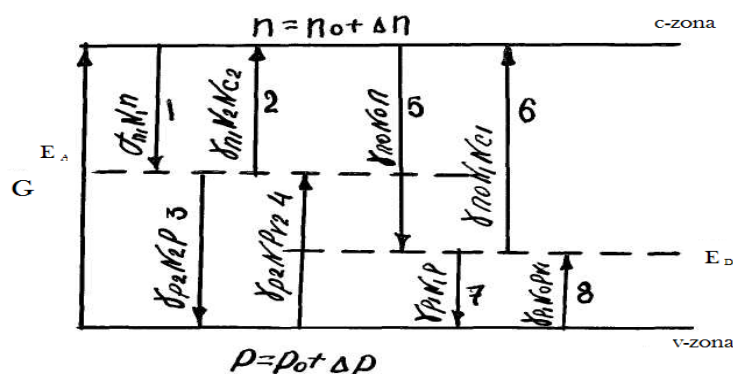
Oltin bilan legirlangan kremniy fotoo'tkazuvchanligiga sathlar optik qayta zaryadlanishining ta'sirini o'rganish [9] shuni ko'rsatadiki, oltin sathlari bir-biridan bir necha KT uzoqlikda joylashganligiga qaramasdan faqat yorug'lik va

haroratning past darajasidagina ularni alohida hisobga olish mumkin. Past haroratda oltin markazlariga tutilgan zaryad tashuvchilarning o'tkazuvchanlik yoki valent zonaga qayta o'tkazuvchanlik jarayoni juda kuchsiz bo'lib zaryad tashuvchilarning yashash vaqtiga sezilarli ta'sir ko'rsata olmaydi.



2-rasm. *n* turdagi kremniyda oltin markazlarining zaryad holatlari va energiyaviy sathlari.

Yorug'likning past darajalarida esa oltin sathlarining elektron bilan to'lishi muvozanat holatiga mos kelib, turli zaryad holatidagi oltin markazlari konsentratsiyasini o'zgarmas deb qabul qilish mumkin. Harorat 200 K ga yaqinlashishi yoki yoritilganlik darajasi $10^{12} \text{ sm}^{-3}\text{sek}^{-1}$ ga yetishi bilan zaryad tashuvchilarning oltin sathlaridan o'tkazuvchanlik va valent zonaga issiqlik ta'sirida o'tishi va oltin markazlarining optik qayta zaryadlanishi materialning fotoo'tkazuvchanligiga katta ta'sir ko'rsatadi.



3-rasm. Oltin bilan legirlangan n-turdagi kremniyda elektron o'tishlar.

Ushbu malakaviy bitiruv ishida yuqorida keltirilgan maqolada [9] bayon etilgan ko'p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiya jarayonining nazariy tahlil qilish usulidan foydalanib kremniyning fotoo'tkazuvchanligiga ruxning ko'p zaryadli markazlari orqali rekombinatsiya jarayonlarining ta'sirini o'rganish maqsad qilib qo'yildi.

1.2 YARIM O'TKAZGICHLARDA ZARYAD TASHUVCHILAR REKOMBINATSIYASI VA UNI TAVSIFLOVLOVCHI PARAMETRLAR

Biror bir ta'sir yordamida muvozanat holatidagi yarim o'tkazgichda hosil qilingan qarama-qarshi ishorali tok tashuvchilarning o'zaro bir - birini yo'qotish jarayoniga *rekombinatsiya jarayoni* deyiladi. Rekombinatsiya jarayonini miqdor jihatdan xarakterlash uchun rekombinatsiya tezligi degan tushuncha kiritiladi. *Rekombinatsiya tezligi* deb, birlik vaqtda birlik hajmda yo'qotilayotgan tok tashuvchilar soniga aytiladi. Rekombinatsiya mexanizmlari ikki turli belgi bo'yicha, rekombinatsiya aktiga olib keluvchi elektron o'tishlarning turlari hamda rekombinatsiya jarayonida energiya qanday tarzda ajralishiga qarab guruhlanadi. Elektron o'tishlarining turiga ko'ra rekombinatsiya mexanizmlari uch xil bo'ladi:

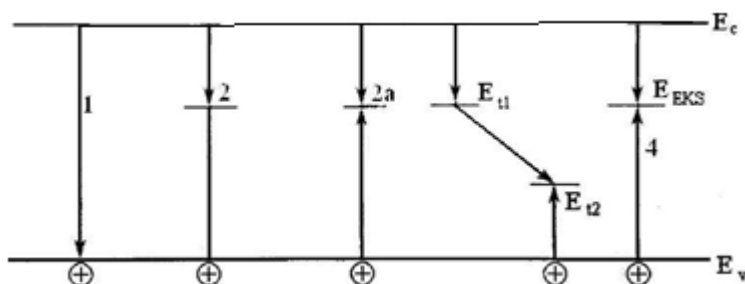
1. Zonalararo rekombinatsiya.
2. Mahalliy (lokal) markazlar orqali rekombinatsiya.
3. Sirtiyl rekombinatsiya [1].

Zonalararo rekombinatsiya jarayonida elektron o'tkazuvchanlik zonasidan bevosita valent zonaga o'tadi. Bunda u ta'qiqlangan zona kengligiga teng bo'lgan

energiyani qandaydir tarzda uzatadi (4-rasm, 1-o'tish). Mahalliy markazlar orqali rekombinatsiyada elektron kovak bilan birlashilishidan oldin ta'qiqlangan zonadagi mahalliy markaz tomonidan tutib olinadi. Keyin u valent zonaga o'tib, kovak bilan rekombinatsiyalashadi (4-rasmdagi 2-o'tish).

Rekombinatsiya jarayonida ishtirok etadigan mahalliy markazlar *rekombinatsiya markazlari* deb ataladi. Yarim o'tkazgichning ta'qiqlangan zonasidagi aralashmalar, kristall panjaraning nuqtaviy nuqsonlari, dislokatsiyalar va boshqalar ana shunday rekombinatsiya markazlari bo'la oladi. 4-rasmdagi 2 va 2a o'tishlar elektron (yoki kovak) erkin bo'lib, kovak (yoki elektron) mahalliy rekombinatsiya markazida yuz beradigan elektron-kovak rekombinatsiyasini tasvirlaydi. 3-o'tish bog'langan holatda kirishmalararo rekombinatsiya deb ataladi. U donor va akseptor turdagi kirishmalar mavjud bo'lganda amalga oshadi. 4-o'tish eksiton rekombinatsiyasi deb ataladi, O'tkazuvchanlik zonasidagi elektron kovak bilan bog'lanib, natijada *eksiton* hosil bo'ladi. (bunda E_{eks} energiya ajraladi). Rekombinatsiya markazlari ishtirokida sodir bo'ladigan barcha rekombinatsiya jarayonlari bilan bir vaqtda o'sha markazlar tutib olgan zaryad tashuvchilarning (issiqlik ta'siri tufayli) yana tegishli ruxsat etilgan zonaga o'tish jarayoni (termik generatsiyalash) ham yuz berib turadi. O'tkazuvchanlik zonasiga chiqarilgan elektronlar yoki valent zonadagi kovaklar yashash vaqti deb ataluvchi vaqt davomida mavjud bo'lib, keyin rekombinatsiya tufayli bo'linib ketishadi. Ta'qiqlangan zonada rekombinatsiya markazini o'tovchi bir yoki bir necha sathlar mavjud bo'lganda ularning holatiga qarab, bu sathlarga o'tgan elektronlar valent zonadagi teshiklar bilan birikib rekombinatsiyalanishi issiqlik harakati tufayli olgan energiya hisobida yana o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishlari mumkin. Mana shu o'tkazuvchanlik zonasiga qaytish ehtimolligi rekombinatsiyalanish ehtimolligidan juda katta bo'lgan sathlar *yopishish sathiari* deb ataladi. Yopishish sathlariga o'tgan elektronlar (kovaklar) ma'lum vaqt zaryad tashishda ishtirok etmaydi, keyin yana avvalgi sohalarga qaytib, zaryad tashuvchilar sonini

ko'paytiradi. Shunday qilib, bu sathlar o'tkazuvchanlikka sezilarli darajada o'zgarish kiritadi va bu o'zgarish o'tkazuvchanlikka maxsus xususiyatlar beradi.



4 -rasm. Zaryad tashuvchilar rekombinatsiyasining turli mexanizmlari

Yopishish markazlarida zaryad tashuvchilarni termik generatsiyalash ehtimolligi uning rekombinatsiyalanish ehtimolligidan katta bo'ladi. Sayoz energiya sathlariga ega bo'lgan mahalliy markazlar ko'pincha yopishish markazlari vazifasini bajaradi. Chunki ular yuqoridagi shartni qanoatlantiradi. Ammo kichik rekombinatsiya kesimiga ega bo'lgan chuqur sathli markazlar ham yopishish markazlari bo'la oladi. Markaz tutib olgan zaryad tashuvchilarning issiqlik harakati tufayli ruxsat etilgan zonaga o'tish ehtimolligi rekombinatsiyalanish ehtimoliigiga teng bo'lganda E_{dn} va E_{dp} sathlar elektron va kovaklar uchun *demarkatsion sathlar* deyiladi. E_{dn} dan yuqorida va E_{dp} dan pastda joylashgan barcha sathlar mos ravishda elektronlar va kovaklar uchun yopishish sathiari vasifasini, E_{dn} va E_{dp} orasidagi sathlar ko'pincha rekombinatsiya sathiari vasifasini bajaradi. Bu bo'linish nisbiydir, chunki chuqur sathlar mavjud bo'lmaganda rekombinatsiya sayoz sathlar orqali boradi. Ammo uning tezligi kichik, zaryad tashuvchilarning yashash vaqti katta bo'ladi. Rekombinatsiya sathiari bilan bir qatorda yopishish sathlarining mabjud bo'lishi zaryad tashuvchilarning o'rtacha yashash vaqtini oshiradi [1].

Rekombinatsiya jarayonida energiya qanday tarzda ajralishiga qarab rekombinatsiya mexanizmlari ikki asosiy turga bo'linadi:

- a) Nurlanishli rekombinatsiya;
- b) Nurlanishsiz rekombinatsiya.

Birinchi holda rekombinatsiyada ajraladigan energiya yorug'lik kvantlari (fotonlar) ko'rinishida ajraladi. Ikkinchi holda rekombinatsiyalashgan zaryad tashuvchilarning energiyasi panjaraga yoki biror bir uchinchi zarraga uzatilishi mumkin. Shunga muvofiq nurlanishsiz rekombinatsiya

- a) fononlar ishtirokidagi rekombinatsiya;
- b) zarbdan rekombinatsiyalanish deb nomlanadigan turlarga bo'linadi.

Van-Rusberg va Shokli zonalararo nurlanishli rekombinatsiya uchun asosiy parameter hisoblangan rekombinatsiya tezligi r va rekombinatsiya koeffisienti γ_n ni hisoblab topish usulini taqdim qilganlar. Yarim o'tkazchilarda termodinamik muvozanat sharoitida n_0 konsentratsiyali elektronlar, p_0 konsentratsiyali kovaklar va muvozanatdagi nurlanish mavjud bo'lsin. Bu holda generatsiya va rekombinatsiya jarayonlari o'zaro muayyan munosabatda bo'ladi. Agar fotonlarning turli chastotalari uchun bu jarayonlarning tengligini inobatga olsak, bu holda du oraliqdagi chastotali nurlanish uchun quyidagi tenglikni yozish mumkin:

$$r(\nu)d\nu = g(\nu)d\nu \quad (1)$$

Bunda $r(\nu)$ va $g(\nu)$ lar mos ravishda rekombinatsiya va generatsiya tezliklaridir. $h\nu$ energiyali fotonning birlik vaqtda yutulishi ehtimolligini $P(\nu)$, muvozanatli nurlanish spektridagi ν chastotali fotonlar spektral zichligini $\rho_0(\nu)$ va ichki fotoeffektning kvant chiqishini $\beta(\nu)$ deb belgilasak, u holda generatsiya tezligi uchun ifoda quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$g(\nu) = P(\nu) \rho_0(\nu) \beta(\nu) \quad (2)$$

$\rho_0(\nu)$ - Plank formulasi bilan ifodalanadi:

$$\rho_0(\nu) = \frac{8\pi\nu^2 n}{c^3} [\exp(h\nu) / R_0 T^{-1}] \quad (3)$$

Bu yerda c -vakuumda yorug'likning tezligi, n -muhitning sindirish ko'rsatkichi. Fotonning yutilish ehtimolligi $P(\nu)$ ni fotonning o'rtacha yashash vaqti $\tau(\nu)$ orqali ifodalasa bo'ladi:

$$P(\nu) = 1 / \tau(\nu) \quad (4)$$

$V_f = c/n$ tezlik bilan harakatlanayotgan fotonning o'rtacha yashash vaqtini uning

erkin yugurish yo'li uzunligi $l_f = 1/\alpha(\nu)$ orqali ifodalasa bo'ladi. Bunda $\alpha(\nu)$ -yutulish koeffitsienti.

$$r(\nu) = \frac{l_f}{v_f} = \frac{1}{\alpha(\nu)v_f} = \frac{\bar{n}}{c\alpha(\nu)} \quad (5)$$

Binobarin,

$$P(\nu) = \alpha(\nu) \frac{c}{\bar{n}} \quad (6)$$

Yorug'lik yutilishini fotonlar konsentratsiyasining o'zgarishi sifatida ko'rsatish mumkin.

$$\frac{dp(h\nu)}{dx} = -\alpha(\nu)\rho(h\nu) \quad (7)$$

X kordinata o'qi o'rniga fononlar paketining tarqalish vaqti t ni kiritish mumkin:

$$X = V_r \cdot t = (c/n) t \quad (8)$$

Demak :

$$\frac{dp(h\nu)}{dt} = -\frac{\alpha(\nu) \cdot c \cdot \rho(\nu)}{\bar{n}} \quad (9)$$

$P(\nu)$ ehtimolliqi tarifiga muvofiq

$$\frac{\alpha \cdot \rho(\nu)}{dt} = -P(\nu) \cdot \rho(\nu) \quad (10)$$

(9) va (10) ifodalarni taqqoslab (6) formulani topamiz. (3), (2) va (6) formulalardan foydalanib (1) ifodani quyidagicha yozish mumkin.

$$r(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 n^2 \alpha(\nu) \beta(\nu)}{C^2 \left[\exp\left(\frac{h\nu}{R_0 T}\right)^{-1} \right]} d\nu \quad (11)$$

Birlik hajmda birlik vaqtda yuz beradigan rekombinatsiyalanuvchi elektronlar va kovaklar sonini rekombinatsiya tezligi (11) ni integrallash yo'li bilan aniqlaymiz:

$$0 = \int_0^{\infty} r(\nu) d\nu = \frac{8\pi m^2 (R_0 T)^2}{Ch^3} \int_0^{\infty} \frac{\alpha(\nu) U^2}{e^4 - 1} du \quad (12)$$

Bu Van Rusberg-Shokli munosabati deb ataladigan asosiy ifoda kristalning nurlanish va yutulish spektrlari orasidagi bog'lanishni ifodalaydi. U $\alpha(\nu)$ $\beta(\nu)$, larning tajribada topilgan spektral bog'lanishlari va n ning qiymatlaridan foydalanib, r rekombinatsiya tezligi va binobarin, $\gamma = r_0/n_i^2$ formuladan nurlanishli rekombinatsiya koeffisientlarini topish imkoniyatini beradi. Yarim o'tkazgich termodinamik muvozanatda bo'lganda rekombinatsion nurlanish kuzatilmaydi, chunki bu holatda rekombinatsiyalashgan jarayonda fotonlarni nurlantirishi bilan bir qatorda, xuddi ana shunday tezlikda fotonlar yutilishi ham yuz berib turadi. Shuning uchun fotonlarning energiyalar bo'yicha taqsimoti muvozanatli bo'ladi. Ammo agar yarim o'tkazgichda qandaydir usul bilan ortiqcha zaryad tashuvchilar paydo qilinsa, u holda rekombinatsiya tezligi muvozanatli generatsiya tempidan $r_n = \gamma(np - n_0 p_0)$ miqdorga qadar ortiqroq bo'ladi va birlik vaqtda birlik hajmda shuncha foton nurlantiriladi. Endi elektron va kovak juftlarining nurlanishli rekombinatsiya vaqtidagi yashash vaqtini hisoblaymiz. Ma'lumki γ_r rekombinatsiya koeffisienti rekombinatsiyaning effektiv kesim yuzasi S_{eff} yordamida quyidagicha aniqlanadi:

$$\gamma_r = S_{\text{eff}} V \quad (13)$$

Bunda V -elektronlarning o'rtacha issiqlik tezligi. Ta'rifga ko'ra, nomuvozanat holatdagi juftlarning yashash vaqti:

$$\tau = \frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{\Delta n}{\gamma(np - n_0 p_0)} = \frac{1}{\gamma_r(n_0 + p_0 + \Delta n)} \quad (14)$$

Muvozanatdagi n_0 va p_0 konsentratsiyalar o'zaro $n_0 p_0 = n_i$ munosabat bilan bog'langanligini e'tiborga olib (14) ifodadan n_0 (yoki p_0) bo'yicha olingan hosilani

nolga tenglab τ xususiy yarim o'tkazgichda maksimal bo'lishni aniqlaymiz .
Uyg'onish darajasi kichik bo'lgan bu maksimallik:

$$\tau_{\max} = \tau_i = \frac{1}{2\gamma_r - n_i} \quad (15)$$

Germaniy uchun $T=300K$, $\beta(\vartheta)=1$ bo'lganda bajarilgan hisoblashlarning ko'rsatishicha $r_0 = 2,8 \cdot 10^{19} \text{sm}^{-3} \text{c}^{-1}$ bundan:

$$\gamma_r = \frac{r_0}{n_i^2} = \frac{2,8 \cdot 10^{19}}{5,6 \cdot 10^{26}} = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{sm}^3 / \text{s}$$

elektronlarning $T=300K$ da o'rtacha issiqlik harakati tezligi taxminan 10^7sm/s chamasida. $S_{\text{eff}} = \gamma_r / V = 10^{-21} \text{sm}^2$. Xususiy yarim o'tkazgich Ge uchun (15) formula bo'yicha hisoblashda maksimal yashash vaqti $\tau_i = 1 / 2\gamma_r n_i = 0,43 \text{s}$;

Bir qator xususiy yarim o'tkazgichlar uchun xona haroratidagi doimiy kattaliklar (konstantalar) qiymatlari quyidagi 1-jadvalda keltirilgan. Jadvaldan ko'rinadiki CaAs, CaSh, InP, InAs, va InSb birikmalar uchun γ_r rekombinatsiya koeffisienti, ayrim boshqa yarim o'tkazgichlarga qaraganda bir necha marotaba katta bo'ladi. Hisoblashlarning ko'rsatishicha, kremniydan boshqa barcha yarim o'tkazgichlarda temperatura pasayganda ortadi. Agar (12) formulaga $\alpha(\vartheta)$ ning nazariy ifodasi qo'yilsa, u holda rekombinatsiya tezligi va rekombinatsiya koeffisientini nazariy yo'l bilan hisoblash mumkin. Nurlanishli rekombinatsiya ta'qiqlangan zona o'rtasi yaqinida joylashgan rekombinatsiya markazlari orqali ham sodir bo'ladi. Bunday rekombinatsiyaning boshqa mexanizmlari kam samarali bo'lib, qolganlari, past temperaturalarda ayniqsa muhim bo'ladi.

1-jadval. Xususiy yarim o'tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning zonalararo rekombinatsiyasini belgilaydigan parametrlar

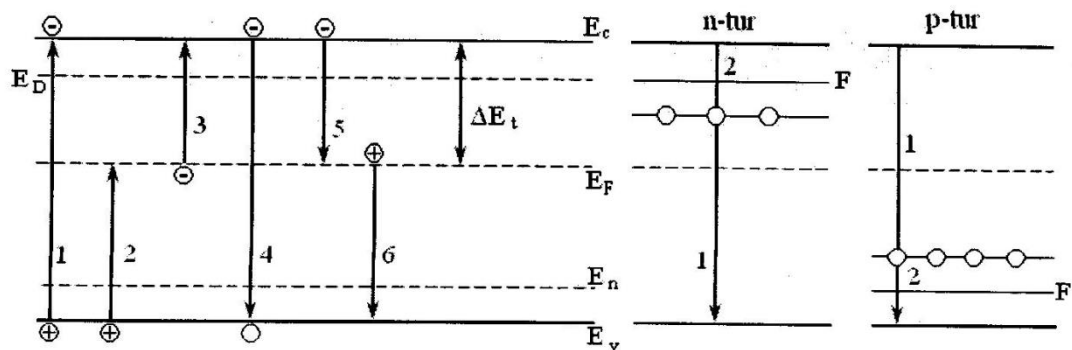
Y/o'tkazgich	T.K	$R, \text{Sm}^{-3} \text{s}^{-1}$	N_i, sm^{-3}	$\gamma_r, \text{sm}^{-3} \text{s}^{-1}$	τ, s	S, sm^3
Olmos	295	$4 \cdot 10^{-66}$ *	$6,68(-28)$ *	$8,96(-12)$ *	$8,35(37)$ *	$9,48(-19)$ *
Si	290	9,2(4)	7,16(9)	1,88(-15)	1,48(3)	1,87(-22)
Ge	300	2,85(13)	2,33(13)	5,25(214)	4,09(-1)	5,5(-21)
Te	300	3,0(20)	5,93(15)	8,53(-12)	9,88(-6)	8,95(-10)
CaP	300	4,1(-13)	2,73(10)	5,37(-14)	3,41 (-12)	5,63(-21)
CaAs	294	1,2(3)	1,29(6)	7,21(-10)	5,37(2)	7,64(-17)
CaSd	300	2,2(14)	9,6(11)	2,39(-10)	2,58(-3)	2,51 (-17)
InP	298	6,0(6)	6,9(4)	1,26(-9)	5,75(1)	1,33(-16)
InAs	298	5,8(19)	8,26(14)	8,1(-11)	7,12(-6)	8,94(-18)
InSb	295	1,03(22)	1,5(16)	4,58(-11)	7,28(-7)	4,48(-18)

*mazkur qiymatlarni 10 ning qavslarda ko'rsatilgan darajasiga ko'paytirish kerak masalan: $4,0(-66)$ belgi $4,0 \cdot 10^{-66}$ demakdir.

1.3. ZARYAD TASHUVCHILARNING MAHALLIY MARKAZLAR ORQALI REKOMBINATSIVASI UCHUN SHOKLI-RID MODELI VA UNI KO'P ZARYADLI MARKAZLAR ORQALI REKOMBINATSIYA HOLI UCHUN TATBIQ ETISH CHEGARALARI

Zonalararo rekombinatsiya mavjud bo'lganda elektron va kovak juftlari uchun hisoblab chiqilgan yashash vaqti ayrim yarim o'tkazgichlarda ancha katta (masalan Si da $\tau \sim 3\text{sek}$) bo'ladi, Ammo tajriba natijalari esa, yashash vaqtining bir necha millisekunddan oshmasligini va uning kirishmalarining ozgina miqdoriga ham o'ta sezgir ekanligini ko'rsatdi. Masalan: kremniy va germaniyga oltin va nikel kabi chuqur sathli kirishmalar 10^{15}sm^{-3} konsentratsiyada kiritilsa, yashash vaqti 6 tartibga (ya'ni 10^{-3} dan – 10^{-8} - 10^{-9} sek) gacha kamayishi ma'lum [7]. Ko'pgina keng zonali yarim o'tkazgichlarda (CdS, CdSe, CdTe, va h.k) o'tkazilgan tajribalar

ham zonalararo va zarbdan rekombinatsiyalanish mexanizmlari kuzatilgan rekombinatsiya tezligidan katta bo'lishni tushuntira olmasligini isbotladi. To'plangan ma'lumotlarga ko'ra ko'pgina yarim o'tkazgichlarda mahalliy markazlar orqali yuz beradigan rekombinatsiya amalda eng ko'p mavjud bo'ladigan mexanizmlardan biri bo'ladi. Bunda rekombinatsiya ikki bosqichdan iborat bo'lib, E_a zonadagi elektron markaz sathiga o'tadi. U yerdan valent zonaga o'tib, kovak bilan birlashadi. Ikkinchi bosqichda kovak valent zonadan markaz sathiga o'tib elektron bilan rekombinatsiyalashadi, deb qaralsa ham bo'ladi. Ko'pgina yarim o'tkazgichlarda bir necha turdagi mahalliy markazlar (tutgichlar) mavjud bo'lib, ular elektron va kovaklarni tutib olishning turli shakllariga va ionlanish energiyalariga egadir. Faraz qilaylik, yarim o'tkazgichlarda rekombinatsiyada bevosita ishtirok etmaydigan sayoz donor va akseptorlar bilan birga bir turdagi sodda rekombinatsiya markazlari mavjud bo'lib, ular neytral yoki bir karra zaryadli holatlarda bo'la oladi. Ularning konsentratsiyasi N_2 hamda taqiqlangan zonadagi yagona energiyaviy sathi E_2 bo'lsin ($E_c - E_2 = \Delta E_n$). Bu modelni birinchi bo'lib Xoll, Shokli, Rid tekshirganlar[6].



5-rasm. Shokli-Rid modelini tushuntirish uchun ekektron o'tishlar sxemasi.

5-rasmda tasvirlangan 1, 6, 3 strelkalar bilan ko'rsatilgan o'tishlar yorug'lik yoki issiqlik ta'sirida zaryad tashuvchilarning generatsiyalashuvini tasvirlaydi. 4, 5,2 strelkalar esa, zaryad tashuvchilar rekombinatsiyasiga tegishli o'tishlarni ko'rsatadi. $h\nu \geq E_g$ energiyali yorug'lik elektronni valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasiga

o'tkazadi. (1-o'tish) Elektronni bu zonadan tutgich ushlab olishi mumkin, (5-o'tish) tutilgan elektron issiqlik harakati tufayli yana o'tkazuvchanlik zonasiga o'tadi. (3-o'tish) yoki valent zonadagi kovak bilan qo'shiladi, ya'ni rekombinatsiyalashadi. (2-o'tish). Optik generatsiya tezligi (1-o'tish) quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$q = \alpha \cdot \beta \cdot I_v \cdot (1 - R_v) \quad (16)$$

Faraz qilaylik, n - elektronlar egallagan markazlar konsentratsiyasi, γ_n -neytral tutgichning elektronlarni tutib olish koeffisienti, γ_p -elektroni bor tutgichning kovakni tutib olish koeffisienti, S_n , S_p - rekombinatsiya markazi (tutgich) ning elektron va kovakni tutib olish kesimlari, V -issiqlik harakati tezligi bo'lsin. U holda tutgichlarning elektron va kovaklarni zonalaridan ushlab olish (5va 2-o'tish) tezligi (tempi, intensivligi):

$$r_s = \gamma_n (N_r - n_r) \cdot n, \quad r_2 = \gamma_p \cdot p \cdot n_r \quad (17)$$

Elektronlarning o'tkazuvchanlik zonasida va kovakning valent zonasida (N_r markazlarning ushlashiga nisbatan) o'rtacha yashash vaqtlari:

$$\tau_n = \frac{1}{\gamma_n (N_r - n_r)}, \quad \tau_p = \frac{1}{\gamma_p \cdot n_r} \quad (18)$$

Elektron va kovaklarning tutgich markazi tomonidan tutilish koeffisientlari γ_n va γ_p tutib olish kesimlari orqali ifodalanadi:

$$\gamma_n = S_n \cdot \bar{V} \quad (19)$$

Germaniy va kremniydagi kirishma atomlarining zaryad tashuvchilarni tutib olish kesimlarini xarakterlovchi kattaliklar 2 va 3 jadvallarda keltirilgan. (barcha ma'lumotlar 10^{-16} sm^2 birliklarda keltirilgan).

2-Jadval. Germaniyga kiritilgan kirishmalarning energiyaviy sathlariga zaryad tashuvchilarni tutib olish kesimlari

Kirishmalar	Zaryad tashuvchini tutib olish kesimi			
Au	$S_n^0 = 1$	$S_n^- = 2$	$S_p^{--} = 100$	$S^{---} = 1$
Cu	$S_n^- = 0.5$	$S_n^{--} = 0.36$	$S_p^{--} = 0.04$	
Zn	$S_n^- = 3 \cdot 10^{-5}$			
Ni	$S_n^0 = 1$	$S_n^- = 6$	$S_p^{--} = 100$	
Fe	$S_n^0 = 10$	$S_p^- = 30$	$S_p^{--} = 100$	
Co	$S_n^0 = 10$		$S_p^{--} = 100$	
Ag	$S_n^0 = 0.6$	$S_n^- = 1$	$S_p^{--} = 50$	

3-Jadval. Kremniyga kiritilgan kirishmalarning energiyaviy sathlariga zaryad tashuvchilarning tutib olish kesimlari

Kirishmalar	Zaryad tashuvchini tutib olish kesimi			
Au	$S_n^+ = 30$	$S_n^0 = 5$	$S_p^0 = 20$	$S_p^- = 10$
Fe	$S_n^+ \geq 10$	$S_p^0 = 3$		$S_p^- = 500$
Zn	$S_n^- = 0.01$ $S_n^{--} = 1$	$S_n^0 = 5$		

Jadvaldan ko'rinadiki ko'rsatilgan kirishmalar kiritilganda markazning zaryad holati o'zgarishi bilan birgalikda uning tutib olish kesimi o'zgaradi. Bunda tortuvchi kulon (elektrostatik) markazining zaryad tashuvchini ushlab olish kesimi 10^{-12} sm^2 ga yetadi, neytral markazniki 10^{-16} sm^2 chamasida, itaruvchi markazniki esa, $10^{-18} - 10^{-20} \text{ sm}^2$ chamasida bo'ladi. Elektronlarning issiqlik harakati tufayli erkin bo'lishi (3-o'tish) tutqichlar tomonidan zaryad tashuvchilarning ushlanish jarayoniga teskari jarayondir. Zonalarda aynish bo'lmagan holda o'tkazuvchanlik

zonasidagi elektronlar konsentratsiyasining o'zgarish tezligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_n n_{n0} - \gamma \cdot n_0 (N_r - n_{r0}) \quad (20)$$

Bu yerda α_n - elektronlarning rekombinatsiya markazidan o'tkazuvchanlik zonasiga issiqlik generatsiyasi koeffisienti, n_0 - elektronlarning muvozat holatidagi konsentratsiyasi. Statsionar holatda $\frac{dn_0}{dt} = 0$, u holda

$$n_{r0} = \frac{N}{(\alpha_n (\gamma_n n_0) + 1)} \quad (21)$$

Boshqa tomondan:

$$n_{r0} = \int N_F = N_n \left[1 + \exp \left(\frac{\Delta E_r - E_F}{R_0 T} \right) \right]^{-1} \quad (22)$$

Bunda E_f - Fermi sathi. Aynish bo'lmaganda

$$n_0 = N_0 \exp \left[\frac{E_F}{R_0 T} \right] \quad (23)$$

Demak, $\alpha_n = \gamma_n n_1$; $n_1 = N_e e^{-\frac{\Delta E}{R_0 T}}$ (24)

$E_F = E_n$ bo'lganida $n_i = n_0$. Shunday qilib, muvozanat sharoitida issiqlik generatsiyasi tezligi quyidagicha bo'ladi:

$$g_3 = \alpha_n n_{10} = \gamma_n n_{20} N_e e^{-\Delta E / R_0 T} = \gamma_n n_{10} n_1 \quad (25)$$

Nomuzanat holatdagi n_{r0} ni n_r ga almashtirib olish kerak. Xuddi shu yo'sinda kovaklarning tutqichlardan valent zonaga issiqlik tufayli generatsiya tezligi ifodasini topamiz:

$$g_6 = \alpha_n (N_n - n_r) = \gamma_p (N_n - n_r) N_v e^{-\frac{E_g - \Delta E_c}{R_0 T}} = \gamma_p (N_n - n_r) p_1 \quad (26)$$

Bu yerda:

$$p_i = N_v e^{-\frac{E_g - \Delta E_c}{k_B T}} \quad (27)$$

2-o'tish (5-rasm) kovakning valent zonadan elektronlar band qilgan rekombinatsiya markazga o'tishni tasvirlaydi. Ushlash tezligi (17) formuladan aniqlanadi. Nihoyat 6-o'tish kovakning rekombinatsiya markazidan valent zonaga issiqlik tufayli generatsiyalanishini ko'rsatadi. (24) va (27) formulalardan

$$n_i \cdot p_i = n_i^2 \quad (28)$$

Endi 5-rasmda keltirilgan sxemadagi o'tishlar uchun elektronlar va kovaklar balansi tenglamalarini yoza olamiz:

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = g - \gamma_n (N_r - n_r) + \gamma_n n_r \cdot n_i \quad (29)$$

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = g - \gamma_p n_r p + \frac{\gamma_p (N_r - n_r)}{p_i} \quad (30)$$

Bu tenglamalar elektroneytrallik sharti asosida yechiladi. Sayoz donorlar va akseptorlar to'la ionlashgan va rekombinatsiyada qatnashmaydi, deb hisoblaymiz. U holda elektroneytrallik sharti quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\Delta n_r + \Delta n = \Delta p \quad (31)$$

Shokli-Ridning bir tutqichli modeli bo'yicha statsionar holatda nomuzanat holatdagi zaryad tashuvchilar yashash vaqtini hisoblaylik. (29) va (30) tenglamalar sistemasidan $d\Delta n/dt = d\Delta p/dt = 0$ da

$$n_r = \frac{(\gamma_p p_i + \gamma_n n) N_2}{\gamma_p (p_i + p) + \gamma (n_i + n)} \quad (32)$$

Rekombinatsiya markazlari kam bo'lganda (31) ifoda soddalashadi va $\Delta n = \Delta p$, (32) ifodani (29), (30) tenglamalarga qo'yib, rekombinatsiya tezligi formulasini yozamiz:

$$r = \frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{\Delta p}{\tau_p} = N_r \frac{\gamma_n \gamma_p (n \cdot p - n_i^2)}{(n_i + n) \gamma_n + \gamma_p (p_i + p)} \quad (33)$$

Statsionar holatda ($\Delta n = \Delta p = \Delta n_{st}$) da

$$\tau = \tau_n = \tau_p = \frac{\Delta n_{st}}{g}; \quad g = \tau^{-1} \Delta n_{st} = \gamma \quad (33a)$$

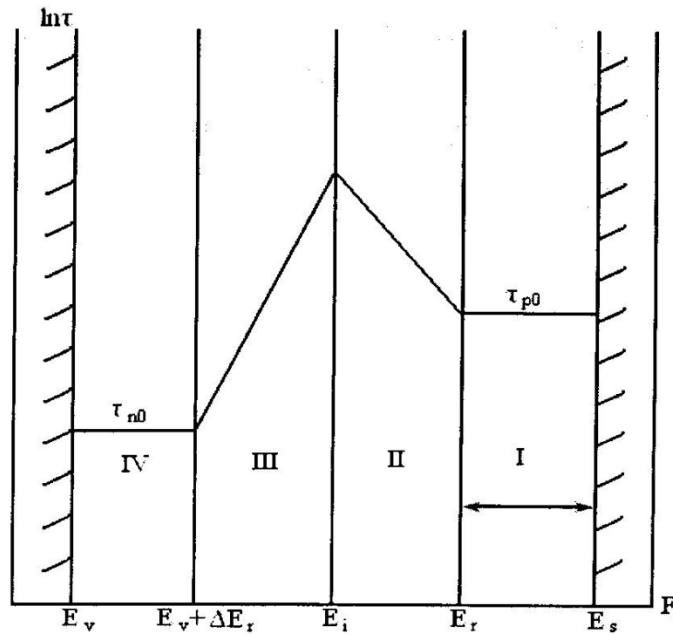
(33) va (33 a) ifodalardan:

$$\tau = \tau_{p0} \frac{n_0 + \Delta n + n_1}{p_0 + n_0 + \Delta n} + \tau_{n0} \frac{p_0 + p_1 + \Delta p}{n_0 + p_0 + \Delta p} \quad (34)$$

Bundagi $\tau_{p0} = \frac{1}{\gamma_p N_r}$; $\tau_{n0} = \frac{1}{\gamma_n N_r}$ bu kattaliklar ma'nosini oydinlashtirish

qiyin emas. U quyidagi tahlildan aniqlanadi:

yarim o'tkazgichning taqiqlangan zonasini to'rtta sohaga ajratamiz:



6-rasm. Mahalliy markazlar orqali rekombinatsiya holida zaryad tashuvchilar yashash vaqtining Fermi sathi vaziyatiga boq'liqligi.

Yashash vaqti τ ning Fermi sathi vaziyatiga bog'liqligini tahlil qilaylik (6-rasm).

1-soha: $E_r < F < E_c$, ya'ni Fermi sathi rekombinatsiya markazi sathi bilan o'tkazuvchanlik zonasi tubi orasida (n-turdagi yarim o'tkazgich) , bunda $n_0 \geq p_0$,

$n_0 \gg n_1$ va $p_1 \gg p_0$ bu holda $\tau = \tau_{p0}$ E_F Fermi sathi, E_r rekombinatsiya sathidan yuqori bo'lgani uchun bu sathni elektronlar to'ldirgan. Rekombinatsiya yuz berishi uchun kovak valent zonadan rekombinatsiya sathiga o'tishi kifoya. Shuning uchun yashash vaqti τ elektron-kovak (valent zonadan rekombinatsion sathga) juftining yashash vaqti bilan aniqlanadi.

2-sohaga: $E_t < F < E_r$, ya'ni Fermi sathi taqiqlangan zona o'rtasi bilan rekonbinatsiya sathi orasida, bu n-turdagi yarim o'tkazgich ($n_0 \gg p_0$). Ammo bu sohada $n_1 \gg n_0$, $p_1 \gg p_0$ va $n_1 \gg p_1$, bu holda (34) tenglama quyidagi ko'rinishga keladi:

$$\tau = (n_1/n_0)\tau_{p0} \quad (35)$$

Bu zonaga E taqiqlangan zona o'rtasiga qarab siljiganda τ eksponensiyal qonun bo'yicha ortib b oradi. Buning sababi rekombinatsiya markazlarining elektronlar bilan to'ldirilganligining kamayib borishidir.

4-soha: $E_v < E < E_r + E_v$, bu sohaga yarim o'tkazgich p-turdagi o'tkazuvchanlikka ega. $p_0 \gg n_0$, lekin $p_0 \gg p_i$, $n_1 \gg n_0$, $n_1 \gg p_0$ bo'ladi. Barcha rekombinatsiya markazlarida, elektronlar yo'q, ya'ni ular kovaklar bilan to'ldirilgan E_r sathga o'tish rekombinatsiya ehtimolligini aniqlaydi.

3-soha: $E_v + \Delta E_r < F < E_t$ bu holda Fermi sathi ta'qiqlangan zonaning pastki qismida joylashgan bo'lib, yarim o'tkazgich p-turda va $p_0 \gg n_0$, $p_0 \gg p_1$, $n_1 \gg n_0$ (34) formula

$$\tau = \frac{n_1}{p_0} \tau_{p0} + \tau_{n0} \quad (36)$$

ko'rinishni oladi. Undagi birinchi hadni

$$\frac{n_1}{p_0} \tau_{p0} = \tau_{p0} \left(\frac{N_e}{N_v} \right) \exp[(F - (E_v + \Delta E_r)) / R_0 T] \quad (37)$$

ko'rinishda yozish mumkin. (37) dan ko'rinadiki Fermi sathi E , ga yaqinlashayotganda (37) dagi $F - (E_v + \Delta E_r)$ ayirma ortadi va τ ham ortadi.

Bu hol $F=E_i$; qiymatga erishguncha davom etadi. $F=E_i$ bo'lganda esa, yashash vaqti $\tau_{\max}$ bo'lib, rekombinatsiya markazlarida elektron bo'lmaydi. F sath E_i sathga yaqinlashganda valent zonadagi kovaklar konsentratsiyasi kamayadi, ammo shu bilan bir vaqtda tutqich ushlab olgan kovaklarning issiqlik generatsiyasi jarayoni ham kecha boshlaydi. Yuqorida keltirilgan tahlildan kelib chiqadigan xulosa shuki, u yoki bu turdagi yarim o'tkazgichda mahalliy markazlar orqali rekombinatsiya holida zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar belgilaydi. Uyg'onish darajasi yuqori (ya'ni $\Delta n, \Delta p \gg n_0, p_0, n_1, p_1$) bo'lganda (34) ifodadan

$$\tau = \tau_i = \tau_{p0} + \tau_{n0}; \quad (38)$$

ifoda kelib chiqadi. Uyg'onish darajasi cheksiz kichik bo'lgan hol uchun yashash vaqtini τ_0 deb belgilaylik. Har qanday uyg'onish darajasi holida

$$\tau \approx \frac{\tau_0(n_0 + p_0) + \Delta n \tau_\infty}{p_0 + n_0 + \Delta n} \quad (39)$$

Uyg'onish darajasi uncha yuqori bo'lmagan holda

$$\tau = \tau_0 + \frac{\Delta n}{n_0 + p_0} \tau_\infty \quad (40)$$

τ_0, τ_i kattaliklarni $\tau = \oint \left(\frac{\Delta n}{n_0 - p_0} \right)$ funksional bog'lanishning og'maligini va boshlang'ich ordinatasi bo'yicha topish mumkin. Bu qonunni chiziqli bog'lanishdan chetlanishidan Shokli - Rid modeli tajriba ma'lumotiga mos kelmaydi degan xulosa kelib chiqadi.

Biz yuqorida sodda markazlar orqali kechadigan rekombinatsiyani qarab chiqdik. Sodda donor va akseptorlar faqat ikki zaryadli holatda mavjud bo'la oladi. Donor markazi neytral yoki bir marta musbat zaryadlangan (sathda elektron yo'q), akseptor markazlari esa neytral bir karra manfiy zaryadlangan (sathga elektron o'tib olgan) holatda bo'ladi. Sodda donor va akseptorlar ta'qiqlangan zonada faqat birgina energiyaviy sathga ega bo'ladi. Ko'pincha yarim o'tkazgichlarda bir qancha turdagi sodda markazlar va ko'p zaryadli markazlar bo'lishi mumkin. Ko'p zaryadli

markazlarning energiyaviy spektri murakkab bo'lib, taqiqlangan zonadagi bir necha sathdan iborat. Masalan : oltin germaniyda besh holatda: neytral, bir karrali, ikki karrali, uch karrali manfiy va bir karrali musbat zaryadlangan holatlarda bo'ladi va quyidagi to'rtta sathni hosil qiladi [7]:

$$E_v + 0,05\text{eV}, E_v + 0,15\text{eV}, E_c - 0,15\text{eV}, E_c - 0,4\text{eV}$$

Nikel germaniyda ikkita akseptor sathni hosil qiladi: $E_1 = E_v + 0,22\text{eV}$,

$E_2 = E_c - 0,3\text{eV}$ va uchta - Ni° , Ni^- , Ni^{--} zaryadli holatlarda bo'ladi.

Ko'p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiya holida u yoki bu energiyaviy sathning rekombinatsiyaviy faolligi o'zidan quyidagi joylashgan energiyaviy sathlarning elektron bilan to'lishiga bog'liq. Shunday qilib, bu holda turli zaryad holatidagi markazlar o'zaro ta'sirda bo'lib, ularga mos keluvchi energiyaviy sathlarni o'zaro bog'liqlikda qarash lozim. Shunday qilib, ko'p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiyada Shokli-Rid modelini (bitta energiyaviy sath mavjud bo'lgan hol uchun) faqat bir necha xususiy hol uchun tadbiiq etish mumkin [6]

Masalan, yorug'likning past darajalari va markazlar konsentratsiyasi kam bo'lgan hol uchun zaryad tashuvchilar yashash vaqtini $\frac{1}{\tau} = \sum_{i=1}^n \tau_i$ kabi hisoblash

mumkin, ya'ni har qaysi sathning yashash vaqtiga ta'sir aniqlanib, jamlanadi. Alohida olingan sathning yashash vaqtiga ta'siri esa, harorat va Fermi sathining holatiga bog'liq ravishda turlicha bo'ladi. Ko'pchilik hollarda (yorug'lik darajasi va harorat oshib borishi bilan) ko'p zaryadli markazlarga tegishli sathlardan birining rekombinatsiya jarayonida ustunligini aniqlab bo'lmaydi. Chunki, sathlar bir-biriga bog'liq ravishda qayta zaryadlanadi. Bu hol uchun rekombinatsiyaviy jarayonlarni nazariy tahlil etish murakkab bo'lib, Shokli-Rid modeli o'rinli bo'lmay qoladi.

Masalan, kremniyda oltin sathlari bir-biridan bir necha KT uzoqlikda joylashganligiga qaramasdan, faqat yorug'lik va haroratning past darajasidagina ularni alohida hisobga olish mumkin. Past haroratda oltin markazlariga tutilgan zaryad tashuvchilarning qayta C-yoki V-zonaga uzatilishi jarayoni juda kuchsiz bo'lib, yashash vaqtiga katta ta'sir ko'rsata olmaydi. Xuddi shunday, yorug'likning

past darajalarida oltin sathlarning elektron bilan to'lishi muvozanat holatiga mos kelib, turli zaryad holatidagi oltin markazlar konsentratsiyasi o'zgarmas, deb qabul qilish mumkin ($N_i = \text{const}$). [9] da ko'rsatilgandek, harorat 200°K ga yaqinlashishi va yoritilganligi darajasi $10^{12} \text{ sm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ga yetishi bilan zaryad tashuvchilarning oltin sathlaridan o'tkazuvchanlik va valent zonaga issiqlik uzatishi va oltin markazlarining qayta zaryadlanishi Si <Au> materialining fotoo'tkazuvchanligiga katta ta'sir ko'rsatadi va kremniyda oltinning ko'p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiyani nazariy tahlil qilishda Shokli-Rid modelini tadbiq etish chagaralari harorat va yorug'likning yuqorida keltirilgan qiymatlari bilan chegaralanadi.

1.4 ZARYAD TASHUVCHILARNING KO'PZARYADLI MARKAZLAR ORQALI REKOMBINATSIYASI

Ko'p zaryadli markazlar optik qayta zaryadlanishining fotoo'tkazuvchanlikka ta'sirini nazariy tahlil qilish uslubi Abdurkarimova X.R. va Qosimova R.S. larning "Oltin bilan ligirlangan kremniy fotoo'tkazuvchanligiga sathlar optik qayta zaryadlanishining ta'siri" maqolasida [9] oltin bilan legirlangan kremniyda bo'ladigan rekombinatsiyaviy jarayonlar to'laligicha tahlil qilingan. Maqolada ko'rsatilishicha, oltin bilan legirlangan kremniy asosida yarim o'tkazgichli kam inertsiyali, yuqori sezgirlikga ega bo'lgan fotoqabulqilgichlar yasash mumkin. Bu maqolada markazlar optik qayta zaryadlanishining fotoo'tkazuvchanlikka ta'sirini o'rganish uchun, avvalo, hosil qilingan ko'p zaryadli markazlar konsentratsiyalari topilgan. Bu konsentratsiyalarni topish uchun quyidagi kinetik tenglamalar sistemasi yozilgan:

$$\begin{aligned}
\frac{dn}{dt} &= G - \gamma_{n1}N_{1n} + \gamma_{n1}N_2N_{e2} - \gamma_{n0}N_{0n} + \gamma_{n0}N_1N_{e1} = 0 \\
\frac{dp}{dt} &= G - \gamma_{p2}N_{2p} + \gamma_{p2}N_1N_{C2} - \gamma_{p1}N_{1p} + \gamma_{p1}N_0N_{C1} = 0 \\
\frac{dN_2}{dt} &= [\gamma_{n1}N_{1n} - \gamma_{n1}N_2N_{C2}] - [\gamma_{p2}N_{2p} - \gamma_{p2}N_1N_{e2}] = 0 \\
k &= \frac{\gamma_{p1}\gamma_{p2}}{\gamma_{n0}\gamma_{n1}}p_{V1} + \frac{\gamma_{p2}}{\gamma_{n1}}N_{C1} + \frac{\gamma_{p1}}{\gamma_{n0}}N_{e2} \\
l &= \frac{\gamma_{p1}}{\gamma_0}N_{C2}p_{V1} + \frac{\gamma_{p1}\gamma_{p2}}{\gamma_{n0}\gamma_{n1}}p_{V1}p_{V2} + N_{C1}N_{C2} \\
\frac{dN_0}{dt} &= [\gamma_{n0}N_{0n} - \gamma_{n0}N_1N_{C1}] - [\gamma_{p1}N_{1p} - \gamma_{p1}N_0p_{V1}] = 0
\end{aligned} \tag{41}$$

Turli zaryad holatlarida bo'lgan markazlar konsentratsiyaslari quyidagicha bo'ladi:

$$\begin{aligned}
N_0 &= N \frac{\xi}{\xi + \xi\chi + \chi} \\
N_1 &= N \frac{\xi\chi}{\xi + \xi\chi + \chi} \\
N_2 &= N \frac{\chi}{\xi + \xi\chi + \chi}
\end{aligned} \tag{42}$$

Bu yerda

$$\begin{aligned}
\xi &= \frac{\gamma_{p2}p + \gamma_{n1}N_{C2}}{\gamma_{n1}n + \gamma_{p2}p_{V2}} \\
\chi &= \frac{\gamma_{n0}n + \gamma_{p1}p_{V1}}{\gamma_{p1}p + \gamma_{n0}N_{C1}}
\end{aligned} \tag{43}$$

Yuqoridagi ifodalardan foydalanib generatsiya tezligi uchun ham ifodani topamiz:

$$G = N_1[(P(\gamma_{p2})\xi^{-1} + \gamma_{p1}) - (\gamma_{p1}p_{V1}\chi^{-1} + \gamma_{p2}p_{V2})] \tag{44}$$

$$\tau_n = \frac{n - n_0}{G} \quad va \quad \tau_p = \frac{p - p_0}{G} \tag{45}$$

Shu ifodalarni hisobga olsak:

$$\begin{aligned}
\tau_n &= \frac{n-n_0}{N} \frac{\xi + \xi\chi + \chi}{\gamma_{n0}\xi(n - N_{e1}\chi) + \gamma_{n1}\chi(n\xi + N_{c2})} \\
\tau_p &= \frac{p-p_0}{N} \frac{\xi + \xi\chi + \chi}{\gamma_{p1}\xi(p\chi - p_{v1}) + \gamma_{p2}\chi(p - p_{v2}\xi)} \\
\frac{dN_0}{dt} &= [\gamma_{n0}N_{0n} - \gamma_{n0}N_1N_{c1}] - [\gamma_{p1}N_{1p} - \gamma_{p1}N_0p_{v1}] = 0
\end{aligned} \tag{46}$$

Bu yerda N_i ($i=0,1,2$) uch zaryadli holatdagi oltin markazlarining nomuvozanat konsentratsiyasi. γ_{ni} va γ_{pi} - mos markazlar orqali zaryad tashuvchilarning tutilish koeffisientlari; N_{c1} va N_{c2} I va II sathlarga nisbatan o'tkazuvchanlik zonasidagi, N_{v1} va N_{v2} I va II sathlarga nisbatan valent zonadagi holatlar zichliklari. Bu yerda zaryadlarning elektro neytrallik shartidan foydalanib, yana bir tenglama keltirib chiqarilgan [9]: $n + 2N_2 + N_1 = p + M$; $M = N_d^+ + N_{AU}$ (48)

Bu elektroneytrallik shartidan foydalanib, markazlar konsentratsiyasi uchun yozilgan tenglamalar sistemasining to'liq yechimiga ega bo'lish mumkin. Oltin markazlari parametrlari bilan elektronlar va kovaklar konsentrasiyalari orasidagi bog'liqlikni ifodalovchi tenglama quyidagi ko'rinishni bo'ladi [9]:

$$n^3 + an^2 + bn + c = 0. \tag{49}$$

Bu yerda

$$\begin{aligned}
a &= \left(\frac{\gamma_{p2}}{\gamma_{n1}} - 1 \right) p + (g + 2N - M) : \\
\tau_n &= \frac{n-n_0}{N} \frac{\xi + \xi\chi + \chi}{\gamma_{n0}\xi(n - N_{e1}\chi) + \gamma_{n1}\chi(n\xi + N_{c2})} \\
\tau_p &= \frac{p-p_0}{N} \frac{\xi + \xi\chi + \chi}{\gamma_{p1}\xi(p\chi - p_{v1}) + \gamma_{p2}\chi(p - p_{v2}\xi)}
\end{aligned} \tag{50}$$

Endi erkin kovaklar konsentratsiyasini bilgan holda n , $p(G)$, $N_i(G)$, τ_n , $\tau_p(G)$ larning har xil temperaturadagi bog'likligini bilish mumkin.

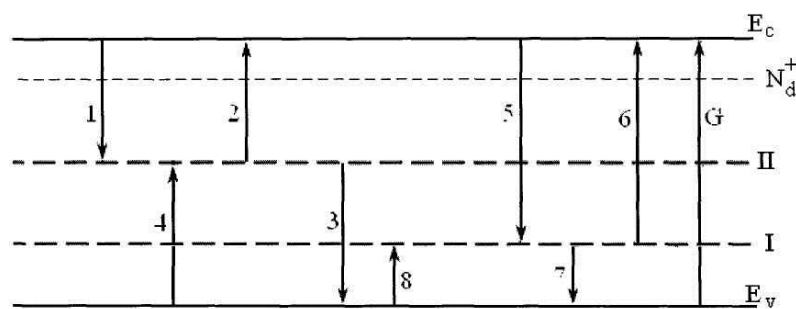
Shunday qilib, yuqorida keltirilgan hisoblash usulining tahlili shuni ko'satadiki, uni uch zaryadli holatga ega bo'lgan turli ko'p zaryadli markazlar

uchun qo'llash mumkin ekan. Keyingi bobda ushbu paragrafda ko'rib chiqilgan nazariy tahlil usulidan foydalanib, kremniyda ruxning kopzaryadli markazlari orqali rekombinatsiya jarayonlarini o'rganish bo'yicha olingan natijalar keltirilgan.

II BOB. RUX MARKAZLARI OPTIK QAYTA ZARYADLANISHINING KREMNIY FOTOOTKAZUVCHANLIGIGA TA'SIRI

2.1. HISOBLASHLAR UCHUN BOSHLANG'CH SHARTLAR VA KREMNIYDA RUX MARKAZLARINING REKOMBINASIYAVIY PARAMETRLARI

Rux bilan kompensirlangan kremniyning asosiy parametrlari uning elektrofizikaviy va fotoelektr xususiyatlarini belgilaydi. Kremniyda rux $E_c=0.55\text{eV}$ va $E_v = 0.31\text{ eV}$ energiyaviy sathlarni hosil qilib, ikki karrali akseptor sifatida ta'sir ko'rsatadi.(7-rasm). Ayrim ishlarda akseptor sathlari bilan bir qatorda rux atomlari kremniyning ta'qiqlangan zonasiga donor sathini ham olib kirishi qayd etilgan, lekin ularning konsentrasiyasi 10^{14} sm^{-3} dan oshmaydi. $T=1350^{\circ}\text{C}$ da ruxning kremniydagi eruvchanligi $5\cdot 10^{16}\text{ sm}^{-3}$ tartibda bo'ladi. Uning $900\text{-}1350^{\circ}\text{C}$ oralig'dagi diffuziya koeffisienti $10^{-6} - 10^{-7}\text{ sm}^2\text{s}^{-1}$ ga teng [10]. p-turdagi kremniyda ruxning bir karra manfiy zaryadlangan markaziga kovakning tutilish kesimi $S_p^- = 5\cdot 10^{-14}\text{ sm}^2$ va neytral markazga elektronning tutilish kesimi $S_n^0 = 5\cdot 10^{-16}\text{ sm}^2$ tartibda bo'ladi. N-turdagi kremniyda bir karra manfiy zaryadlangan rux markazlariga elektronning tutilish kesimi $10^{-20} \leq S_n^- < 10^{-18}\text{ sm}^2$ tartibda bo'ladi.



7-rasm. Rux bilan kompensirlangan kremniyning energiyaviy diagrammasi.

$T=300^{\circ}\text{K}$, $N_d=N_{zn}$, I- $E_c=0.55\text{ eV}$, II- $E_v=0.31\text{ eV}$

Kremniyda ruxning ko'p zaryadli markazlari orqali rekombinasiya jarayonlarini [9] da keltirilgan usulda nazariy tahlil qilishda foydalanilgan parametrlar quyidagi jadvalda keltirilgan. Hisoblashlar $T=300\text{K}$ harorat va kompensasiyaning $N_d = N_{zn} = 10^{15}\text{ sm}^{-3}$ darajasi uchun bajarildi.

4- Jadval. Rux bilan kompensirlangan n-turdagi kremniy uchun hisoblashlarda ishlatilgan asosiy parametrlarning son qiymatlari

Turli zaryad holatidagi rux markaziga elektron yoki kovakning tutilish kesimi	Adabiyot	Ruxning energiyaviy sathlariga nisbatan ruxsat etilgan zonalarda elektronlar va kovaklar uchun effektiv holatlar zichligi	Adabiyot
$S_p^- = 5 \cdot 10^{-14} \text{ sm}^2$	[10]	$N_{c1} = 1.85 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$	[7]
$S_n^0 = 5 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2$	[7,10,]	$N_{c2} = 1.82 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}$	[7]
$S_n^- = 10^{-18} \text{ sm}^2$	[11]	$P_{v1} = 6.67 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$	[7]
$S_p^{--} = 10^{-16} \text{ sm}^2$	[10]	$P_{v2} = 6.63 \cdot 10^9 \text{ sm}^{-3}$	[7]

2.2. KREMNIYDA RUXNING KO'PZARYADLI MARKAZLARI ORQALI REKOMBINATSIYA JARAYONLARINING NAZARIY TAHLILI

Shunday qilib, rux kremniyda asosan ikkita akseptor sathni hosil qiladi: $E_v + 0.31 \text{ eV}$; $E_c - 0.55 \text{ eV}$; va uch zaryad holatida: neytral, bir karra manfiy, ikki karra manfiy zaryadli holatlarda mavjud bo'la oladi. Ko'p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiya holida turli zaryad holatidagi markazlar o'zaro ta'sirda bo'lib, u yoki bu sathning rekombinatsiya jarayonidagi faolligini aniqlash lozim bo'ladi. Bunday hol uchun Shokli-Rid modelini faqat bir necha xususiy hollarda qo'llash mumkin. Xususan, yorug'likning past darajalari hamda rekombinatsiya markazlari konsentratsiyasi kam bo'lgan hollardagina ko'p zaryadli markazga tegishli bo'lgan alohida energiyaviy sathning rekombinatsiya jarayonlardagi ishtiroki ustuvor bo'lishi mumkin. Ko'p zaryadli markazlar orqali zaryad tashuvchilar generatsiyasi va rekombinatsiyasi kinetikasini o'rganish shuni ko'rsatadiki, yoritilganlik darajasi va harorat o'zgarishi bilan ko'p zaryadli markazlarning optik va termik qayta zaryadlanishi sathlarning rekombinatsiyaviy faolligiga ta'sir ko'rsatadi [11]. Binobarin yarim o'tkazgichning fotoelektr xossalari o'zgaradi.

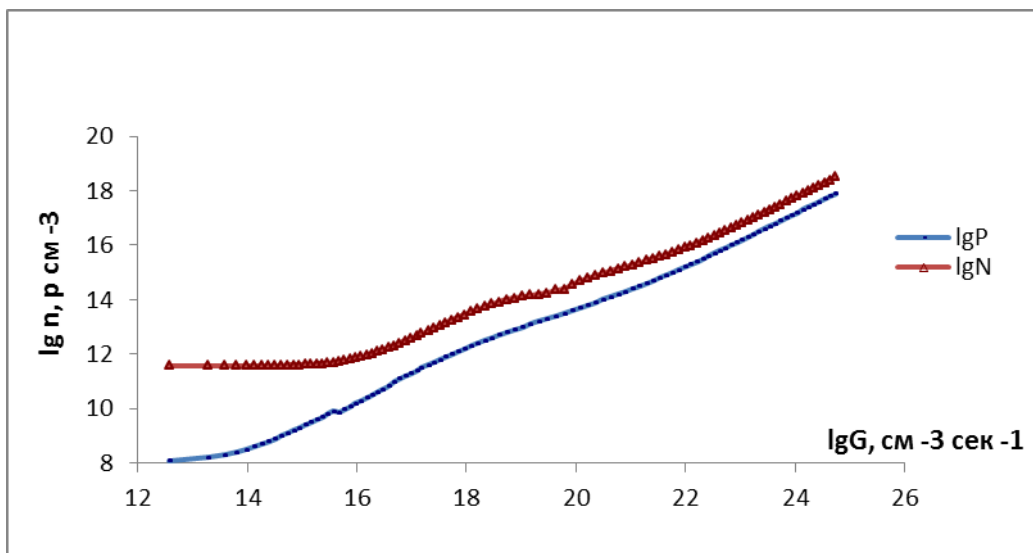
Oltin bilan legirlangan kremniy fotoo'tkazuvchanligiga sathlar optik qayta zaryadlanishining ta'sirini o'rganish [9] shuni ko'rsatadiki, oltin sathlari bir-biridan bir necha KT energiyaviy "uzoqlik"da joylashganligiga qaramasdan faqat

yorug'lik va haroratning past darajasidagina ularni alohida hisobga olish mumkin. Past haroratda oltin markazlariga tutilgan zaryad tashuvchilarning o'tkazuvchanlik yoki valent zonaga qayta o'tishi jarayoni juda kuchsiz bo'lib, zaryad tashuvchilarning yashash vaqtiga sezilarli ta'sir ko'rsata olmaydi.

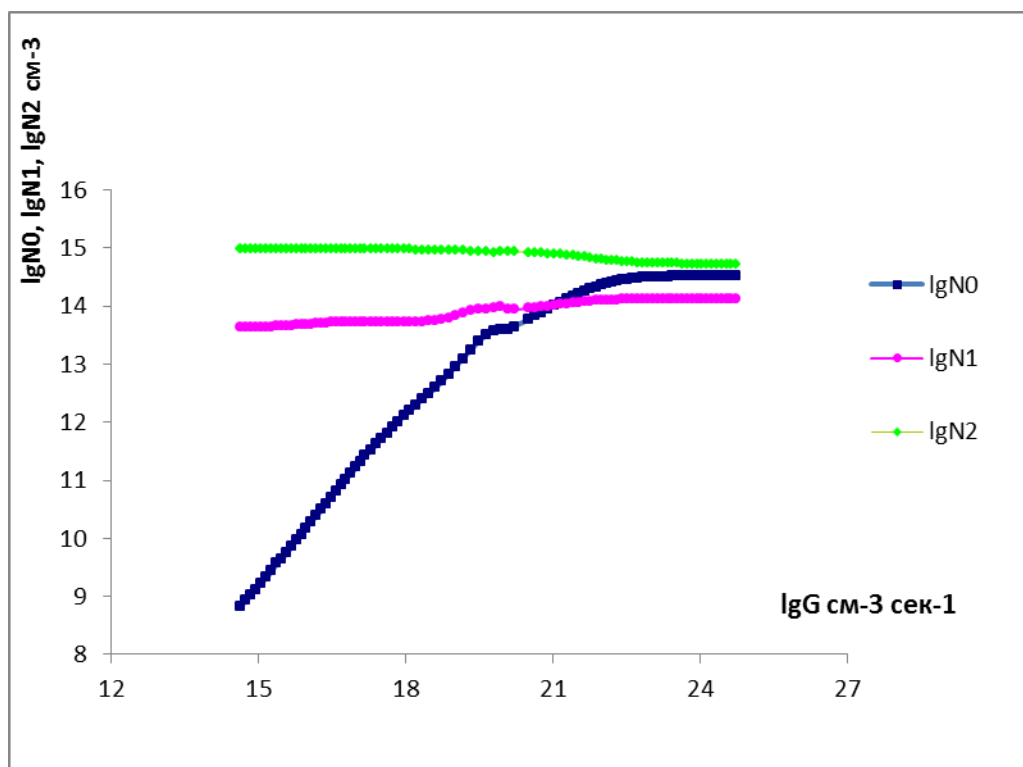
Yorug'likning past darajalarida esa, oltin sathlarining elektron bilan to'lishi muvozanat holatiga mos kelib, turli zaryad holatidagi oltin markazlari konsentratsiyasini o'zgarmas deb qabul qilish mumkin. Harorat 200K ga yaqinlashishi yoki yoritilganlik darajasi $10^{12} \text{ sm}^{-3}\text{sek}^{-1}$ ga yetishi bilan zaryad tashuvchilarning oltin sathlaridan o'tkazuvchanlik va valent zonaga issiqlik ta'sirida o'tishi va oltin markazlarining optik qayta zaryadlanishi materialning fotoo'tkazuvchanligiga katta ta'sir ko'rsatadi [9].

Ushbu malakaviy bitiruv ishida [9] da bayon etilgan ko'p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiya jarayoni nazariy tahlil qilish usulidan foydalanib kremniyning fotoo'tkazuvchanligiga ruxning ko'p zaryadli markazlari orqali rekombinatsiya jarayonlarining ta'sirini o'rganish bo'yicha olingan natijalar keltirildi.

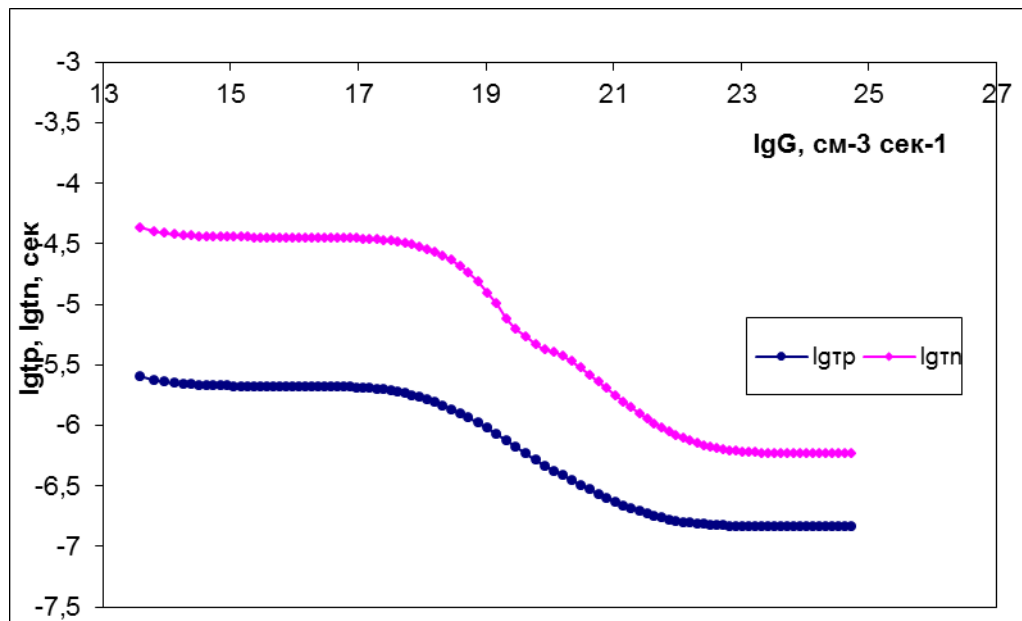
Nazariy tahlil xona harorati va rux bilan kompensirlangan n turdagi kremniy ($N_d=N_{Zn}=10^{15}\text{sm}^{-3}$) uchun bajarildi. Nazariy tahlilni amalga oshrishda [9] da tavsiya etilgan algoritmdan foydalanildi. Beysik tilidagi hisoblash dasturi malakaviy bitiruv ishining ilova qismida keltirilgan. Hisoblashlarda kremniyda ruxning ko'p zaryadli markazlari orqali rekombinatsiya jarayonlarini belgilaydigan kattaliklar [7,10,11] dan olindi (4-jadval). Olingan natijalar quyidagi $n,p(G)$, $N_i(G)$, $\tau_n,\tau_p(G)$ bog'liqliklar ko'rinishida keltirilgan (8-10 rasmlar).



8-rasm. Rux bilan kompensirlangan n-kremniyda elektronlar va kovaklar konsentrasiyalarining yoritilganlik darajasiga bog'liqligi



9-rasm. Rux bilan kompensirlangan n-kremniyda rux markazlari konsentrasiyalarining yoritilganlik darajasiga bog'liqligi



10-rasm. Rux bilan kompensirlangan n-kremniyda erkin elektronlar va kovaklar yashash vaqtining yoritilganlik darajasiga bog'liqligi

Yoritilganlikning past darajalarida rux markazlarining elektron bilan to'lishi termodinamik muvozanat holatiga mos keladi va u ruxsat etilgan zonalardagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va ularning yashash vaqtini belgilaydi.

Yoritilganlikning oshib borishi bilan rux markazlari optik qayta zaryadlanib, ruxning bir karra manfiy va neytral markazlari konsentratsiyalari ortib boradi (9-rasm). Bu jarayon generatsiya jadalligi hamda rux markazlariga elektronlar va kovaklarning tutilish kesimlariga bog'liq bo'ladi. Markazlarning optik qayta zaryadlanishiga mos ravishda elektronlar va kovaklar konsentratsiyasi (8-rasm) hamda ularning yashash vaqtlari (10-rasm) ham o'zgaradi.

Yuqori yoritilganlikda rux markazlarining elektron bilan to'lishi erkin elektronlar va kovaklarning konsentratsiyasiga bog'liq bo'lmay qoladi. Shuning uchun elektronlar va kovaklar konsentratsiyasi chiziqli o'garadi. Ularning yashash vaqti elektron-kovak juftining yashash vaqti bilan belgilanadi.

Shunday qilib, nazariy tahlil natijalariga ko'ra past yoritilganlikda deyarli barcha rux markazlari ikki karra manfiy zaryad holatida bo'lib, rekombinatsiyaviy jarayonlar asosan shu markazlar orqali amalga oshadi. Bunda kremniyning

fotoo'tkazuvchanligi asosan kovaklar yashash vaqti bilan aniqlanadi. Yoritilganlik darajasi oshib borishi bilan rux markazlari optik qayta zaryadlanib, elektron va kovaklarning yashash vaqtlari sezilarsiz darajada kamayadi. Rux markazlarining elektron bilan to'lishini boshqarish yo'li bilan (masalan, kerakli to'lqin uzunlikdagi yorug'lik bilan qo'shimcha yoritish) zaryad tashuvchilar yashash vaqti kamayishini oldini olish mumkin. Olingan natijalar turli fotoelektr asboblarda yasashga mo'ljallangan fotoo'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan kremniy olish uchun uni rux bilan legirlash yaxshi samara berishini ko'rsatadi.

2.3. RUX BILAN KOMPENSIRLANGAN KREMNIY MATERIALINING OPTOELEKTRONIKADA QO'LLANILISHI

Qattiq jism elektronikasi xususan, optoelektronikaning taraqqiyoti optoelektron qurilmalar yasashda ishlatiladigan materiallarning fotoelektr xossalarini yaxshilash bilan bog'liq. Zamonaviy planar texnologiya va fotolitografiya texnikasi imkoniyatlaridan foydalanish nuqtai nazaridan barcha talablarga javob beradigan material albatta, kremniy hisoblanadi. Kremniyda nazorat qilib bo'lmaydigan aralashmalar konsentratsiyasi $10^{12} - 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ tartibda bo'lib, bu ko'rsatkich bo'yicha boshqa hech bir yarim o'tkazgich material kremniy bilan raqobatlasha olmaydi.

Rux bilan kompensirlangan kremniyning fizikaviy xossalarini o'rganish bo'yicha olib borilgan bir qator tadqiqodlar shuni ko'rsatadiki, ushbu material turli optoelektron qurilmalar yasash uchun istiqbolli hisoblanadi. n-turdagi kremniyni rux bilan kompensirlaganda uning fotosezgirliги oshib, o'zining fotoelektr xossalariga ko'ra u PbS va CdS ga yaqinlashishi mumkinligi ko'rsatilgan [11].

Kremniyda rux markazlarining rekombinatsiyaviy tabiati bilan bog'liq bo'lgan turli hodisalar uning asosida yangi optoelektron qurilmalar yasash imkoniyatini yaratadi. Xususan, kuchli elektr maydonida rux markazlariga elektronlar tutilish kesimining o'zgarishi tuzilmaning voltamper xarakteristikasida noxizizliklarning, jumladan, n-simon manfiy differensial qarshilik sohasining

namoyon bo'lishiga olib keladi. Bulardan tashqari rux bilan kompensirlangan kremniyda past haroratlarda domenlarning paydo bo'lishi bilan bog'liq bo'lgan past chastotali tok tebranishlari, fotojavobning uzoq kechikishi, turli zaryadli rux markazlarining optik va termik qayda zaryadlanishi kabi effektlar kuzatilishi mumkin. Yana shuni ham ta'kidlash lozimki, n-turdagi kremniyni rux atomlari bilan kompensirlash uning asosiy fizikaviy xarakteristikalarini keng oraliqda o'zgartirish, ya'ni material xossalarini boshqarish imkoniyatini yaratadi. Masalan, p-va n-turdagi kremniyning solishtirma qarshiligi kompensatsiya darajasiga bog'liq ravishda 77-300K harorat oraliqig'ida 0.3 om·sm dan to $2 \cdot 10^{12}$ om·sm gacha, asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti $5 \cdot 10^{-8}$ s dan no 10^{-4} s gacha, asosiy zaryad tashuvchilarning yashash vaqti esa, $2 \cdot 10^{-4}$ s dan no 0.1 s gacha o'zgarishi mumkin.

Yuqorida qayd etilgan hodisalar asosida rux bilan kompensirlangan kremniydan yasalishi mumkin bo'lgan fotoelektr asboblardan biri yuqori sezgirlikka ega bo'lgan fotorezistordir. Tarkibidagi rux va fosforning konsentrasiyalari $N_{Zn} < N_P < 2 N_{Zn}$ munosabatda bo'lgan n-turdagi kremniy asosida yuqori sezgirlikka ega bo'lgan fotorezistor yaratish mumkin. Bunday materialda 300Kda rux atomlari $E_c + 0.31\text{eV}$ sathining rekombinasiya jarayonlaridagi ishtiroki sezilarsiz bo'ladi, chunki u kovaklar uchun yopishish markazlari vazifasini bajaradi. Ruxning bir karra manfiy zaryadlangan markazlari esa, elektronlar uchun juda kichik tutib olish kesimiga ega bo'lib, ularning yashash vaqti katta bo'lishini ta'minlaydi. Agar bu markazlarning konsentrasiyasi boshqa zaryad holatidagi rux markazlari hamda nazorat qilinishi qiyin bo'lgan markazlar konsentrasiyasidan katta bo'ladigan sharoit ta'minlansa, elektronlarning yashash vaqtini 50 ms ga etkazish mumkin. Fotorezistorning sezgirligini haroratni -60C gacha pasaytirish yo'li bilan taxminan 20 martaga oshirish mumkin. Bunday fotorezistor parametrlarining stabilligi hamda inersiyaviyligini 2-3 tartibga pasaytirish imkoniyatining mavjudligi uning yana bir ustun jihati hisoblanadi. Shu bilan birga rux bilan kompensirlangan kremniy asosidagi fotorezistorning

opto'lektronikada qo'llanilishi optoelektron qurilmalar chastotaviy imkoniyatlarini kengaytirishga xizmat qiladi.

Nurlanishli diod (masalan, GaAs li) va Si<Zn> asosida yasalgan fotorezistordan iborat optojuftlikdan kvant kuchaytirish koefitsientini oshirish maqsadida foydalanish mumkin. Bunday optojuftliklar asosida optron, optoelektron kalit, optoelektron rele, xotira elementlari, kvant kuchaytirgich kabi optoelektron va boshqa turdagi qurilmalar yaratish mumkin.

Asosiy xulosalar:

1. Rux kremniyda chuqur aralashma sifatida quyidagi parametrlariga ko'ra yarimo'tkazgich asbobsozligida qo'llash uchun qulay hisoblanadi:
 - Yuqori diffuziya koeffitsientiga ega (1000-1200 C da 10^{-6} - 10^{-7} sm²|s);
 - Rux elektrofaol atomlarining kremniyda eruvchanligi nisbatan yuqori (1350 C da $5 \cdot 10^{16}$ sm⁻³);
 - Energiyaviy holatlari turg'un;
 - Asosiy va asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar yashash vaqtini keng oraliqda o'zgartirish mumkin (10^{-10} - 10^{12} s);
2. Yoritilganlikning past darajalarida rux markazlarining elektron bilan to'lishi termodinamik muvozanat holatiga mos keladi va u ruxsat etilgan zonalardagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va ularning yashash vaqtini belgilaydi.
3. Yoritilganlikning o'rtacha darajalarida rux markazlarining optik qayta zaryadlanishi natijasida ruxning bir karra manfiy va neytral markazlari konsentratsiyalari ortib boradi vaunga mos ravishda elektronlar va kovaklar konsentratsiyasi hamda ularning yashash vaqtlari ham o'zgaradi.
4. Yoritilganlikning yuqori darajasida rux markazlarining elektron bilan to'lishi erkin elektronlar va kovaklarning soniga bog'liq bo'lmay qoladi. Shuning uchun elektronlar va kovaklar konsentratsiyasi chiziqli xarakterda bo'ladi. Ularning yashash vaqti elektron-kovak juftining yashash vaqti bilan belgilanadi.
5. Rux markazlarining elektron bilan to'lishini boshqarish yo'li bilan (masalan, kerakli to'lqin uzunlikdagi yorug'lik bilan qo'shimcha yoritish) zaryad tashuvchilar yashash vaqti kamayishini oldini olish mumkin. Olingan natijalar turli fotoelektr asboblarni yasashga mo'ljallangan fotoo'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan kremniy olish uchun uni rux bilan legirlash yaxshi samara berishini ko'rsatadi.

Foydalanilgan adabiyot ro'yxati

1. Kadrlar tayyorlashning Milliy dasturi. Toshkent, 1997y.
2. Ta'lim to'g'risidagi qonun. Toshkent, 1997y.
3. Karimov I.A. Yuksak ma'naviyat – yengilmas kuch. Toshkent, “Ma'naviyat”, 2008y.
4. Karimov I.A. “O'zbekiston- mustaqillikka erishish ostonasida” Toshkent, “O'zbekiston”, 2011y.
5. Qosimov S.S. “Axborot texnologiyalari”. “Aloqachi”, Toshkent.2006y.369b.
6. Рывкин С.М. Неравновесные процессы в полупроводниках. Физматгиз., М.,1963г.
7. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. Мир.,М., 1977г.
8. Акрамов Х.,Зайнобиддинов С., Тешабоев А. Ярим ўтказгичларда фотоэлектрик ҳодисалар.”Ўзбекистон”, Т., 1994й.
9. Абдукаримовва Х.Р.,Касимова Р.С.журнал Физика итехника полупроводников.1987., т.21.,в.2.
- 10.Корнилов А.,Анфимов В. журнал Физика итехника полупроводников.1967., т.1. , с.340.
- 11.Завадский Б.В., Корнилов А. журнал Физика итехника полупроводников.1967., т.1. , с.1326
12. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г.Физика полупроводников.Наука.,М.,1977

Ilova

Ko'p zaryadli markazlar orqali rekombinatsiya jarayonlarini hisoblash dasturi

```
1 WIDTH "LPT1:",220
10 LPRINT "HARORAT QIYMATINI KIRITISH":INPUT T:LPRINT "T=" T
14 DEFDBL G, K, L, B, C, J, D, P, Y, A, Q, F, H, X, R, S, W, U, V, E, Z, O, M,
N
15 DIM W5 (50,4), R (50,14), VN (50), VP (50), ZN (50), ZP (50)
40 VT=1E+07*(T/300)^0.1/2:PRINT "VT="VT
50 SN1=.0000000000000001#:PRINT "SN1="SN1
60 SN0=.0000000000000001#:PRINT "SN0="SN0
70 SP1=.0000000000000001#:PRINT "SP1="SP1
80 SP2=.0000000000000001#:PRINT "SP2="SP2
90 YN1=SN1*VT: PRINT "YN1="YN1
100 YN0=SN0*VT: PRINT "YN0="YN0
110 YP1=SP1*VT: PRINT "YP1="YP1
120 YP2=SP2*VT: PRINT "YP2="YP2
121 E3=.31:PRINT "E3="E3
122 E5=1.205-.00028*T:PRINT "E5="E5
130 E1=E5-E3:PRINT "E1="E1
136 K2=.0000862
140 NC=2.86E+19*(T/300)^1.5:PRINT "NC="NC
150 NC1=NC*EXP (-E1/(K2*T)):PRINT "NC1="NC1
160 E2=.55:PRINT "E2="E2
170 NC2=NC*EXP (-E2/(K2*T)):PRINT "NC2="NC2
180 NV=1.03E+19*(T/300)^1.5:PRINT "NV="NV
200 PV1=NV*EXP(-E3/(K2*T)):PRINT "PV1="PV1
210 E4=E5-E2:PRINT "E4="E4
220 PV2=NV*EXP(-E4/(K2*T)):PRINT "PV2="PV2
```

```

225 DM=1D+30
230 M=20000000000000000#
240 N=10000000000000000#
250 G1=YP1/YN0
260 G2=YP2/YN1
270 G=G1*PV1+G2*PV2+NC2
280 K=G1*G2*PV1+G2*NC1+G1*NC2
290 L=G1*NC2*PV1+G1*G2*PV1*PV2=NC1*NC2
294 L5=0
300 FOR I=13 TO 14 STEP . 1
310 P=1*10^I :L5=L5+1
315 PP=LOG (P)*.43429
320 B=(G2-1)/DM*P+G/DM+(2*N-M)/DM
325 BB=B*DM
330 C=((G2*G1/DM*P^2-G2/DM*P^2)+(K/DM*P-G/DM*P+G2*N/DM*P-
G2*M/DM*P)+(L-N*NC2+G*(2*N-M))/DM)
335 CC=C*DM
340 J=(G1*G2/DM*P^3+(K+G1*G2*M)/DM*P^2+(K*M/DM-
G1*G2*PV1*N/DM+L/DM)*P)
350 D=((N*G1*G2*PV1*PV2/DM-L*(M-N)/DM-N*NC1*NC2/DM-J))
355 DD=D*DM
360 A=1/DM
370 Y=(3*A*C-B^2)
380 QQ=Q/A
390 F=(4*(3*A*C-B^2)^3+(2*B^3-9*A*B*C+27*A^2*D)/2916*A^4)
395 FF=F/A^2
410 IF F>THEN 530
420 H=(-Y^3/27)^(1/2)
430 X=3.14/2-ATN((-Q/(2*A*H))/(1-(-Q/(2*A*H))^2)^1/2)

```

```

440 R=2*H^(1/3*COS(X/3)
450 S=2*H^(1/3*COS(X/3+2*3.14/3)
460 D=2*H^(1/3*COS(X/3+4*3.14/3)
470 W1#=R-B/(3*A)
480 W2#=S-B/(3*A)
490 W3#=D-B/(3*A)
491 W5(L5,1)=W1#
492 W5(L5,2)=W2#
493 W5(L5,3)=W3#
500 IF W1>0 THEN W=W1#
510 IF W2>0 THEN W=W2#
520 IF W3>0 THEN W=W3#
525 GOSUB 560
530 U=((F^(1/2)-(Q/2))^(1/3))/A^(1/3)
540 V=((-(F^(1/20))-Q/2)^1/3))/A^(1/3)
545 W4#U+V-B/(3*A)
548 W5(L5,4)=W4#
555 IF W4#>0 THEN W=W4#
560 E=YP2*P+YN1*NC2)/(YN1*W+YP2*PV2)
570 Z=YN0*W+PV1*YP2)/(YP1*P+YN0*NC1)
575 WW=LOG(W)*.43429
580 N0=N*E/(E+E*Z+Z)
585 N00=LOG(N0)*.43429
590 N1=N*E*Z/(E+E*Z+Z)
595 N11=LOG(N1)*.43429
600 N2=N*Z/(E+E*Z+Z)
605 N22=LOG(N2)*.43429
610 05=N1*((W*YN1+(W*YN0)/Z)-((YN1*NC2)/E+YN0*NC1))
613 IF 05<=0 THEN 620

```

```
615 00=LOG (05)*.43429
618 TP=P/05
619 TN=W/05
620 TPP=LOG(TP)*.43429
621 TNN=LOG(TN)*.43429
622 R(L5,1)=05
630 R(L5,2)=W
640 R(L5,3)=P
642 R(L5,4)=N0
644 R(L5,5)=N1
646 R(L5,6)=N2
647 R(L5,7)=00
648 R(L5,8)=WW
649 R(L5,9)=PP
650 R(L5,10)=N00
651 R(L5,11)=N11
652 R(L5,12)=N22
653 R(L5,13)=TPP
654 R(L5,14)=TNN
655 NEXT I
660 FOR I=1 TO L5
662 IF T<200 THEN 672
670 VN(I)=R(I,2)-R(1,2)
671 GOSUB 673
672 VN(I)=R(I,2)
673 IF VN(I)=0 THEN 680
674 KK(I)=LOG(VN(I))* .43429
680 ZN(I)=VN(I)/R(I,1)
681 IF ZN(I)<=0 THEN 683
```

```

682XX(I)= LOG(ZN(I))* .43429
683 VP(I)=R(I,3)-R(1,3)
684 ZP(I)=VP(I)/R(I,1)
690 NEXT I
691 LPRINT
692 LPRINT
694 PRINT TAB(6); "n1"; TAB(31); "n2"; TAB(37); "n3"; TAB(85); "n4"
696 LPRINT
700 FOR I=1 TO L5
710 PRINT W5(I,1); TAB(20); W5(I,2); TAB(39); W5(I,3); TAB(59); W5(I,4);
720 NEXT I
725 PRINT
735 PRINT TAB(6); "G"; TAB(31); "p"; TAB(51); "n"; TAB(77); "vn"
740 LPRINT
750 FOR I=1 TO L5
760 PRINT R (I,1); TAB(26); R (I,3); TAB(46); R (I,2); TAB(72); VN(I)
770 NEXT I
776 PRINT
780 PRINT TAB(6); "lgG"; TAB(25); "lgp"; TAB(45); "lgn"; TAB(65); "lgvn"
785 LPRINT
786 FOR I=1 TO L5
787 PRINT R (I,7); TAB(20); R (I,9); TAB(40); R (I,8); TAB(60); KK(I)
788 NEXT I
789 LPRINT
790 LPRINT TAB(6); "lgTAYP"; TAB(25); "lgTAYN";
791 LPRINT
792 FOR I=1 TO L5
793 LPRINT R (I,13); TAB(20); R (I,14);
794 NEXT I

```

```
797 LPRINT
798 PRINT TAB(6); "G"; TAB(31); "N0"; TAB(57); "N1"; TAB(84); "N2"
800 LPRINT
810 FOR I=1 TO L5
820 PRINT R (I,1); TAB(26); R (I,4); TAB(52); R (I,5); TAB(78); R (I,6);
830 NEXT I
832 PRINT
840 PRINT TAB(6); "lgG"; TAB(25); "lgN0"; TAB(45); "lgN1"; TAB(65);
"lgN2"
850 LPRINT
852 FOR I=1 TO L5
854 PRINT R (I,7); TAB(20); R (I,10); TAB(40); R (I,11); TAB(60); R (I,12);
855 NEXT I
856 LPRINT
860 PRINT TAB(6); "G"; TAB(31); "Zn"; TAB(67); "Zp"; TAB(85); "lgZn"
870 LPRINT
880 FOR I=1 TO L5
890 PRINT R (I,1); TAB(26); ZN (I); TAB(52); ZP (I); TAB(77); XX (I);
900 NEXT I
910 END
```


Hisoblash natijalari

T/r	lgG	lgP	lgN	lgtp	lgt _n	lgN ₀	lgN ₁	lgN ₂
1	12,575	8,099	11,571	-5,1622	-3,9317			
2	13,287	8,199	11,571	-5,5202	-4,2896			
3	13,591	8,299	11,572	-5,5935	-4,3629			
4	13,804	8,399	11,573	-5,6251	-4,3946			
5	13,977	8,499	11,574	-5,6425	-4,4119			
6	14,127	8,599	11,576	-5,6532	-4,4226			
7	14,263	8,699	11,578	-5,6603	-4,4297			
8	14,39	8,799	11,58	-5,6652	-4,4347			
9	14,51	8,899	11,584	-5,6688	-4,4382			
10	14,625	8,999	11,588	-5,6714	-4,4408			
11	14,737	9,099	11,592	-5,6733	-4,4428	8,827	13,634	14,98
12	14,846	9,199	11,599	-5,6748	-4,4442	8,929	13,636	14,98
13	14,953	9,299	11,606	-5,6759	-4,4453	9,03	13,637	14,98
14	15,059	9,399	11,615	-5,6767	-4,4461	9,122	13,639	14,98
15	15,163	9,499	11,627	-5,6773	-4,4467	9,23	13,642	14,98
16	15,266	9,599	11,641	-5,6778	-4,4472	9,331	13,645	14,98
17	15,369	9,699	11,658	-5,6781	-4,4475	9,442	13,648	14,98
18	15,471	9,799	11,679	-5,6783	-4,4477	9,577	13,653	14,979
19	15,572	9,899	11,703	-5,6785	-4,4478	9,65	13,657	14,979
20	15,674	9,861	11,732	-5,6786	-4,4479	9,75	13,662	14,979
21	15,775	9,967	11,766	-5,6787	-4,448	9,861	13,668	14,979
22	15,875	10,074	11,806	-5,6787	-4,448	9,967	13,674	14,978
23	15,976	10,18	11,851	-5,6788	-4,448	10,074	13,681	14,978
24	16,077	10,287	11,901	-5,679	-4,4481	10,18	13,688	14,978

T/r	lgG	lgP	lgN	lgтp	lgтn	lgN0	lgN1	lgN2
25	16,177	10,393	11,958	-5,6792	-4,4482	10,287	13,694	14,977
26	16,278	10,499	12,02	-5,6795	-4,4485	10,393	13,7	14,977
27	16,379	10,604	12,087	-5,68	-4,4488	10,499	13,706	14,977
28	16,479	10,709	12,159	-5,6806	-4,4493	10,604	13,712	14,976
29	16,58	10,813	12,236	-5,6815	-4,45	10,709	13,717	14,976
30	16,682	10,999	12,316	-5,6827	-4,451	10,813	13,721	14,976
31	16,783	11,099	12,4	-5,6843	-4,4523	10,917	13,725	14,976
32	16,885	11,199	12,487	-5,6863	-4,4539	11,019	13,728	14,975
33	16,988	11,299	12,577	-5,6889	-4,4561	11,121	13,73	14,975
34	17,091	11,399	12,669	-5,6921	-4,4588	11,223	13,732	14,975
35	17,176	11,499	12,762	-5,6962	-4,4622	11,324	13,733	14,975
36	17,301	11,599	12,857	-5,7013	-4,4665	11,424	13,734	14,975
37	17,407	11,699	12,953	-5,7076	-4,4718	11,523	13,735	14,975
38	17,515	11,799	13,051	-5,7154	-4,4785	11,622	13,735	14,975
39	17,624	11,899	13,149	-5,725	-4,4868	11,72	13,735	14,975
40	17,736	11,999	13,248	-5,7366	-4,497	11,818	13,734	14,975
41	17,85	12,099	13,348	-5,7507	-4,5097	11,915	13,733	14,975
42	17,967	12,199	13,447	-5,7674	-4,5253	12,011	13,732	14,975
43	18,087	12,299	13,547	-5,7872	-4,5445	12,106	13,731	14,975
44	18,21	12,399	13,645	-5,8103	-4,5684	12,201	13,731	14,975
45	18,336	12,499	13,741	-5,8368	-4,5982	12,296	13,732	14,974
46	18,466	12,599	13,833	-5,867	-4,6356	12,392	13,735	14,974
47	18,6	12,699	13,919	-5,9007	-4,683	12,491	13,741	14,973
48	18,738	12,799	13,996	-5,9381	-4,7427	12,594	13,75	14,972
49	18,879	12,899	14,064	-5,9793	-4,8116	12,705	13,774	14,97

T/r	lgG	lgP	lgN	lgτp	lgτn	lgN0	lgN1	lgN2
50	19,024	12,999	14,12	-6,0242	-4,9048	12,825	13,804	14,968
51	19,172	13,099	14,167	-6,0727	-4,9965	12,956	13,844	14,964
52	19,324	13,199	14,206	-6,1245	-5,1187	13,095	13,891	14,958
53	19,478	13,299	14,242	-6,1788	-5,2072	13,241	13,935	14,951
54	19,634	13,399	14,35	-6,2346	-5,2644	13,388	13,955	14,942
55	19,79	13,499	14,387	-6,2906	-5,3334	13,5	13,95	14,931
56	19,935	13,599	14,541	-6,3356	-5,3741	13,57	13,975	14,922
57	20,075	13,699	14,682	-6,3757	-5,3931	13,588	13,993	14,935
58	20,216	13,799	14,789	-6,4164	-5,4272	13,606	13,956	14,938
59	20,356	13,899	14,882	-6,4567	-5,4745	13,649	13,948	14,937
60	20,495	13,999	14,967	-6,4959	-5,5279	13,765	13,9613	14,9293
61	20,633	14,099	15,049	-6,5334	-5,584	13,829	13,9738	14,9233
62	20,768	14,199	15,128	-6,5689	-5,6406	13,89	13,9879	14,9163
63	20,902	14,299	15,205	-6,6022	-5,6966	13,951	14,0026	14,9083
64	21,032	14,399	15,281	-6,6331	-5,7511	14,0099	14,0173	14,8994
65	21,161	14,499	15,357	-6,6615	-5,8035	14,066	14,0316	14,8896
66	21,287	14,599	15,433	-6,6873	-5,8533	14,119	14,0451	14,8791
67	21,41	14,699	15,51	-6,7106	-5,9002	14,1687	14,0576	14,868
68	21,531	14,799	15,587	-6,7313	-5,9439	14,2148	14,0689	14,8563
69	21,649	14,899	15,665	-6,7495	-5,9841	14,2571	14,0789	14,8444
70	21,765	14,999	15,744	-6,7654	-6,0207	14,295	14,087	14,832
71	21,878	15,099	15,825	-6,7789	-6,0536	14,329	14,095	14,82
72	21,99	15,199	15,907	-6,7904	-6,0828	14,36	14,101	14,808
73	22,099	15,299	15,991	-6,8	-6,1084	14,387	14,106	14,797
74	22,207	15,399	16,077	-6,8079	-6,1305	14,41	14,11	14,787

T/r	lgG	lgP	lgN	lgτp	lgτn	lgN0	lgN1	lgN2
75	22,314	15,499	16,164	-6,8144	-6,1474	14,429	14,113	14,778
76	22,419	15,599	16,254	-6,8179	-6,1654	14,446	14,116	14,77
77	22,523	15,699	16,345	-6,8239	-6,1787	14,46	14,118	14,763
78	22,627	15,799	16,437	-6,8273	-6,1898	14,471	14,119	14,757
79	22,729	15,899	16,53	-6,8301	-6,1989	14,481	14,12	14,751
80	22,832	15,999	16,625	-6,8322	-6,2064	14,489	14,121	14,747
81	22,933	16,099	16,721	-6,8339	-6,2124	14,495	14,122	14,743
82	23,035	16,199	16,817	-6,8353	-6,2174	14,5	14,122	14,74
83	23,136	16,299	16,914	-6,8364	-6,2213	14,504	14,123	14,738
84	23,237	16,399	17,012	-6,8373	-6,2245	14,507	14,123	14,736
85	23,337	16,499	17,11	-6,838	-6,2271	14,51	14,123	14,734
86	23,438	16,599	17,209	-6,8385	-6,2291	14,512	14,123	14,733
87	23,538	16,699	17,308	-6,8389	-6,2307	14,514	14,123	14,732
88	23,639	16,799	17,407	-6,8393	-6,2321	14,515	14,124	14,731
89	23,739	16,899	17,506	-6,8395	-6,2331	14,516	14,124	14,73
90	23,839	16,999	17,605	-6,8398	-6,2339	14,517	14,124	14,73
91	23,939	17,099	17,705	-6,8399	-6,2346	14,518	14,124	14,729
92	24,039	17,199	17,804	-6,8401	-6,2351	14,518	14,124	14,729
93	24,14	17,299	17,904	-6,8402	-6,2355	14,519	14,124	14,729
94	24,24	17,399	18,004	-6,8403	-6,2359	14,519	14,124	14,728
95	24,34	17,499	18,104	-6,8403	-6,2361	14,52	14,124	14,728
96	24,44	17,599	18,203	-6,8404	-6,2363	14,52	14,124	14,728
97	24,54	17,699	18,303	-6,8404	-6,2365	14,52	14,124	14,728
98	24,64	17,799	18,403	-6,8405	-6,2366	14,52	14,124	14,728
99	24,74	17,899	18,503	-6,8405	-6,2368	14,52	14,124	14,728

