

O'ZBEKISTON REPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM
VAZIRLIGI
NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI

Qo'lyozma huquqida

UDK 621.315.592; 537.311.322.

XOLMIRZAEV OYBEK TO'RAMIRZAEVICH

**AMORF YARIMO'TKAZGICHLARNING NUQSONLARDA YUTILISH
KOEFFITSIENTI SPEKTRAL XARAKTERISTIKASI**

5A140202 – Fizika (yo'nalishlar bo'yicha)

ixtisosligi bo'yicha magistir
akademik darajasini olish uchun yozilgan

D I S S E R T A T S I Y A

Ilmiy rahbar:
fiz.-mat.fanlari nomzodi,
dots. R.G'.IKRAMOV

NAMANGAN-2014

MUNDARIJA

	Bet
KIRISH	3
1 BOB. ADABIYOTLAR TAHLILI. AMORF GIDROGENIZATSIYALANGAN KREMNIYNING NUQSONLARDA YUTILISH KOEFFITSIENTI.....	8
1.1. $a - Si:H$ dagi uzilgan bog'lanishlar hosil qiladigan elektron holatlar zichligi taqsimoti funktsiyasi va nuqsonlarda yutilish spektrlari	12
Ilmiy tadqiqot masalasining qo'yilishi.....	17
2 BOB AMORF YARIM O'TKAZGICHLARDAGI NUqSONLAR VA OPTIK YUTILISH KOEFFITSIENTINI XISSOBLASH.....	19
2.1. Amorf yarimo'tkazgichlardagi nuqsonlarni turlari va ularni energetik o'rni.....	19
2.2. Kubo-Grenvid formulasi va Devis-Mott yaqinlashish usuli.....	24
2.3. Girogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlardagi elektron xolatlar turlari va zichligini taqsimotlari.....	25
2.4. Girogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarda elektronlarni optik o'tish mexanizmlari va turlari.....	31
3 BOB. NUQSONLARDAGI ELEKTRON HOLATLARI ISHTIROK ETUVCHI OPTIK O'TISHLARGA XOS BO'LGAN YUTILISH KOEFFITSIENTINI SPEKTRLARI.....	41
3.1. Fotonlarni nuqsonlararo yutilishlari.....	41

3.2. Bitta holat nuqsonlarda, ikkinchi holat ruxsat etilgan zonalarining dumlarida bo'lgan holdagi yutilishlar	46
3.3. Fotonlarning nuqsonlardagi va ruxsat etilgan zonalaridagi elektron holatlari orasidagi yutilishlari.....	51
3.4. Nuqsonlardagi elektron holatlar ishtirokidagi yutilish koeffitsienti spektrlarining ruxsat etilgan zonalaridagi elektron holatlar zichliklari funktsiyalari ko'rinishlariga bog'liqligi	56
3 bob uchun xulosalar	60
OLINGAN ASOSIY XULOSA VA NATIJALAR	61
E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI	62
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI	64

KIRISH

Mavzuning dolzarbligi. Psevdolegirlangan gidrogenizatsiyalangan amorf kremniy ($a-Si:H$) nokristall yarimo'tkazgichli material bo'lib, katta yuzali quyosh elementlarini, metallnitrid oksidli yarimo'tkazgich struktura larga nisbatan yaxshi elektr dasturlanuvchi o'chmaydigan xotira elementlarini, tasvir uzatish qurilmasi uchun nishonlarni tayyorlashda, ilmiy va amaliy qiziqish uyg'otadi [1]. Psevdolegirlangan $a-Si:H$ qatlamlarini olish-ning texnologik rejim parametrlarini o'zgartirilishi hisobiga, uning optik va elektr xossalari keng sohada o'zgarishi mumkin. Bu material odatdagi kremniy olish texnologiyalarining yaxshi moslashuvchanligi, integral sxemalar kabi amorf va kristall kremniyni o'zida mujassamlashtirgan asbob hamda qurilmalar tayyorlash texnologiyasi uchun zamin bo'ladi. Ammo ular asosidagi qurilmalarni amalda qo'llash qiyin chunki, $a-Si:H$ qatlamlarni olish texnologiyasiga sezgir parametrlarni (harakatchanlik tirqishi kengligi, nuqsonlarni holat zichligi, vodorodni kontsentratsiyasini o'zga-rishi va boshqalar) tanlash imkoniyati ko'p va bu parametrlarni boshqarish usuli yo'q. Gidrogenizatsiyalangan kremniy asosida tayyorlangan yarimo'tkazgichli qurilmalarni xarakteristikalarini asosan, zona va zona dumlari orasidagi o'tish jarayonlarning o'ziga xos xususiyatlari bilan aniqlanadi. SHuning uchun tadqiqotchilarning diqqat e'tibori $a-Si:H$ ni optik va elektr xossalarini o'rganishga qaratilgan. SHu qatori optik o'tishlarda qatnasha-digan elektronlarning holat zichligini bilish, yorug'likni yutilish koef-fitsientini spektral xarakteristikalarini aniqlash imkonini beradi. Optik yutilish koefitsienti spektral xarakteristikasini tadqiq qilish bilan $a-Si:H$ ni fotoelektrik xarakteristikalarini barqarorligini tahlil qilish va elektronlarning holatlar zichligini aniqlash mumkin.

Nuqsonlarda yorug'likni yutilish koefitsienti spektrlarining, uzilgan bog'lanishlardagi (nuqsonlardagi) elektron holatlari zichligini taqsimot funksiyalariga bog'liqligi masalasi ham ochiqlicha qolmoqda. SHunday qilib, $a-Si:H$ pardalarining optik yutilish koefitsienti spektral xarakteristikalarini bilan

uzilgan bog'lanishlardagi elektron holatlari orasidagi bog'liqlikni aniqlash, amorf yarimo'tkazgichlar fizikasi va optikasining bu sohadagi **dolzarb masalalaridan** biridir.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Hozirgi vaqtda gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning harakatchanlik tirqishida joylashgan elektron holatlari zichligini taqsimoti uchun turli modellar taklif qilingan [2, 3]. Bu modellarda, ruxsat etilgan zonalarining dumlaridagi lokallashgan elektron holatlarining energiyaga bog'lanishi eksponentsial ko'rinishga ega. Urbax, YAmasaki, Kulik, Brodskiy va Andreevlarning ishlarida [4, 5], elektronlarni lokallashgan holatlar ishtirokidagi optik o'tishlarning spektrlari uchun, lokallashgan elektron holatlar orasidagi optik o'tishlar bilan birga, lokallashgan va lokal-lashmagan holatlararo o'tishlarni mavjudligi, hamda nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirok etuvchi o'tishlar ham yuz berishi hisobga olinmagan.

Ma'lumki, uzilgan bog'lanishlar hosil qiladigan elektron holatlari zichligi taqsimotining energiyaga bog'lanishini Gauss taqsimot funksiyasi ko'rinishida yoziladi. SHuning uchun hozirgacha nuqsonlarda yutilish koeffitsienti spektrlari uchun aniq analitik echim olinmagan. Bu masalani Gauss taqsimoti o'rniga giperbolik funtsiyani qo'llash yordamida hal qilish mumkinligi, nuqsonlardagi elektron holatlarni aniqlash imkonini beradi.

Dissertatsiya ishining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi 2011-2016 yillarga mo'ljallangan OT-F2-28. "Legirlangan kremniy sirti va hajmidagi kvant o'lchamli effektlar hamda ularning $p - n$ – strukturalardagi zaryad tashuvchilar fotogeneratsiyasi va rekombinatsiyasi jarayonlariga ta'siri" mavzuidagi davlat grantiga bevosita bog'liq holda olib borilgan.

Tadqiqot maqsadi: uzilgan bog'lanishlardagi elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlar uchun yutilish koeffitsientining spektrlarini hosil bo'lish jarayonlarini nazariy izohlash.

Tadqiqot vazifalari: struktura to'ridagi uzilgan bog'lanishlardagi elektron holatlari ishti-rokidagi optik o'tishlar uchun yutilish ko'effitsienti spektral xarakteristikalarini aniqlash (nuqsonlarda yutilish spektrlari) va psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ amorf kremniy nuqsonlarida yutilish spektrlarini nazariy ifodalaridan va tajribalardan olingan natijalarini solishtirish.

Tadqiqot obekti va predmeti. Ilmiy ishning obekti psevdolegirlangan gidrogenizatsiyalangan amorf kremniy ($a\text{-Si:H}$)dan iborat. Tadqiqotning predmeti yorug'lik yutilishi jarayonlarining xususiyatlari va ular spektrini psevdolegirlangan gidrogenizatsiyalashtirilgan amorf kremniy qatlamlarida shakllanishi.

Tadqiqot metodlari: xolat zichligi matritsasi usuli, Devis-Mott yaqinlashish usulida Kubo-Grinvud formulasidan foydalanish, taqribiy hisoblash usuli va kompyuter grafikasi usuli.

Tadqiqotning ilmiy farazi optik yutilish ko'effitsienti spektral xarakteristikasini uzilgan bog'lanishlardagi elektron holatlari taqsimotlariga bog'liq bo'lishiga asoslanadi.

Himoyaga olib chiqilayotgan asosiy holatlar:

1. Psevdolegirlangan gidrogenizatsiyalangan amorf kremniy ($a\text{-Si:H}$) qatlamlarida Devis – Mott yaqinlashish usuli bilan Kubo-Grinvud formulasini yutilgan fotonlarni energiyasi va elektronlarni optik o'tish turlariga mos komponentalarga ajratib mukammallashtirish natija-sida olingan yorug'likning yutilish ko'effitsienti.
2. Zonalararo yutilish ko'effitsienti spektrlarida maksimumlar yuzaga kelishining ruxsat etilgan zonalarining elektron holatlari zichligi taqsimotiga bog'liqligini tushuntiruvchi mexanizmi.
3. $a\text{-Si:H}$ ning nuqsonlarda yutilish ko'effitsienti spektrlarini struktura to'ridagi uzilgan bog'lanishlar va ruxsat etilgan zonalaridagi holatlar orasidagi optik o'tishlar bilan aniqlanish usuli.

Ilmiy yangiligi:

1. $a-Si:H$ pardalarida optik yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikasi uchun Kubo-Grinvud formulasini Devis-Mott yaqinlashish usulida hisoblashda, bu formuladagi integralni yutilgan fotonlarni energiyasi va elektronlarni optik o'tish turlariga moslashtirib ajratib olish kerakligi ko'rsatildi.
2. $a-Si:H$ qatlamlarining struktura to'ridagi uzilgan bog'lanishlar hosil qiluvchi elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlar uchun yutilish koeffitsienti spektrlari olingan va bu spektrlar ruxsat etilgan zonalaridagi lokallashtirilmagan elektron xolatlar taqsimoti funktsiyasi bilan aniqlanishi ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati:

- Dissertatsiya ishida olingan natija va xulosalar amorf yarimo'tkazgichlarga xos bo'lgan barcha elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlar bilan yutilish koeffitsientining spektri orasidagi bog'lanishlar haqidagi tasavvurlarni kengaytirishga yordam beradi.
- $a-Si:H$ amorf yarimo'tkazgichlarda ruxsat etilgan zonalar, ularni dumlari va nuqsonlardagi elektron holatlar ishtirokidagi optik o'tishlarda yorug'likni yutilishi uchun taklif qilingan nazariya, fotoelektrik parametrlari barqarorlashgan yarimo'tkazgichli strukturalar yaratish imkonini beradi.

Natijalarning joriy qilinishi:

- amorf yarimo'tkazgichlarning yutilish koeffitsientini hisoblash va bu hisoblashlardan olinadigan natijalar zarur bo'ladigan fizik va ishlab chiqarish laboratoriyalarida;
- psevdolegirlangan $a-Si:H$ asosida tayyorlangan optoelektronika qurilmalarining optik va fotoelektrik parametrlarini optimallashtirish-da va chidamliligini orttirishda;
- oliy ta'lim muassasalaridagi talabalar, magistrlar va aspirantlarga yarimo'tkazgichlarning optik xossalarini o'qitishda foydalanish mumkin.

Ishning sinovdan o'tishi: dissertatsiya ishining asosiy natijalari Namangan davlat universitetidagi ilmiy seminarlarda, hamda xalqaro va respublika miqyosidagi konferentsiyalarida ma'ruza qilindi va muhokamadan o'tkazildi:

“Zamonaviy fizikaning dolzarb muammolari” respublika ilmiy-nazariy anjumani. Termiz, 2013; “Yarimo’tkazgichlar fizikasi va qurilmalari hamda ularni o’qitishning muammolari” hududiy ilmiy anjumani. Namangan, 2013; Obrazovaniya maksimumov v spektrax defektnogo poglosheniya amorfnykh poluprovodnikov. IV mejdunarodnaya konferentsiya po aktualnim problemam molekulyarnoy spektroskopii kondensirovannykh sred, Samarkand, 2013; “Kondensatsiyalangan muhitlar fizikasi va materialshunoslikning dolzarb masalalari” Respublika ilmiy – amaliy anjumani, Farg’ona, 2014.

Natijalarning e’lon qilinganligi. Dissertatsiya ishining natija-lari bo’yicha 6 ta ilmiy ishlar chop ettirilgan bo’lib, ulardan 1 tasi respublika jurnallarida, qolganlari xalqaro va respublika konferentsiya materiallarida.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya ishi 6 betda bayon qilingan, 18 ta rasm, kirish, uchta bob, xulosa va 31 ta foydalanilgan adabiyotlar ro’yxatidan tashkil topgan.

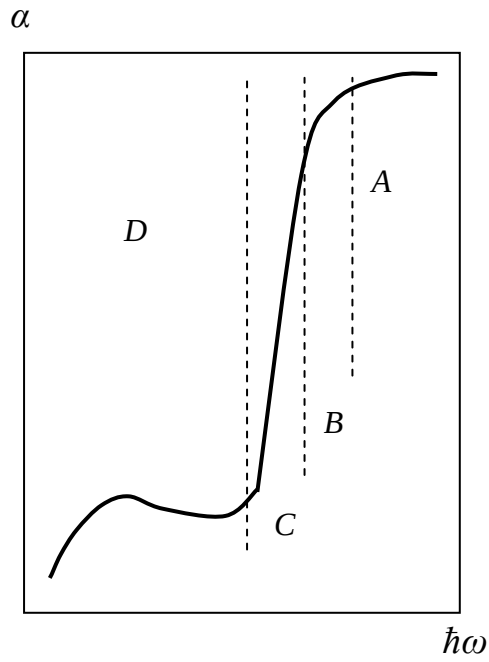
1 BOB. ADABIYOTLAR TAHLILI. AMORF GIDROGENIZATSIYALANGAN KREMNIYNING NU_qSONLARDA YUTILISH KOEFFITSIENTI

Ma'lumki, gidrogenizatsiyalangan amrof kremniyning ($a - Si:H$) optik yutilish ko'effitsientini, yutilgan fotonlarning energiyasiga bog'lanishini sxematik ko'rinishda 1.1-rasmdagi kabi to'rtta sohaga ajratish mumkin [6, 7].

A soha – yutilgan fotonlarni energiyasi harakatchanlik tirqishining (taqiq zona) energetik kengligidan (E_g) ancha katta bo'lib, ular asosan elektronlarni valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasiga oladi (fundamental yutilish sohasi). Bu sohada uzilgan bog'lanishlar, legirlovchi kirishmalar va ruxsat etilgan zonalarni davomida («dum»lari) yotuvchi elektron holatlar ishtirokidagi optik o'tishlar bilan aniqlanadigan yutilish ko'effitsientining qiymatlari, ruxsat etilgan zonalararo o'tishlarnikiga nisbatan juda kichik bo'ladi. Fundamental yutilish sohasining spektral xarakteris-tikasidan foydalanib, elektronlarni vertikal o'tishlari (1.2-rasm) uchun harakatchanlik tirqishining optik kengligi aniqlanadi [7].

Fundamental yutilish sohasining chegarasi deb nomlanuvchi B-sohada ham yutilgan fotonlarni energiyalari harakatchanlik tirqishining energetik kengligidan kichik bo'lmaganligi uchun yutilish ko'effitsientini spektrlari kristall yarimo'tkazgichlarnikiga o'xshash bo'ladi [8, 9].

Spektrlarni, yutilgan fotonlar energiyasi harakatchanlik tirqishi-ning energetik kengligidan kichik bo'ladigan C-sohasida asosiy rolni, ruxsat etilgan zonalarning dumlaridagi holatlararo optik o'tishlar o'ynaydi. Bu sohada biri lokallashgan, ikkinchisi esa lokallashmagan holatlar orasidagi optik o'tishlar bilan aniqlanadigan yutilish ko'effitsientining qiymatlari, lokallashgan holatlararo o'tishlarnikiga nisbatan kichik bo'ladi.



1.1-rasm. Amorfl yarimo'tkazgichlarning optik yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikalarining sxematik ko'rinishi. A-fundamental yutilish sohasi. B-fundamental yutilish sohasi chegarasi. C-eksponentsial yutilish sohasi. D-nuqsonlarda yutilish sohasi. [6, 7]

Nuqsonlarda yutilish sohasi deb nomlanuvchi D -sohada yutilish koef-fitsientining qiymatlarini nuqsonlarning energetik o'rnini va kontsentratsiyasi aniqlaydi. Chunki bu sohada yutilgan fotonlarni energiyasi kichik bo'lganligi uchun ($a\text{-Si:H}$ uchun $\hbar\omega < 1.4 \text{ eV}$), nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlar asosiy rolni o'ynaydi. SHuning uchun elektronlarni boshqa turdagi optik o'tishlari bilan aniqlanadigan yutilish koef-fitsientining qiymatlarini hisobga olmaslik mumkin bo'ladi va undan nuqsonlarni kontsentratsiyasi aniqlanadi [10,11].

Yuqoridagi mulohazalardan ko'rinadiki, gidrogenizatsiyalangan amorf kremniyning nuqsonlarda yutilish koef-fitsienti spektral xarakteristikasini aniqlovchi elektron holatlari zichligi taqsimoti asosan uch xil bo'ladi:

- 1) ruxsat etilgan zonalaridagi lokallashmagan elektron holatlari;
- 2) ruxsat etilgan zonalaridagi dumlaridagi lokallashgan elektron holatlari;
- 3) energetik o'rnini harakatchanlik tirgishida joylashgan uzilgan bog'lanish-lardagi elektron holatlari.

Bu nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirokidagi elektronlarni o'tishlari quyidagi turlarga ajraladi:

- 1) nuqsonlar va lokallashmagan holatlar orasidagi optik o'tishlar;
- 2) nuqsonlar va lokallashgan holatlar orasidagi optik o'tishlar;
- 3) nuqsonlardagi holatlararo optik o'tishlar.

$a - \text{Si:H}$ qatlamlaridagi nuqsonlar va legirlovchi kirishmalar hosil qiluvchi elektron holatlar ishtirokidagi optik o'tishlarning spektrlari ko'rib chiqiladi. Nuqsonlardagi elektron holatlari zichligini taqsimot funksiyalari tahlil qilinadi.

Bobning oxirida, $a\text{-Si:H}$ qatlamlari uchun adabiyotlarda keltirilgan nuqsonlarda yutilish koef-fitsienti spektral xarakteristikasi va bu materialga xos bo'lgan elektron holatlari zichligi taqsimotlari orasidagi bog'lanishlarni nazariy tahlili natijalaridan kelib chiqadigan xulosalar asosida, ushbu dissertatsiya ishida olib boriladigan ilmiy tadqiqot ishining maqsad va vazifalari belgilanadi.

1.1. $a - Si:H$ dagi uzilgan bog'lanishlar hosil qiladigan elektron holatlar zichligi taqsimoti funktsiyasi va nuqsonlarda yutilish spektrlari

Bu ishda shu soha uchun Kubo-Grinvud formulasini Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra umumiy ko'rinishi uchun

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^4 e^2 \hbar^2 a}{n_0 (m^*)^2 c \varepsilon_A} \int_{\varepsilon_A}^{\infty} g(\varepsilon - \hbar\omega) \cdot g(\varepsilon) (f(\varepsilon - \hbar\omega) - f(\varepsilon)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \quad (1.1)$$

yozilgan. Bu erda $f(\varepsilon) = \exp\left(-\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right)$ - Boltsman taqsimoti. Hisoblashlarni soddalashtirish maqsadida ruxsat etilgan zonalarning chegarasidagi elektron holatlari zichligini taqsimoti chiziqli bo'ladi deb, uni quyidagi

Ma'lumki, kristall yarimo'tkazgichlarda legirlash uchun kiritilgan kirishmalar va ularni o'stirish paytida hosil bo'ladigan nuqsonlar hosil qiluvchi elektron holatlari zichligi taqsimotini Dirakning delta funktsiyasi orqali ifodalanadi [12]. Agar o'rganilayotgan namuna amorf bo'lsa, u xolda [13-15] ishlarda ko'rsatilishicha, harakatchanlik tirqishida joylashgan nuqsonlar hosil qiladigan sathlardagi elektron holatlari zichligi funktsiyasini energiyaga bog'lanishini Gauss taqsimot funktsiyasi ko'rinishi-da ifodalash mumkinligi ko'rsatilgan.

$$g(\varepsilon) = g(\varepsilon_D) \exp\left(-a(\varepsilon - \varepsilon_D)^2\right). \quad (1.2)$$

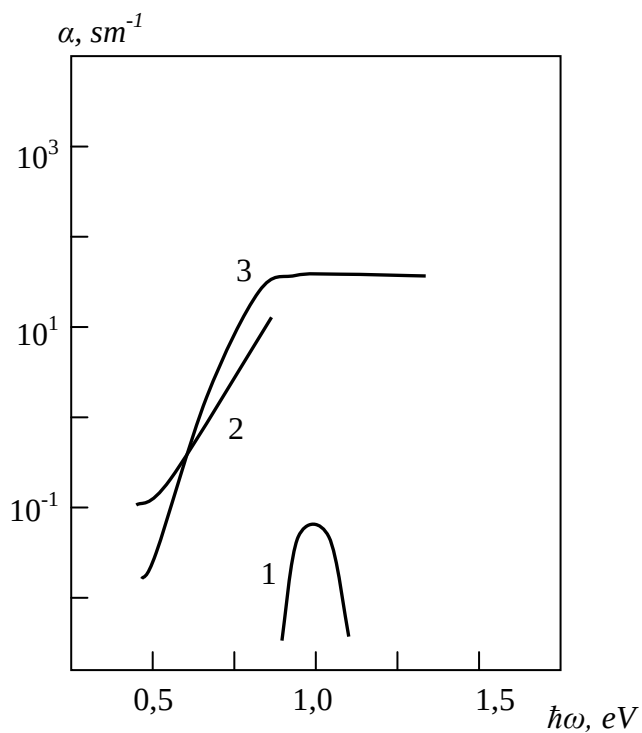
Bu erda ε_D – nuqsonlardagi elektron holatlari taqsimoti maksimumining energetik o'rni, $g(\varepsilon_D)$ – holatlar zichligi taqsimotining maksimal qiymati.

[14] ishda gidrogenizatsiyalangan amorf kremniydagi uzilgan bog'lanishlardagi elektron holatlari ishtirokidagi elektronlarni optik o'tishlari uchun yutilish koeffitsientini spektrlarini Kubo-Grinvud formulasidan Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra hisob-langani. Ma'lumki, Gauss taqsimot funktsiyasining integralini analitik ko'rinishda olish mumkin emas. SHuning uchun ushbu ishda natijalar integ-ralni taqribiy hisoblash usullaridan foydalanib olingan. 1.2-rasmda shu ishda olingan hisoblash natijalari keltirilgan. 1-

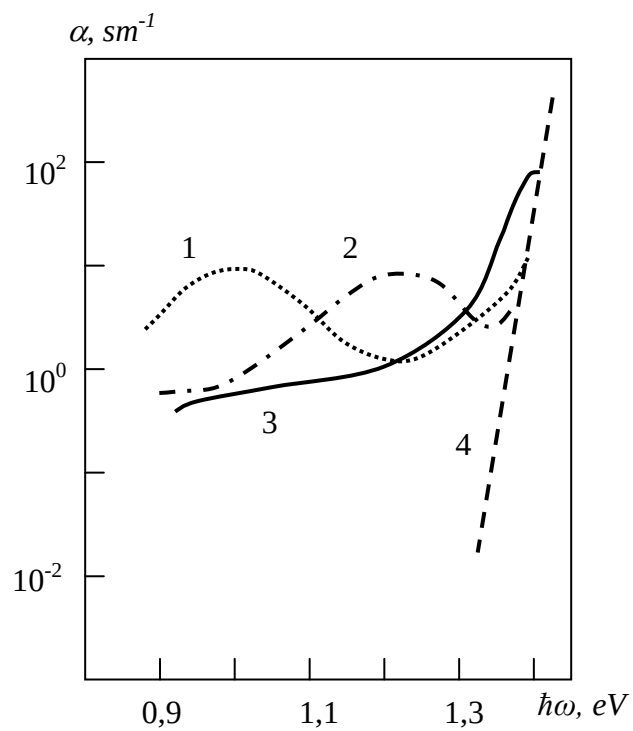
nuqsonlararo yutilishlar. 2-nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalarining dumlaridagi holatlar ishtirokidagi yutilishlar. 3-nuqsonlar va ruxsat etilgan zonadagi lokallashmagan holatlar ishtirokidagi yutilishlar. Undan ko'rinadiki, nuqsonlarda optik yutilish koeffitsientining qiymatini asosan 3-tur optik o'tishlar o'ynar ekan. Aytish mumkinki, ular ham tajriba natijalarini to'liq tushuntira olmadi. Chunki bu natijalardan nuqsonlarda yutilish spektrlarida: birinchidan, maksimumlarni hosil bo'lish shartlari kelib chiqmaydi, ikkinchidan, hisoblashlar nuqsonlarning energetik o'rnini va kontsentratsiyasini o'zgarishi, spektrlarning ko'rinishiga ta'sir qilmasligini ko'rsatadi. 1.3-rasmda [14-16] ishlarda olingan tajriba natijalari keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, ba'zi namunalarda aniq maksimum hosil bo'lar ekan. Muallifni [13, 17] ishlarida nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi funktsiyasini aniqlovchi Gauss taqsimoti funktsiyasi o'rniga giperbolik sekans ko'rinishidagi taqsimot funktsiyasini qo'llash mumkinligi ko'rsatilgan va uni quyidagi ko'rinishda yozilgan

$$g(\varepsilon) = g(\varepsilon_D) \frac{1}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))}. \quad (1.3)$$

Bu taqsimotdan foydalanib, nuqsonlardagi holatlar ishtirokidagi elektronlarni optik o'tishlarining yuqorida keltirilgan uchta turi uchun yutilish koeffitsientining spektral xarakteristikasini analitik echimlari keltirilgan.



1.2-rasm. Psevdolegirlangan gidrogenizatsiyalangan amorf kremniydagi nuqsonlar hosil qiluvchi elektron holatlari Gauss taqsimoti ko'rinishda bo'lganda yutilish koeffitsienti spektrlari. 1-nuqsonlararo, 2-nuqsonlar va lokallashgan holatlararo, 3-nuqsonlar va lokallashmagan holatlararo [14].



1.3-rasm. Psevdolegirlangan gidrogenizatsiyalangan amorf kremniy pardalarining (1), (2), (3) nuqsonlarda yutilish spektrlari va (4) lokallashgan holatlararo yutilish spektri [14,15].

1. Nuqsonlararo yutilishlar uchun

$$\alpha = C \cdot \left(\ln \frac{\exp(b(2\varepsilon_{11} + \hbar\omega - (\varepsilon_{D1} - \varepsilon_{D2}))) + \exp(-b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))}{\exp(b(2\varepsilon_{11} + \hbar\omega - (\varepsilon_{D1} - \varepsilon_{D2}))) + \exp(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))} - \ln \frac{\exp(b(2(\varepsilon_{11} - \hbar\omega) + \hbar\omega - (\varepsilon_{D1} + \varepsilon_{D2}))) + \exp(-b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))}{\exp(b(2(\varepsilon_{11} - \hbar\omega) + \hbar\omega - (\varepsilon_{D1} - \varepsilon_{D2}))) + \exp(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))} \right), \quad (1.4)$$

bu erda $C = \frac{g(\varepsilon_{D1})g(\varepsilon_{D2})}{\beta\hbar\omega \text{Sh}(\beta(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))}$ ga teng.

2. Nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga yutilishlar uchun

$$\alpha = \frac{g(\varepsilon_D)N(\varepsilon_C)}{\beta\hbar\omega} \exp(\beta(\hbar\omega + \varepsilon_D - \varepsilon_C)) \cdot \ln \frac{\exp(2\beta(\varepsilon_{21} - \varepsilon_D)) + 1}{\exp(2\beta(\varepsilon_{21} - \varepsilon_D - \hbar\omega)) + 1}. \quad (1.5)$$

3. Nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasiga yutilishlar uchun

$$\alpha = \frac{g(\varepsilon_D)N(\varepsilon_C)}{E_g\hbar\omega} \cdot \frac{2(\varepsilon_D - \varepsilon_V + \hbar\omega)}{\beta_2} [\arctg(\exp(\beta_2(\varepsilon_C - \varepsilon_D))) - \arctg(\exp(\beta_2(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar\omega)))] - \frac{g(\varepsilon_D)N(\varepsilon_C)}{2\beta_1 E_g\hbar\omega} [\exp(-\beta_1(\varepsilon_C - \varepsilon_D)^2) - \exp(-\beta_1(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar\omega)^2)] \quad (1.7)$$

ifodalarni olingan. SHularni ta'kidlash lozimki, bu formulalarni kelti-rib chiqarishda (1.1) formuladagi integraldan tashqarida turgan o'zgarmaslar hisobga olinmagan. (1.6) formulani keltirib chiqarishda ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlar zichligini energiyaga bog'lanishi chiziqli bo'ladi deb faraz qilingan. Aslida bu elektron holatlar zichligi taqsimoti turli xil ko'rinishlarga ega bo'lishi mumkin. (1.4)÷(1.6) formulalar yordamida hisoblangan yutilish koeffitsienti spektrlarining ko'rinishi ham 1.8-rasmdagidan farq qilmagan. Bularni solishtirishdan Gauss taqsimot funktsiyasi bilan aniqlanadigan kattaliklarni hisoblashda, uni o'rniga giperbolik sekans funktsiyasini ishlatish mumkin ekanligi ko'rsatilgan.

Mualliflar [17,18] ishlarda ham, olib borilgan izlanishlar natija-sida psevdolegirlangan $a-Si:H$ qatlamlarida 1.4-rasmdagi nuqsonlarda yutilish koeffitsienti spektrlarining farqli jihatlarini tajriba nati-jalariga asoslangan holda, materialdagi uzilgan bog'lanishlarni zaryadining holatlari o'zgarishi bilan

tushuntirishga harakat qilingan. Ammo bu natijalarni nazariy echimi haqida aytib o'tilmagan.

Yuqoridagilar amorf yarimo'tkazgichlarning optik yutilish koeffitsienti spektrlarining nuqsonlarda yutilish sohasi va bu materialdagi elektron holatlari taqsimoti orasidagi bog'lanishlarni tadqiq qilish, hozirgi vaqtda ham katta ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatadi.

Ilmiy tadqiqot masalasining qo'yilishi

Amorf yarimo'tkazgichlarning optik yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikasi, bu materialdagi elektron holatlari taqsimotining tur-lari va ko'rinishlariga juda kuchli bog'liqligi haqidagi adabiyotlar tahlilidan, bu bog'lanishlarni aniqlash borasida juda katta ishlar qilinganligiga qaramasdan, bu sohani ilmiy jihatdan to'liq o'rganilmaganligi kelib chiqdi. Ayniqsa, gidrogenizatsiyalangan amorf kremniy pardalari bunga yaqqol misol bo'ladi. Bu materialning optik yutilish koeffitsientini spektral xarakteristikasi uchun olingan tajriba natijalarining nazariy echimlari juda ko'p. Ammo, ular asosida tajriba natijalarining ayrim qismlarigina o'z izohini topgan. Ko'p hollarda, tajriba natijalariga asoslanib empirik usullar bilan spektrlar aniqlangan. Chunki, analitik usulda olingan ifodalarning echimlari, tajriba natijalarini tushintira olmaydi. Bundan tashqari ayrim formulalarda shunday fizik kattaliklar borki ularni bevosita aniqlash amaliyoti yo'lga qo'yilmagan.

SHuning uchun ushbu dissertatsiya ishining bosh maqsadi, ruxsat etilgan zonalaridagi, shu zonalarining eksponentsial dumlaridagi, hamda uzilgan bog'lanishlardagi elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlar uchun yutilish koeffitsientining spektrlarini hosil bo'lish jarayonlarini nazariy izohlash.

Aynan psevdolegirlangan $a - Si:H$ namunalarini tanlanishiga sabab, birinchidan, bu material hozirgi vaqtda gidrogenizatsiyalangan yarimo'tkazgichlarni asosiy modelidir. Ikkinchidan, ularda legirlovchi kirishmalarni

bo'lmasligi, yani olingan natijalar faqat struktura turidagi elektron holatlari bilan aniqlanishidir.

Shuni ta'kidlamoq kerakki, psevdolegirlangan $a - Si:H$ namunalari bilan boshqa amorf yarimo'tkazgichlarning optik yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikalarini bir-biridan katta farq qilmasligini hisobga olinsa, bu ishda olingan natijalardan, albatta, barcha amorf yarimo'tkazgichlarda ham foydalanish mumkin.

Dissertatsiya ishining maqsadidan kelib chiqib quyidagi vazifalarini hal qilish ko'zda tutilgan:

1. Nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlarda yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikalarini keltirib chiqarish. Ularni lokallashgan va lokallashmagan elektron holatlari taqsimotiga bog'lanishlarini tadqiq qilish.

2. Nuqsonlarda yutilish koeffitsienti spektrlarida maksimumlarning hosil bo'lish tabiatini aniqlash va tahlil qilish.

2-BOB. AMORF YARIMO'TKAZGICHLARDAGI NUQSONLAR VA OPTIK YUTILISH KOEFFITSIENTINI HISOBLASH

Bobning birinchi bo'limi fotonlarni nuqsonlararo yutilishlariga bag'ishlangan. Unda yutilish koefitsientining qiymatlarini nuqsonlarni energetik o'rni va ulardagi elektron holatlari zichligi taqsimotiga bog'lanishini tadqiq qilishga bag'ishlanadi.

2.2. bo'limda Kubo-Grinvud formulasi va Devis-Mott yaqinlashish usuli bilan elektronlarni optik o'tishlarini aniqlovchi spektral xarakteristikasini hisoblash o'rganiladi. Yutilish koefitsienti spektrlarini (nuqsonlarda yutilish koefitsienti spektrlari) ruxsat etilgan zonalarining eksponentsial «dumlari»ni egriligi, nuqsonlarni energetik o'rni va ulardagi elektron holatlariga bog'lanishlari tadqiq qilinadi.

2.3 bo'limda nuqsonlar va lokallashmagan holatlar orasidagi elektron o'tishlari qarab chiqiladi. Bu tur yutilishlar bilan aniqlanadigan yutilish koefitsienti spektral xarakteristikalarini ruxsat etilgan zonalaridagi holatlar zichligi taqsimotiga bog'lanishlarining ifodalari aniqlanadi va tahlil qilinadi.

So'ngi bo'limda yutilish koefitsientining spektral xarakteristikasini ko'rinishlarini aniqlovchi asosiy shartlar tekshiriladi. Bunda yana nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalaridagi holatlar ishtirokidagi elektron o'tishlari uchun yutilish koefitsientining qiymatlarini nuqsonlarni kontsentratsiyasi va energetik o'rniga bog'lanishlari tadqiq qilinadi.

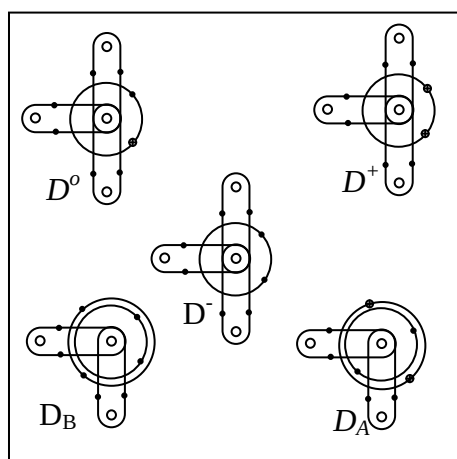
2.1. Amorf yarimo'tkazgichlardagi nuqsonlarni turlari va ularni energetik o'rni

Psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ ning harakatchanlik tirqishi ruxsat etilgan zonalarining dumlaridagi elektron holatlari bilan qoplangan bo'lishi va bu holatlar ishtirokidagi elektron o'tishlari ko'rib chiqildi. Materialni harakatchanlik tirqishida, uzilgan bog'lanishlar hosil qiluvchi elektron holatlari ham mavjudligini aytib o'tildi.

Ma'lumki, namuna sifatli bo'lsa ulardagi nuqsonlarni kontsentratsiyasi juda kichik bo'ladi. Shuning uchun ayrim hisoblashlarni bajarishda ularni hisobga olmaslik ham mumkin. Ammo, o'rganiladigan namunada nuqsonlarni kontsentratsiyasi bilani aniqlanadigan parametrni qiymatlari katta bo'lsa, albatta nuqsonlardagi elektron holatlarini e'tiborga olishga to'g'ri keladi.

Ushbu bobda psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ namunalarida uzilgan bog'lanishlardagi holatlar ishtirok etuvchi elektronlarni optik o'tishlari bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsientini ko'rib chiqiladi.

– Ma'lumki, psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ qatlamlarining harakatchanlik tirqishida joylashgan uzilgan bog'lanishlar hosil qiluvchi monovakantsiya ko'rinishidagi nuqsonlarni ularni zaryadini holatiga qarab uchga ajratiladi [19-21]. D^0 -neytral nuqson va uni uzilgan Si-Si bog'lanishlar hosil qiladi. D^0 holatga erkin elektron kelib joylashganda yoki undan elektron chiqib ketganda D^- -manfiy zaryadli va D^+ -musbat zaryadli nuqsonlar hosil bo'ladi [22-24]. Ba'zi bir psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ qatlamlarining harakatchanlik tiriqishida bivakantsiyalarning ham ulushi katta bo'lib, ular hosil qiladigan holatlarni, D_V -ikki elektronli va D_A -ikkita kovakli holatlar deb nomlanadi (2.1 a-rasm). [25-26] ishlarda psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ qatlamlarida Fermi sathini D^- turdagi nuqsonlarni ortishi o'tkazuvchanlik zonasi tomonga, D^+ tur nuqsonni ortishi valent zona tomonga, D^0 tur nuqsonni ortishi harakatchanlik tirqishi o'rtasiga siljitishi ko'rsatib o'tilgan. Bundan ko'rinadiki D^- va D^+ turdagi nuqsonlardagi holatlar ishtirokidagi optik o'tishlar uchun olingan natijalarni, mos ravishda donor yoki aktseptor kirishma bilan legirlangan $a\text{-Si:H}$ namunalari uchun qo'llash mumkin bo'ladi. Psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ qatlamlaridagi D^+ , D^0 va D^- zaryadli nuqsonlarni energetik o'rinlari uchun [24-27] adabiyotlarda keltirilgan natijalar bir-biridan bir oz farq qiladi. Ushbu ishda ularni qiymatlarini o'rtachalashtirib $\varepsilon_S - \varepsilon_{D^0} \approx (0,9-1,0)$ eV, $\varepsilon_S - \varepsilon_{D^-} \approx 0,6$ eV, $\varepsilon_S - \varepsilon_{D^+} \approx (0,25-0,2)$ eV, $\varepsilon_{D_V} - \varepsilon_V \approx (0,4-0,35)$ eV va $\varepsilon_S - \varepsilon_{D_A} \approx (0,35-0,3)$ eV hisoblashlar bajarildi. 2.1 b-rasmda nuqsonlarning elektron holatlarini



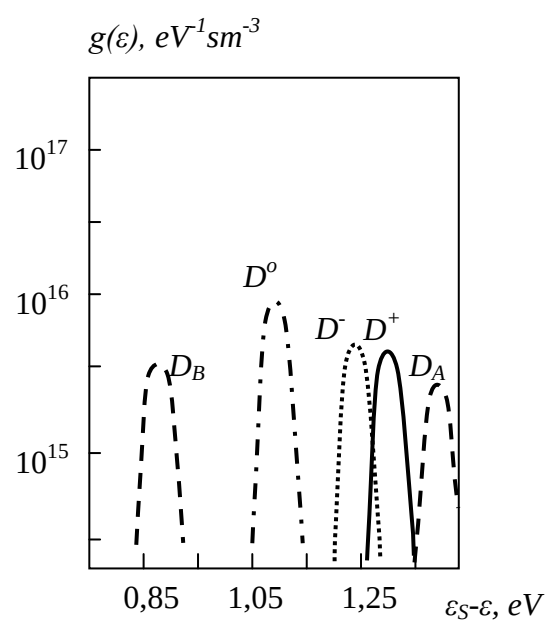
2.1 a-rasm. Psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ da uzilgan bog'lanishlar hosil qiladigan nuqsonlarni turlari. Monovakantsiyalar D^0 -neytral, D^+ -musbat va D^- -manfiy zaryadli holatlari. Bivakantsiyalar D_V -ikki elektronli, D_A -ikkita kovakli nuqsonlar [19-21].

bo'ladi. D^- - tur nuqson ikki elektronli nuqson bo'lib, u kovaklar uchun tuzoq bo'ladi. Bu nuqsonlardagi holatlarda fotonlar yutilganda ularni energetik o'rni o'zgaradi. 2.1 b-rasmda ikkita elektronga ega bo'lgan D^- nuqson, bitta elektronli D^0 nuqsondan yuqori energetik holatda turibdi. Buni quydagicha izohlanadi. Nuqsonlarni kontsentratsiyasi psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ strukturasiidagi Si-Si va Si-H bog'lanishlarnikiga nisbatan 5-6 tartib darajasida kichik bo'ladi. SHuning uchun ularni bir-biri bilan bog'lanish ehtimolligi ya'ni, ularni struktura to'rining yonmayon tugunlarida joylashishi juda kichik ehtimolli bo'lganidan, ikki elektronli holat, bir elektronli holatdan yuqorida turishi mumkin. Nuqsonlar hosil qiluvchi holatlar ishtirok etuvchi quyidagi optik o'tishlarni ko'rib chiqiladi:

- nuqsonlardagi holatlardan nuqsonlardagi holatlarga o'tishlar (fotonlarni nuqsonlararo yutilishlari);
- valent zona «dumi»dan nuqsonlarga o'tishlar;
- nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga o'tishlar;
- harakatchanlik tirqishida joylashishlari keltirilgan. D^+ - nuqsonda elektronlar bo'lmaydi va u elektronlar uchun tuzoq
- valent zonadan nuqsonlarga o'tishlar;
- valent zonadan nuqsonlarga o'tishlar;
- nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishlar.

2.2. Kubo-Grinvud formulasi va Devis-Mott yaqinlashish usuli

Amorf yarimo'tkazgichlarda elektronlarni optik o'tishlari bilan aniqlanadigan yutilish koefitsienti spektral xarakteristikalarini «Kubo-Grinvud formulasi»ni Devis-Mott yaqinlashish usuli uchun yozilgan ifodasidan foydalanib aniqlanadi va uni umumiy ko'rinishda quyidagicha yoziladi [1].



2.1 b-rasm. Uzilgan bog'lanishlar hosil qiluvchi nuqsonlarni psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ qatlamlarining harakatchanlik tirqishida joylashishi.

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 \Omega}{(m^*)^2 n_0 c} \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} \frac{g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} |D|^2 d\varepsilon \quad (2.1)$$

bu erda e –elektron zaryadi, $\hbar$ –Plank doimiysi, m^* -zaryad tashuvchilarni effektiv massasi, Ω – ε energiyali elektronni xususiy funktsiyasi uchun normallashtirilgan hajm, ω –yutilgan fotonni chastotasi, n_0 -muhitning sindirish ko'rsatgichi, s -yorug'lik tezligi, $g(\varepsilon)$ –optik o'tishda ishtirok etuvchi elektronlarni foton yutilishidan oldingi va $g(\varepsilon + \hbar\omega)$ - keyingi holatlarining zichligi, ε_0 –optik o'tishlarda ishtirok etishi mumkin bo'lgan elektronlarni eng yuqori energetik holati. Bu formuladagi $|D|^2$ -elektron o'tishlarining matritsa elementi dispertsiyasi bo'lib, Devis-Mott yaqinlashishiga usulida o'zgarmas deb olinadi. Zonalararo o'tishlar uchun, $\frac{m}{m^*} = 1$ va $k = \frac{\pi}{a}$ bo'lganda (k -elektronlarning to'lqin soni, a -esa o'rganilayotgan namunaning atomlari orasidagi o'rtacha masofa), $D = \pi \left(\frac{a}{\Omega} \right)^{1/2}$ ko'rinishda yozish mumkin [2]. Bundan foydalanib amorf yarimo'tkazgichlar uchun fotonlarni zonalararo yutilishlari uchun (2.4) ifodani quyidagicha yoziladi.

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^4 e^2 \hbar^2 a}{(m^*)^2 n_0 c \omega} \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g_V(\varepsilon) g_C(\varepsilon + \hbar\omega) d\varepsilon. \quad (2.2)$$

Bu erda $g_V(\varepsilon)$ va $g_C(\varepsilon + \hbar\omega)$ lar mos ravishda valent va o'tkazuvchanlik zonalaridagi elektron holatlari zichliklari taqsimotlari. Shuni ta'kidlab o'tamizki, agar fotonlarni yutilishida asosiy rolni elektronlarni boshlang'ich holati o'ynasa (2.4) ifoda quyidagi ko'rinishda ham yozilishi mumkin

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 a}{(m^*)^2 n_0 c} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} \frac{g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon)}{\hbar\omega} d\varepsilon = A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} \frac{g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon)}{\hbar\omega} d\varepsilon. \quad (2.3)$$

Bu ifodadagi $A = \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 a}{(m^*)^2 n_0 c}$ proporsionallik koeffitsienti bo'lib, bir xil amorf yarimo'tkazgichdagi bitta tur elektron o'tishlari uchun o'zgarmas kattalik bo'ladi [2].

[4] ishda umumiy yutilish koeffitsienti turli xil optik o'tishlariga mos keluvchi partial yutilish koeffitsientlarini yig'indisidan iborat bo'lishi ko'rsatilgan

$$\alpha = \sum_i \alpha_i \quad (2.4)$$

Shuning uchun fundametal yutilish sohasida ham yutilish koeffitsient qiymatlarini hisoblashda albatta, bitta holati lokallashgan ikkinchi holati esa lokallashmagan elektron o'tishlarini hisobga olish kerak. Ammo hozirgi paytgacha bu o'tishlar bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsientining spektrlarini analitik ko'rinishlari keltirib chiqarilmagan.

2.3. Hidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlardagi elektron holatlari turlari va zichligining taqsimotlari

Yuqorida ko'rdikki, gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlardagi elektron holatlari zichligini taqsimotlarini, ularni harakatchanlik tirqishidagi energetik o'riniga qarab uchta: valent va o'tkazuvchanlik zonalaridagi lokallashmagan, bu zonalarini eksponentsial «dumlari»dagi lokallashgan va harakatchanlik tirqishida joylashgan struktura to'ridagi nuqsonlar (uzilgan bog'lanishlar, kirishmalar) hosil qiladigan turlarga ajratish mumkin. Elektron holatlari zichligining energiyaga bog'lanishi ruxsat etilgan zonalarini chegaralarida darajali, ularni «dumlari»da eksponentsial, nuqsonlar hosil qiladiganlari esa Gauss taqsimotiga bo'ysinishini ko'rib chiqdik. Ma'lumki, bu taqsimotlarni ifodalovchi bog'lanishlar gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlardagi elektron

holatlari zichligini aniqlash bo'yicha o'tkazilgan tajriba natijalariga va oldin adabiyotlarda keltirilgan [5] munosabatlarga mos kelishi kerak. Bularni hisobga olib bu ishda gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlardagi elektron holatlari zichligini energiyaga bog'lanishlarini ifodalari valent va o'tkazuvchanlik zonalaridagi elektron holatlari taqsimotlari uchun mos ravishda

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1}, \quad \text{bu erda } \varepsilon \leq \varepsilon_V \quad (2.5)$$

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g} \right)^{n_2}, \quad \text{bu erda } \varepsilon \geq \varepsilon_V. \quad (2.6)$$

ko'rinishlarda tanlandi. Ulardagi $N(\varepsilon_V)$ -valent va $N(\varepsilon_C)$ -o'tkazuvchanlik zonalaridagi elektron holatlari zichligini effektivqiymatlari, ε_V -valent zonaning yuqori va ε_S -o'tkazuvchanlik zonasiningquyi chegarasi. Agar ruxsat etilgan zonalarining chegaralaridagi elektron holatlari zichligini energiyaga bog'lanishi o'zgarmas, parabolik va chiziqli bo'lishini hisobga olsak, n_1 va n_2 lar 0, $\frac{1}{2}$ va 1 bo'lganqiymatlarga ega bo'ladi.

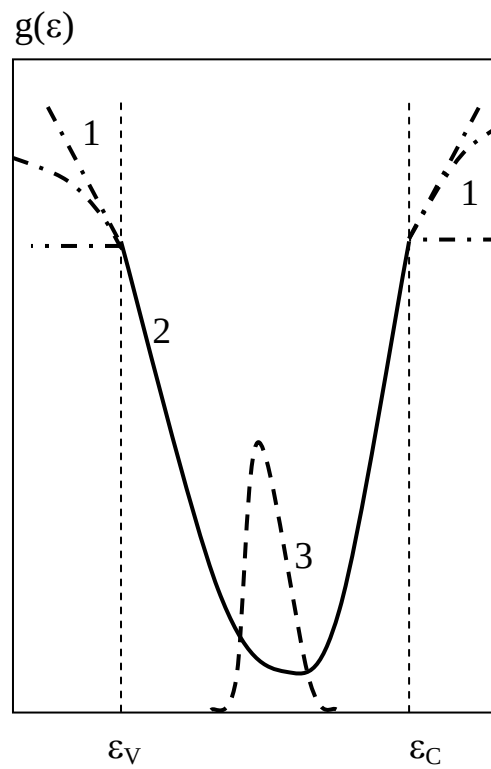
Ruxsat etilgan zonalarining eksponentsial «dumlari»dagi elektron holatlari taqsimotlari: valent zona «dumi» uchun

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)), \quad \text{bu erda } \varepsilon_V < \varepsilon < \varepsilon_0, \quad (2.7)$$

o'tkazuvchanlik zonasi «dumi» uchun esa

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)), \quad \text{bu erda } \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_C \quad (2.8)$$

ko'rinishlarda yozildi. Bu formulalardagi β_1 - va β_2 - lar mos ravishda valent va o'tkazuvchanlik zonalarining eksponentsial «dumlari» egriligini aniqlovchi



2,3-rasm. Amorf yarimo'tkazgichlar uchun taqiqlanmagan zonalar (1), ularning eksponentsial «dumlari» (2) va nuqsonlardagi (3) elektron holatlari uchun tanlangan taqsimot funktsiyalaridanqurilgan zona diagrammasining sxematik ko'rinishi.

parametrlar, ε_0 -valent va o'tkazuvchanlik zonalarining eksponentsial «dumlari»ni kesishish nuqtasini energetik o'rni.

Bu ifodalarni hisoblashdan olingan natijalar 2.3-rasmda keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, bu zona diagrammasi gidrogenizatsiyalangan amorf yarimutkazgichlardagi elektron holatlari zichligi uchun [1, 2, 3] ishlarda keltirilgan modellarga va [6] ishda olingan natijalarga mos keladi.

Endi gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning harakatchanlik tirqishida joylashgan elektron holatlari zichligining taqsimot funksiyasiniqarab chiqamiz. Ma'lumki, Gauss taqsimot funksiyasini integrallab analitik echimlarni olish mumkin emas. SHuni hisobga olib biz [2, 3] ishlarda o'zgarish va aniqlanish sohalari Gauss taqsimotidan deyarli farqqilmaydigan integrallanuvchi giperboliksekans

$$g(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} = \frac{2g(\varepsilon_D)}{\exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D)) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} \quad (2.9)$$

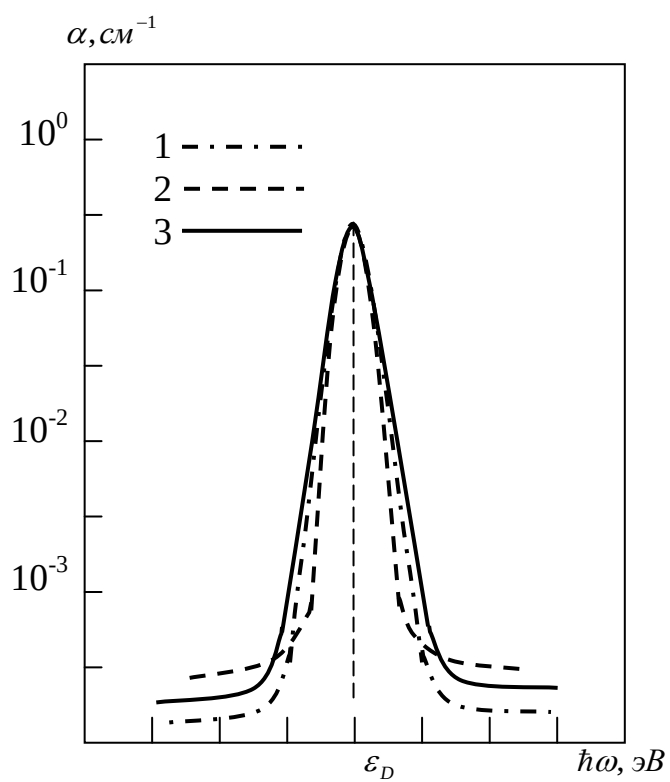
ko'rinishidagi funktsiyani gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgich-larning harakatchanlik tirqishida joylashgan nuqsonlardagi elektron holatlari taqsimoti uchun ishlatish mumkin ekanligini ko'rsatib o'tgan edik. Bu erda $g(\varepsilon_D)$ —nuqsonlardagi elektron holatlari zichligining maksimalqiymati, ε_D -esa shu maksimumni energetik o'rni. Hisoblashlarni bajarishda, bu ikkala taqsimot bilan aniqlanadigan nuqsonlarni kontsentratsiyalari teng bo'lishi talabqilinsa murakkab bo'lmagan hisoblashlardan keyin

$$a = \frac{b^2}{\pi} \quad (2.10)$$

ifodani olish mumkin. Xuddi shu usulda bu funktsiyalarni effektiv yarimkengligi teng bo'lish shartini hisoblansa quyidagi ifoda hosil bo'ladi.

$$a = \frac{b^2 \ln 2}{\ln(2 + \sqrt{3})}. \quad (2.11)$$

2.4-rasmda Gauss taqsimoti va (2.9) formulalar bilan aniqlanadigan funktsiyalarni (2.10) va (2.11) shartlarga mos keluvchi grafiklari keltirilgan. Hisoblashlardan, ularni almashtirish natijasida yo'lqo'yiladigan xatolik 7 % kichik bo'lishini ko'rsatilgan [7]. Buqiymat yutilish koeffitsientini aniqlash uchun o'tkaziladigan tajribalarni xatoligidan katta emas. SHuning uchun bu ishda analitik echimlarni olish uchunqo'yilgan masalalarni shartigaqarab ayrim hollarda Gauss, ayrim hollarda esa giperboliksekans ko'rinishidagi taqsimot funktsiyalaridan foydalanildi.



2,4-rasm. Gauss (1) va shu ishda taklifqilingan giperbolikcekans (2) taqsimot funktsiyalarini grafiklari.

2.4. Gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarda elektronlarni optik o'tish mexanizmlari va turlari

Umumiy yutilish koefitsientining qiymatlari turli elektron o'tishlariga mos keluvchi partsial yutilish koefitsientlari qiymatlarini yig'indisidan iborat bo'lishi ko'rsatib o'tilgan edi. SHuning uchun, Devis-Mott yaqinlashishi uchun yozilgan Kubo-Grinvud formulasidan hisoblanadigan umumiy yutilish koefitsienti spektral xarakteristikasini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin

$$\alpha(\hbar\omega) = \Sigma \alpha(\hbar\omega) = \Sigma \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 \Omega}{(m^*)^2 n_0 c} \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} \frac{g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} |D|^2 d\varepsilon. \quad (2.12)$$

Agar gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning harakatchanlik tirqishida joylashgan nuqsonlarning kontsentratsiyasi juda kichik bo'lsa, ularni Fermi sathiga ta'sirini e'tiborga olmaslik mumkin bo'lganligi uchun $\varepsilon_0 = \varepsilon_F$ shart bajariladi. SHuning uchun, biz avval legirlanmagan gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning harakatchanlik tirqishida joylashgan nuqsonlardagi (uzilgan bolanishlar) elektron holatlari ishtirok etuvchi optik o'tishlarni hisobga olmay (bunday namunalarni yutilish koefitsienti spektrlarini hisoblash formulalari keyinroq alohidaqarab chiqiladi), faqat ruxsat etilgan zonalar va ularning eksponentsial «dumlari»dagi elektron holatlaridagi optik o'tishlarni qarab chiqamiz. Ma'lumki, legirlanmagan gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlar n-tip elektro'tkazuvchanlikka ega bo'ladi [8]. Chunki ularni valent zonasi «dumlari»dagi elektron holatlarini zichligini qiymatlari o'tkazuvchanlik zonasini kigaqaraganda kattaroq bo'ladi [9]. Buni hisobga olib avval elektronli elektro'tkazuvchanlikka ega bo'lgan gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlardagi elektron o'tishlari bilan aniqlanuvchi yutilish koefitsientlarini qarab chiqildi. Bunday gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgich namunalari uchun $\varepsilon_C - \varepsilon_F < \varepsilon_F - \varepsilon_V$ shart bajariladi, chunki ulardagi Fermi sathi o'tkazuvchanlik zonasiga yaqinroq joylashgan bo'ladi.

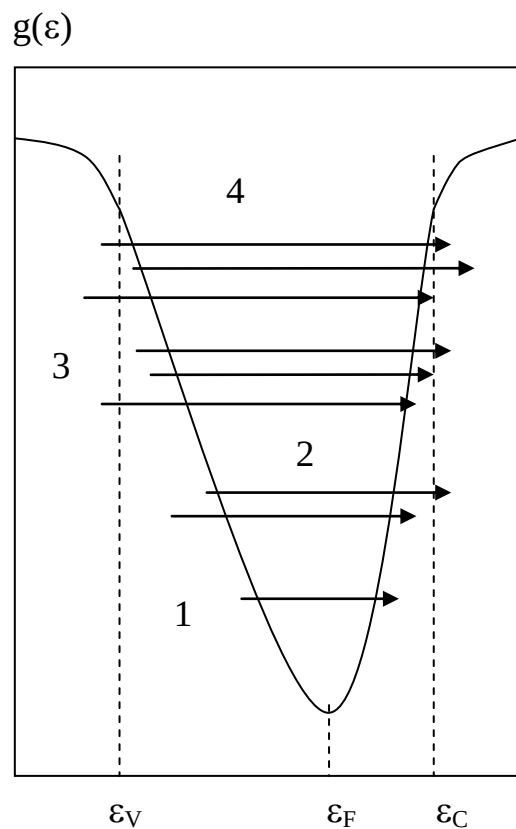
2,5-rasmda legirlanmagan ammo n-tip elektro'tkazuvchanlikka ega bo'lgan namunalarda yuqorida tanlangan elektron holatlari zichligini taqsimot funktsiyasiga mos keluvchi zona diagrammasi uchun elektron o'tishlarning turlari sxematik ravishda keltirilgan. Rasmdan foydalanib yutilgan fotonlar ni energiyasiga qarab, elektronlarni o'tishlarini hisobga olgan holda optik o'tishlarni sohalarga ajratildi va har bir sohadagi elektronlarni o'tish turlarini qarab chiqildi.

1-yutilgan fotonlarni energiyasi uchun $0 < \hbar\omega < \varepsilon_S - \varepsilon_F$ shart bajariladigan soha. Bunday energiyali fotonlar elektronlarni faqat valent zonaning eksponentsial «dumi»dagi lokallashgan holatlardan o'tkazuvchanlik zonasining eksponentsial «dumi»dagi lokallashgan holatlarga olishi mumkin (lokallashgan holatlararo o'tishlar).

2-soha. Bu soha $\varepsilon_C - \varepsilon_F \leq \hbar\omega < \varepsilon_F - \varepsilon_V$ energiya oralig'ida yotuvchi fotonlar yutilganda yuz beradigan elektronlarni o'tishlari bilan aniqlanadi. Yutilgan fotonlar elektronlarni valent zona «dumi»dan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga va valent zona «dumi»dan o'tkazuvchanlik zonasiga oladi (bitta holati lokallashgan ikkinchi holati esa lokallashmagan optik o'tishlar), shuning uchun yutilish koeffitsientining qiymati ikkita komponentani yig'indisidan iborat bo'ladi (2,3-rasmdagi 2-tur o'tishlar).

3-sohada yutilgan fotonlarni energiyasi $\varepsilon_F - \varepsilon_V \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ oraliqda yotadi. Bu sohada sodir bo'ladigan elektron o'tishlarining sxematik ko'rinishi 2,5-rasmdagi 3-tur o'tishlarga mos keladi. Yutilgan fotonlar uchun bu shart bajarilganda elektronlar: valent zona «dumi»dan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga, valent zona «dumi»dan o'tkazuvchanlik zonasiga, valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga o'tishlari mumkin. Yutilish koeffitsientining qiymati uchta komponentadan tashkil topadi.

4-sohada fotonlarni energiyasi uchun $E_g = \varepsilon_C - \varepsilon_V \leq \hbar\omega$ shart bajariladi va yutilgan fotonlar elektronlarni valent zona «dumi»dan o'tkazuvchanlik zonasiga, valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasiga (zonalararo yutilishlar) va valent zonadan



2,5-rasm. Legirlanmagan n-tip elektr-o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan amorf yarimo'tkazgich electron o'tishlarining fotonlarning energiyasiga bog'lanishi. 1- $0 < \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_F$, 2- $\epsilon_C - \epsilon_F \leq \hbar\omega < \epsilon_F - \epsilon_V$, 3- $\epsilon_F - \epsilon_V \leq \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_V = E_g$, 4- $\epsilon_C - \epsilon_V = E_g \leq \hbar\omega$.

o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga oladi. Ko'rinib turibdiki umumiy yutilish koefitsientining qiymati yana uchta hadni yig'indisidan iborat bo'ladi.

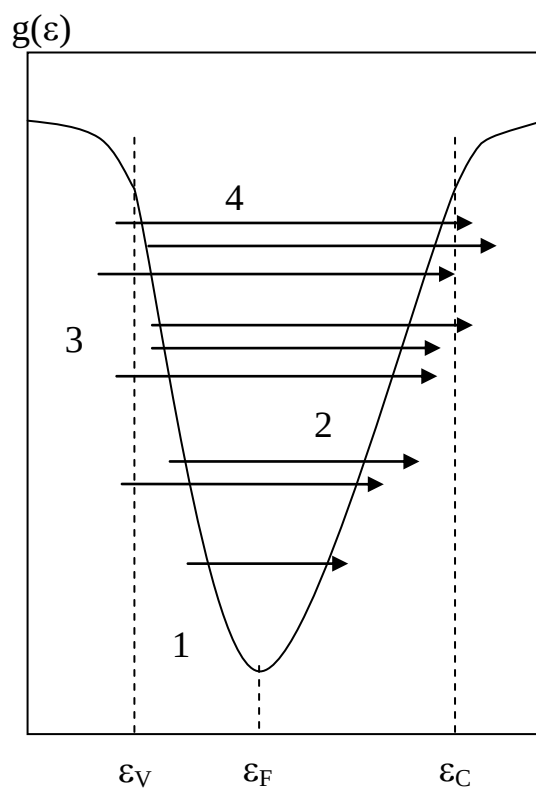
Xuddi shu usulda legirlanmagan ammo, Fermi sathi valent zona tomonga yaqinroq joylashgan, $\varepsilon_C - \varepsilon_F > \varepsilon_F - \varepsilon_V$ (p-tip elektro'tkazuvchanlikka ega bo'lgan) gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgich namunalari uchun, masalan psevdolegirlangan amorf yarimo'tkazgichlar [10] yutilish koefitsienti spektrlarini yutilgan fotonlarning energiyasiga bog'lanishi bilan aniqlanadigan sohalar to'rt xil bo'ladi [10]. Bularni ajratishda Fermi sathini energetik o'rnini hisobga olish kerak bo'ladi.

1-soha. Bunda yutilgan fotonlarning energiyasi $0 < \hbar\omega < \varepsilon_F - \varepsilon_V$ bo'lib, elektronlarni optik o'tishlari faqat lokallashgan holatlararo bo'ladi (2.6-rasm).

2-sohada esa, yutilgan fotonlarning energiyalari uchun $\varepsilon_F - \varepsilon_V \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_F$ shart bajarilishi talabqilinadi. SHuning uchun optik o'tishlar ikki xil bo'lib, ular elektronlarni lokallashgan holatlararo va valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga oluvchi turlarga ajraladi.

3-sohada yutilgan fotonlarning energiyasi uchun $\varepsilon_C - \varepsilon_F \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ shart bajariladi va elektronlari optik o'tish turlari n-tip elektro'tkazuvchanlikka ega bo'lgan namunalarniki bilan bir xil bo'ladi.

4-sohada esa yutilgan fotonlarga qo'yiladigan shart ham, optik o'tishlar turlari ham n-tip elektro'tkazuvchanlikka ega bo'lgan gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarnikidan farqqilmaydi. Endi xususiy $\varepsilon_C - \varepsilon_F \approx \varepsilon_F - \varepsilon_V \approx E_g/2$ gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgich namunalarda elektronlarni optik o'tish turlarini qarab chiqishga o'tamiz. 6-rasmda bunday namunalarda yuz beradigan elektronlarni optik o'tish turlari sxematik ko'rinishda keltirilgan. Bunday namunalarda optik yutilish spektrlari uchta sohaga ajraladi.



2,6-rasm. Psevdolegirlangan r-tip elektr-o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan amorf yarimo'tkazgich electron o'tishlarining fotonlarning energiyasiga bog'lanishi. 1- $0 < \hbar\omega < \varepsilon_F - \varepsilon_V$, 2- $\varepsilon_F - \varepsilon_V \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_F$, 3- $\varepsilon_C - \varepsilon_F \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$, 4- $\varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g \leq \hbar\omega$

1-soha uchun yutilgan fotonlarga qo'yiladigan shart $0 < \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_F = \varepsilon_F - \varepsilon_V = E_g/2$ ko'rinishda yoziladi. Bunday energiyali fotonlar yutilganda, ular elektronlari faqat valent zona «dumi»dan o'tkazuvchanlik zona «dumi»ga oladi (fotonlarni lokallashtirgan holatlararo yutilishlari).

2-sohada esa, yutilgan fotonlarning energiyalari uchun $E_g/2 \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ shart bajariladi va elektronlar valent zona «dumi»dan o'tkazuvchanlik zonasiga va valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasiga «dumi»ga o'tishlari mumkin (n-tip va p-tip elektro'itkazuvchanlikka ega bo'lgan namunalarni 3-sohasi bilan bir xil).

3-soha. Bu sohadagi elektron o'tishlari n- va p- tip elektro'itkazuvchanlikka ega bo'lgan gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'itkazgich namunalardagi optik o'tishlar turlari bilan aniqlanuvchi 4-soha bilan bir xil bo'ladi (7-rasm). Yuqoridagilardan ko'rinadiki, gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'itkazgichlarda optik yutilish koeffitsientini Kubo-Grinvud formulasi bo'yicha hisoblashda nuqsonlardagi (uzilgan bog'lanishlar, kirishmalar) elektron holatlari ishtirok etuvchi elektron o'tishlarini hisobga olinmaganda ham albatta yutilgan fotonlarni energiyasini ahamiyati katta bo'lar ekan. Chunki yutilgan fotonlarni energiyasi ortib borgan sari, umumiy yutilish koeffitsientini komponentalari bittadan uchtagacha o'zgarishi mumkin ekan.

Nuqsonlardagi (uzilgan bog'lanishlar, kirishmalar) elektron holatlari ishtirok etuvchi elektron o'tishlari bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikasi ham Kubo-Grinvud formulasidan hisoblanadi. Buni amalga oshirishda ham yuqoridagi kabi yo'l tutish kerak. Avval nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirok etuvchi optik o'tish turlarni ajratib olaylik. SHuni takidlab o'tamizki uzilgan bog'lanishlarni (nuqsonlar, legirlovchi kirishmalar) turi qanday bo'lishidan qat'iy nazar (akseptor yoki donor, D^- , D^+ , D^0 va h. k.) ular barcha elektron o'tishlarida ishtirok etadi deb hisoblash kerak. Chunki yutilgan fotonlar harakatchanlik tirgichi ichidagi bir marta ionlashgan sathlar bilan ham ta'sirlashadi [11].

1. Hidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning harakatchanlik tirqishida joylashgan ikki xil nuqsonlardagi elektron holatlari orasidagi optik o'tishlar (nuqsonlararo optik o'tishlar).

2. Valent zonaning eksponentsial «dumi»dagi va nuqsonlardagi elektron holatlari orasidagi optik o'tishlar.

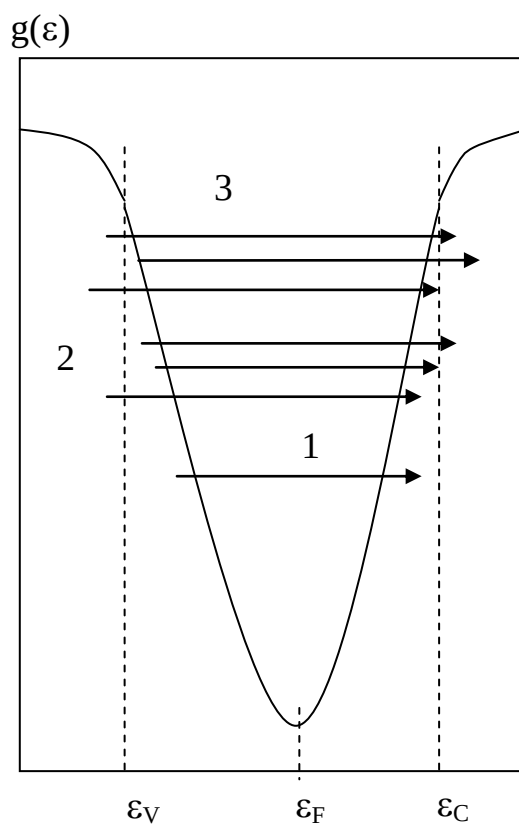
3. Nuqsonlar va o'tkazuvchanlik zonasining eksponentsial «dumi»dagi elektron holatlari orasidagi optik o'tishlar.

4. Valent zona va nuqsonlardagi elektron holatlari orasidagi optik o'tishlar.

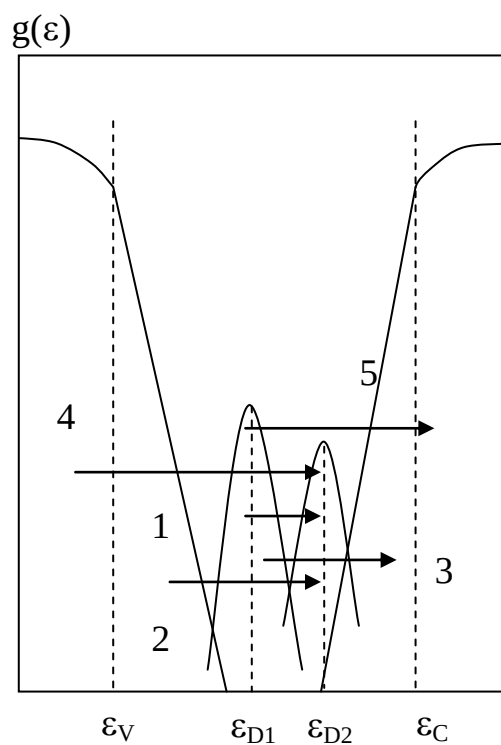
5. Nuqsonlar va o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari orasidagi optik o'tishlar. 2.8-rasmda yuqoridagi o'tishlar sxemasi keltirilgan.

(2.12) formuladan nuqsonlararo elektron o'tishlari bilan (1-tur o'tishlar) aniqlanadigan yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikasini hisoblashda yutilgan fotonlarni energiyasini $0 < \hbar\omega < E_g$ oraliqda o'zgartirish etarli bo'ladi. [12] ishlardagi kabi integral chegarasini cheksizlikka tenglash shart emas. Chunki yutilgan fotonlarni energiyasi ortib borgan sari yutilish koeffitsientini qiymati eksponentsial ravishda kamayib boradi. 2,7-rasmdan ko'rinadiki, 2-tur o'tishlarning yutilish koeffitsientini hisoblashda yutilgan fotonlarning energiyasi $0 < \hbar\omega < \varepsilon_0 - \varepsilon_V$ oraliqda, 3-tur o'tishlar uchun esa $0 < \hbar\omega < \varepsilon_S - \varepsilon_0$ oraliqda o'zgartirish kerakligi aniqlandi. Bu erdagi ε_0 niqiymatlari; 2-tur o'tishlar uchun valent zona «dumi»dagi va nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini, 3-tur o'tishlar uchun esa nuqsonlardagi va o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»dagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini kesishish nuqtasining energetik o'rinlari bilan aniqlanadi.

Yutilgan fotonlarni energiyasi uchun $\varepsilon_0 - \varepsilon_V \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ shart bajarilganda elektronlar bir vaqtni o'zida 2- va 4- tur o'tishlarda, $\varepsilon_C - \varepsilon_0 \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ shart bajarilganda esa 3- va 5- tur o'tishlarda ishtirok etadi. SHuning uchun, bu sohada yutilish koeffitsienti ikkita komponentani yig'indisidan iborat bo'ladi. Bulardan ko'rinadiki nuqsonlardagi (uzilgan bog'lanishlar, legirlovchi kirishmalar) elektron



2,7-rasm. i-tip elektro'tkazuvchanlikka ega bo'lgan amorf yarimo'tkazgich electron o'tishlarining fotonlarning energiyasiga bog'lanishi. 1- $0 < \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_F \approx \epsilon_F - \epsilon_V \approx E_g/2$, 2- $E_g/2 \leq \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_V = E_g$, 3- $\epsilon_C - \epsilon_V = E_g \leq \hbar\omega$



2,8-rasm. Nuqsonlardagi electron holatlari ishtirok etuvchi optic o'tishlarning turlari. 1-nuqsonlararo. 2-valent zona «dumi»dan nuqsonga. 3- nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga. 4- valent zonadan nuqsonga. 5- nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasiga.

holatlari ishtirok etuvchi optik o'tishlar bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsienti spektrlarini hisoblashda ham yutilgan fotonlarni energiyasiga qarab sohalarga ajratib olish kerak bo'lar ekan.

3-BOB. NUQSONLARDAGI ELEKTRON HOLATLARI ISHTIROK ETUVCHI OPTIK O'TISHLARGA XOS BO'LGAN YUTILISH KOEFFITSIENTINI SPEKTRLARI

3.1. Fotonlarni nuqsonlararo yutilishlari

Ma'lumki, elektron qurilmalar tayyorlashda ishlatiladigan psevdolegirlangan *a-Si:H* qatlamlaridagi nuqsonlarni kontsentratsiyasi, ruxsat etilgan zonalaridagi va ularning eksponentsial «dumlari»dagi elektron holatlarini kontsentratsiyasidan bir necha tartib kichik bo'ladi [28, 29]. Shuning uchun elektronlarni nuqsonlararo o'tishlarining ehtimoli, nuqson-lardagi holatlar ishtirok etuvchi boshqa o'tishlarning ehtimolidan juda kichik bo'ladi, buni hisobga olinsa ularni tadqiq qilish shart emas degan fikr ham paydo bo'lishi mumkin. Ammo, birinchidan, amorf yarimo'tkazgichlarda sakrashli elektro'tkazuvchanlik kuzatilgandagi kabi [30] bunday o'tishlarning ehtimolligi noldan farqli bo'ladi. Ikkinchidan, agar namuna-dagi nuqsonlarni kontsentratsiyasi gidrogenizatsiyalanmagan amorf yarim-o'tkazgichlardagi kabi katta bo'lsa albatta, ular ishtirokidagi o'tishlarni hisobga olish shart bo'ladi. Nuqsonlararo optik o'tishlar uchun aniqlangan spektrlardan boshqa ba'zi o'tishlarni tushuntirishda ham foydalaniladi. SHuning uchun, elektronlarni nuqsonlararo o'tishlarini tekshirish rejalashtirildi.

Birinchi bobda amorf yarimo'tkazgichlarning harakatchanlik tirqishida joylashgan nuqsonlardagi elektron holatlari zichligining energetik taqsimotini Gauss

$$g(\varepsilon) = g(\varepsilon_D) \exp(-a(\varepsilon - \varepsilon_D)^2), \quad (3.1)$$

yoki giperboliksekans

$$g(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))}, \quad (3.2)$$

funktsiyalari ko'rinishida tasvirlash ko'rsatib o'tildi. Shu bobda nuqsonlardagi holatlar ishtirokidagi elektron o'tishlari uchun formulalar keltirib chiqarilgan. Bu bo'limda ularni takomillashtirib, tajriba natijalarini tushuntirish maqsad qilingan.

Ma'lumki, Gauss taqsimot funktsiyasidan foydalanib, nuqsonlararo yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikasini hisoblash uchun taqribiy usullarga murojat qilinadi. Kubo-Grinvud formulasida

$$\alpha = B \int g(\varepsilon) g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (3.3)$$

integral chegarasini ε_0 dan $\varepsilon_0 - \hbar\omega$ qiymatgacha olindi va nuqsonlar butun harakatchanlik tirqishini qoplaydi deb hisoblandi. SHuning uchun ε_0 ni optik o'tishlarda ishtirok etuvchi nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini kesishish nuqtasini energetik o'rniga teng bo'ladi deb tanlandi. Analitik echimlarni olishda (3.2) ko'rinishdagi taqsimot funktsiyasidan foydalanildi (3.3). Optik o'tishlarda ishtirok etuvchi elektronning boshlang'ich va oxirgi holatlarini aniqlashda nuqsonlarning holatlari zichliklarini (3.22) ko'rinishdagi taqsimot funktsiyalaridagi b_1 va b_2 larini bir-biriga teng bo'lishi talab qilindi ($b_1 = b_2 = b$). Nuqsonlardagi holatlar zichliklari taqsimotini

$$g(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_{D1})}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_{D1}))}, \quad g(\varepsilon + \hbar\omega) = \frac{g(\varepsilon_{D2})}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_{D2} + \hbar\omega))},$$

ko'rinishidan foydalanilganda (3.3) formula quyidagi ifodaga keltirildi

$$\alpha = B \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \frac{g(\varepsilon_{D1})}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_{D1}))} \frac{g(\varepsilon_{D2})}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_{D2} + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (3.4)$$

va analitik echildi.

$$\alpha = \frac{Ag(\varepsilon_{D1})g(\varepsilon_{D2})}{g(\varepsilon_C)g(\varepsilon_V)b\hbar\omega} \frac{1}{sh(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))} \ln \left[\frac{(\exp(b(2\varepsilon_0 - \varepsilon_{D1} - \varepsilon_{D2} + \hbar\omega)) + \exp(-b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))) (\exp(b(2\varepsilon_0 - \varepsilon_{D1} - \varepsilon_{D2} - \hbar\omega)) + \exp(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega)))}{(\exp(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega)) (\exp(b(2\varepsilon_0 - \varepsilon_{D1} - \varepsilon_{D2} - \hbar\omega)) + \exp(-b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))))} \right]. \quad (3.5)$$

Harakatchanlik tirqishida joylashgan besh xil D_A , D^0 , D^- , D^+ va D_B nuqsonlarni turli kombinatsiyalari xuddi shunday ifodalar olindi (3.1-rasm.).

Echimni sodda ko'rinishi uchun $b_1 \approx b_2 = b$ va $g(\varepsilon_{D1}) \approx g(\varepsilon_{D2})$ shart bajarilganda $\varepsilon_0 = (\varepsilon_{D1} + \varepsilon_{D2})/2$ ga teng bo'ladi. Bundan foydalanib (2.3) formula

$$\alpha = \frac{Ag(\varepsilon_{D1})g(\varepsilon_{D2})}{g(\varepsilon_C)g(\varepsilon_V)b\hbar\omega} \frac{1}{sh(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))} \ln \left[\frac{1 + ch(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1}))}{1 + ch(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - 2\hbar\omega))} \right]. \quad (3.6)$$

ko'rinishida ifodalandi va undan olingan yutilish ko'effitsientining spektral xarakteristikalarini 3.2-rasmda keltirildi. Bu spektrlarni nazariy tahlili olib borildi va quyidagi natijalar olindi:

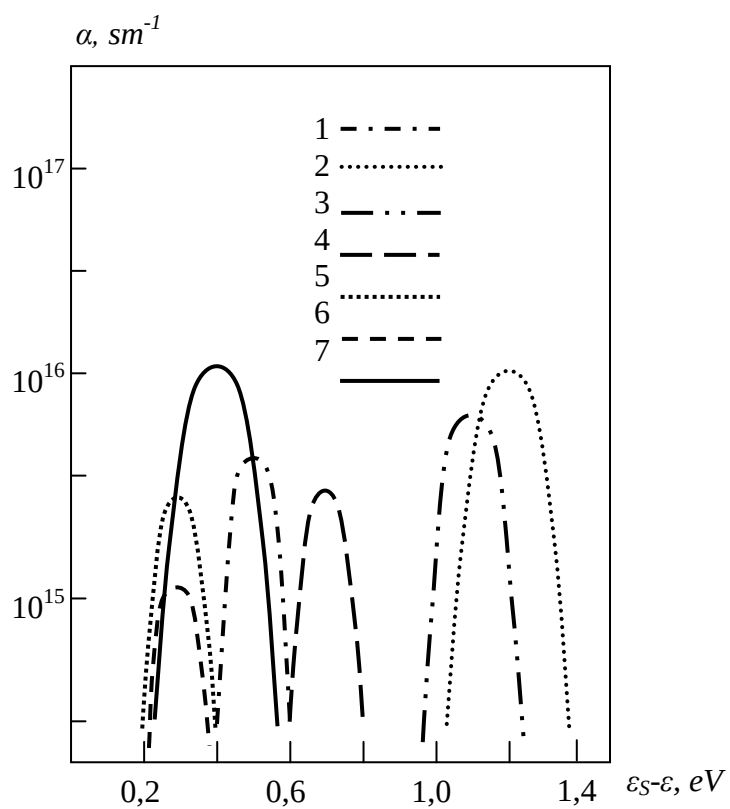
- nuqsonlarning holat zichliklarining maksimum qiymatlarini energetik o'rinlari bir-biriga yaqinlashganda, yutilish ko'effitsienti spektral xarakteristikasining maksimum qiymati kichik energiyali fotonlar tomonga surilishi, nuqsonlar orasidagi energetik interval ortib bor-ganda, aksincha katta energiyali fotonlar tomonga surildi;
- b katta qiymatlarni qabul qilgan sari yutilish ko'effitsienti spektral xarakteristikasining effektiv yarim kengligi ortib boridi;
- nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarining maksimal qiymatlari ortganda, $\alpha(\hbar\omega)$ ning ham maksimal qiymatini ortib boridi.

$g(\varepsilon_{D1})$ bilan $g(\varepsilon_{D2})$ taqsimotlar bir-biriga teng bo'lmaganda

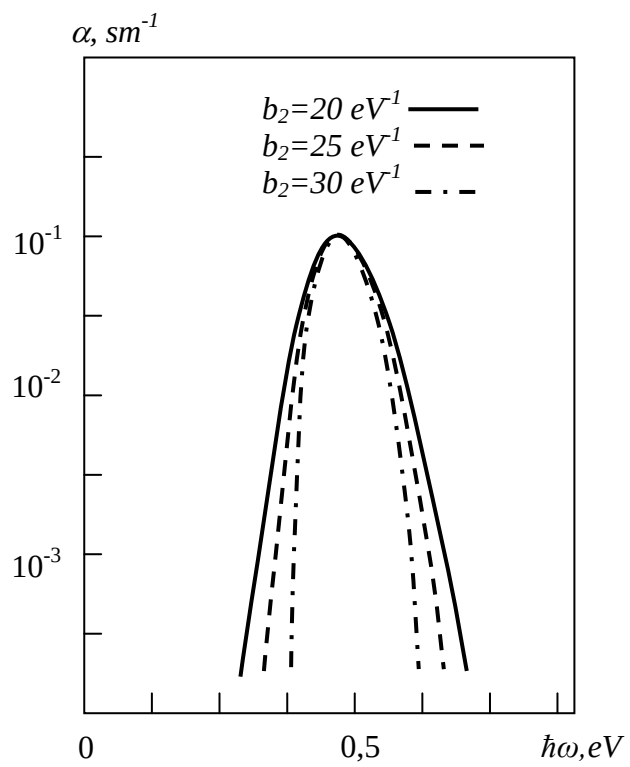
$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_{D2} + \varepsilon_{D1} + \frac{1}{b} \ln \frac{g(\varepsilon_{D2})}{g(\varepsilon_{D1})} \right) \quad (3.7)$$

kelib chiqadi va (2.3) spektr

$$\alpha = \frac{Ag(\varepsilon_{D1})g(\varepsilon_{D2})}{g(\varepsilon_C)g(\varepsilon_V)b\hbar\omega} \frac{1}{sh(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega))} \ln \left[\frac{1 + (g(\varepsilon_{D2})/g(\varepsilon_{D1}))^2 + \frac{+2(g(\varepsilon_{D2})/g(\varepsilon_{D1}))ch(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1}))}{+2(g(\varepsilon_{D2})/g(\varepsilon_{D1}))ch(b(2\hbar\omega - (\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1})))}}{1 + (g(\varepsilon_{D2})/g(\varepsilon_{D1}))^2 + \frac{+2(g(\varepsilon_{D2})/g(\varepsilon_{D1}))ch(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1}))}{+2(g(\varepsilon_{D2})/g(\varepsilon_{D1}))ch(b(2\hbar\omega - (\varepsilon_{D2} - \varepsilon_{D1})))}} \right] \quad (3.8)$$



3,1-rasm. Psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ qatlamlaridagi nuqsonlararo elektronlarni $1\text{-}D_B \rightarrow D^0$; $2\text{-}D_B \rightarrow D^+$; $3\text{-}D_B \rightarrow D_A$; $4\text{-}D^0 \rightarrow D^+$; $5\text{-}D^0 \rightarrow D_A$; $6\text{-}D^- \rightarrow D^+$; $7\text{-}D^- \rightarrow D_A$ optik o'tishlari bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsientini spektral xarakteristikalari.



3,2-rasm. Nuqsonlarda yutilish koeffitsientini spektral xarakteristikasini b_1 va b_2 larning qiymatlariga bog'lanishi $b_1 = 30 \text{ eV}^{-1}$.

shaklga keltiriladi. (3.5), (3.6) va (3.8) formulalarni hisoblash natijalari bir-biridan katta farq qilmadi. Agar $b_1 \neq b_2$ bo'lsa, (3.3) tenglamani umumiy echimi analitik hisoblanmadi va taqribiy usullardan foydalanildi. Nuqsonlararo yutilish koeffitsienti spektrlarining tadqiqiy natijalari 3.1 - rasmda keltirildi. b_1 va b_2 kattaliklar bir-biridan juda katta farq qilmasa, nuqsonlararo yutilish koeffitsientining spektral, xarakteristiasini hisoblashda $b_1 = b_2$ deb olish bilan hosil bo'ladigan xatolik tajribalarda yo'l qo'yiladigan xatolikdan (9%) katta bo'lmadi.

3.2. Bitta holat nuqsonlarda, ikkinchi holat ruxsat etilgan zonalarning dumlarida bo'lgan holdagi yutilishlar

Fotonlar yutilganda nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirok etuvchi optik o'tishlardan yana biri nuqsonlar va lokallashtirilgan holatlar orasidagi o'tishlar hisoblanadi. Ruxsat etilgan zonalarning dumlaridagi va nuqsonlardagi holatlar zichliklarini energiyaga bog'lanishlari uchun tanlangan ifodalardan foydalanib, yutilish koeffitsienti spektrlarini:

elektronlarni nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga optik o'tishlarida

$$\alpha = B \int_{\varepsilon_1 - \hbar\omega}^{\varepsilon_1} \frac{g(\varepsilon_{D1})}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_{D1}))} g(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_V + \hbar\omega - E_g)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (3.9)$$

elektronlarni valent zona «dumi»dan nuqsonlarga optik o'tishlarida

$$\alpha = B \int_{\varepsilon_2 - \hbar\omega}^{\varepsilon_2} g(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \frac{g(\varepsilon_{D2})}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_{D2} + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (3.10)$$

ko'rinishlarda yozildi. Agar b , β_1 va β_2 lar ixtiyoriy qiymatlarni qabul qilsa, (3.9) va (3.10) formulalar analitik echilmadi. Agar $b = n\beta_1$ va $b = m\beta_2$ ko'rinishidagi shartlarni bajarilishi talab qilinsa, formulalar

$$\int \frac{X^{m-1}}{1 + X^{2n}} dX, \quad (3.11)$$

ko'rinishdagi integrallarga keladi. Ularni echimi murakkab ko'rinishga ega bo'ladi. SHuning uchun ularni keltirilmadi. Chunki ishni asosiy maqsadi (3.9) va (3.10) formulalardagi ε_{D1} , ε_{D2} , β_1 , β_2 va b kattaliklarni qiymatlari o'zgarganda, yutilish koeffitsienti qiymatlarining qanday o'zgarishini aniqlashdir. (3.9) formulada $b=\beta_1$ va (3.10) formulada $b=\beta_2$ shart bajarilishi talab qilindi. Analitik echimlar mos ravishda

$$\alpha = \frac{Ag(\varepsilon_{D1})\exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_C + \hbar\omega))}{g(\varepsilon_V)b\hbar\omega} \ln \left[\frac{\exp(2b(\varepsilon_1 - \varepsilon_{D1})) + 1}{\exp(2b(\varepsilon_1 - \varepsilon_{D1} - \hbar\omega)) + 1} \right], \quad (3.12)$$

$$\alpha = \frac{Ag(\varepsilon_{D2})\exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_{D2} + \hbar\omega))}{g(\varepsilon_C)b\hbar\omega} \ln \left[\frac{\exp(2b\hbar\omega)(\exp(2b(\varepsilon_2 - \varepsilon_{D2})) + 1)}{\exp(2b(\varepsilon_2 - \varepsilon_{D2} + \hbar\omega)) + 1} \right] \quad (3.13)$$

ko'rinishda olindi. Bu spektrlardagi ε_1 va ε_2 parametrlar ruxsat etilgan zonalarining dumlaridagi va nuqsonlardagi elektron holatlari zichliklari taqsimotlari kesishadigan nuqtaning energetik o'rni (1.3-rasm). Shuning uchun ularni quyidagicha yozildi

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_C + \varepsilon_{D1} + \frac{1}{b} \ln \left[\frac{2g(\varepsilon_{D1})}{g(\varepsilon_C)} \right] \right), \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_{D2} + \varepsilon_V + \frac{1}{b} \ln \left[\frac{g(\varepsilon_V)}{2g(\varepsilon_{D2})} \right] \right). \quad (3.15)$$

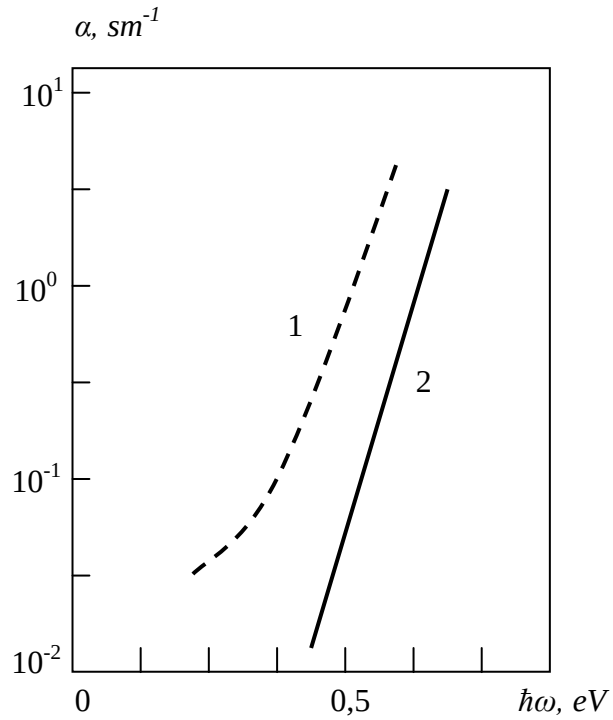
Bularni hisobga olinganda (3.1) va (3.2) ifodalar

$$\alpha = \frac{Ag(\varepsilon_{D1})\exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_C + \hbar\omega))}{g(\varepsilon_V)b\hbar\omega} \ln \left[\frac{(2g(\varepsilon_{D1})/g(\varepsilon_C))\exp(b(\varepsilon_C - \varepsilon_{D1})) + 1}{(2g(\varepsilon_{D1})/g(\varepsilon_C))\exp(b(\varepsilon_C - \varepsilon_{D1} - 2\hbar\omega)) + 1} \right], \quad (3.16)$$

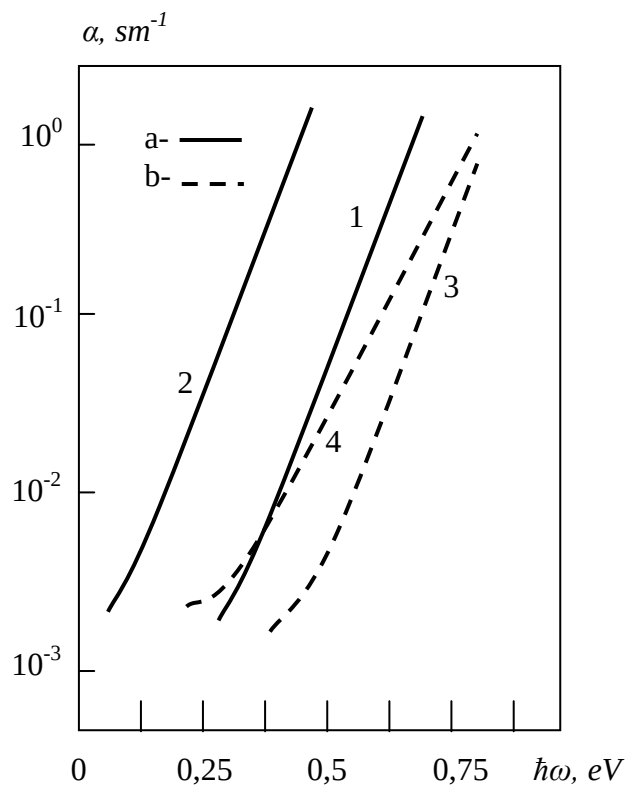
$$\alpha = \frac{Ag(\varepsilon_{D2})\exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_{D2} + \hbar\omega))}{g(\varepsilon_C)b\hbar\omega} \times \ln \left[\frac{\exp(2b\hbar\omega)((g(\varepsilon_V)/g(\varepsilon_{D2}))\exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_{D2})) + 1)}{(g(\varepsilon_V)/g(\varepsilon_{D2}))\exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_{D2} + 2\hbar\omega)) + 1} \right]. \quad (3.17)$$

shaklga keltirildi va hisoblangan spektrlar 3.3-3.4-rasmlarda keltirildi. Bu yutilish koeffitsientlarining spektrlarini hisoblashdagi tadqiqot-lardan:

- elektronlarni optik o'tishlarida bir holat nuqsonlarda, ikkinchi holat ruxsat etilgan zonalarni dumlarida bo'lsa, $\alpha(\hbar\omega)$ bog'lanish eksponentsial ko'rinishda bo'lishi;
- bu spektrlarda $\varepsilon_{D1} \rightarrow \varepsilon_S$ tomonga yoki $\varepsilon_{D2} \rightarrow \varepsilon_V$ tomonga siljiganda yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikasi mos ravishda fotonlarni energiyasi kichik yoki katta tomonga paralell ko'chishi;
- b katta qiymatni qabul qilganda $\alpha(\hbar\omega)$ egri chiziq bilan abtsissa o'qi ($\hbar\omega$) orasidagi burchak kichik, aks holda katta bo'lishi va nuqsonlardagi holatlarining maksimal qiymatlari ($g(\varepsilon_{D1})$ va $g(\varepsilon_{D2})$) ortganda $\alpha(\hbar\omega)$ yuqoriga, kamayganda pastga siljishi xulosalari olindi.



3.3-rasm. Elektronlarni o'tishlarida bir holat nuqsonlarda ikkinchi holat ruxsat etilgan zonalarning dumlarida bo'lgan hollar uchun yutilish koeffitsientining spektral xarakteristikalar. 1-valent zona «dumi»dan aktseptorga o'xshagan sathga o'tishlar. 2-donorga o'xshagan sathdan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga o'tishlar.



3.4-rasm. Bir holat nuqsonlarda ikkinchi holat ruxsat etilgan zonalarda bo'lgan hollardagi elektron o'tishlarining spektral xarakteristikasining ε_D nuqsonlarni energetik o'rni (a) va b parametrga (b) bog'lanishi. a) $b=20 \text{ eV}^{-1}$; 1- $\varepsilon_S-\varepsilon_D=0,9 \text{ eV}$, 2- $\varepsilon_S-\varepsilon_D=0,6 \text{ eV}$. b) $\varepsilon_S-\varepsilon_D=0,4 \text{ eV}$; 3- $b=20 \text{ eV}^{-1}$, 4- $b=15 \text{ eV}^{-1}$.

3.3. Fotonlarning nuqsonlardagi va ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlari orasidagi yutilishlari

Ma'lumki, fotonlarning nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlari ishtirok etuvchi optik o'tishlari ikki xil: valent zonadan nuqsonlarga va nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasiga bo'ladi. Bu o'tishlar uchun yutilish koefitsientining spektral xarakteristikasi ham, odatdagidek Kubo-Grinvud formulasi yordamida hisoblanadi. Ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlar zichligi taqsimoti o'zgarmas bo'lganda, yutilgan fotonlar elektronlarni valent zonadan nuqsonlarga

$$\alpha = B \int_{\varepsilon_V - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon_V) \frac{2g(\varepsilon_D)}{\exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega)) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (3.18)$$

nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasiga

$$\alpha = B \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \frac{2g(\varepsilon_D)}{\exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D)) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} g(\varepsilon_C) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (3.19)$$

o'tkazadi deb, yutilish koefitsienti spektrilari yozildi. Nuqsonlardagi elektron holatlari taqsimoti funktsiyasining davomi ruxsat etilgan zonalarning chegaralarigacha borgani uchun (3.18) va (3.19) formulalardagi integrallarni yuqori chegaralari, mos ravishda valent va o'tkazuvchanlik zonalari chegaralari bilan aniqlanadi. Murakkab bo'lmagan hisoblashlar yordamida spektrlarni analitik echimlarining ifodalari olindi:

$$\alpha = \frac{2 \cdot A \cdot g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_C) \cdot b \cdot \hbar\omega} \operatorname{arctg} \left[\frac{\exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)) - \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D))}{1 + \exp(b(2(\varepsilon_V - \varepsilon_D) + \hbar\omega))} \right], \quad (3.20)$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot A \cdot g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_V) \cdot b \cdot \hbar\omega} \operatorname{arctg} \left[\frac{\exp(b(\varepsilon_C - \varepsilon_D)) - \exp(b(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar\omega))}{1 + \exp(b(2(\varepsilon_C - \varepsilon_D) - \hbar\omega))} \right]. \quad (3.21)$$

Ruxsat etilgan zonalardagi holatlar zichligi funktsiyalarining energiyaga bog'lanishi parabolik taqsimotga ega bo'lganda, yutilish koefitsienti spektrlarini hisoblashda Kubo-Grinvud formulasidagi integral

$$\alpha = B \int_{\varepsilon_V - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon_V) \sqrt{\frac{E_g - (\varepsilon - \varepsilon_V)}{E_g}} \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (3.22)$$

$$\alpha = B \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} g(\varepsilon_C) \sqrt{\frac{\varepsilon - \varepsilon_V + \hbar\omega}{E_g}} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \quad (3.23)$$

ko'rinishlarda yozildi. Bu integrallar analitik echilmaydi. SHuning uchun ularni echimlarini taqribiy hisoblash usullari bilan aniqlandi.

Lokallashmagan holatlar zichliklari funktsiyalari chiziqli taqsimotga bo'singanda, Kubo-Grinvud formulalarini mos ravishda elektronlarni valent zonadan nuqsonga va nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasiga optik o'tish-lari uchun quyidagicha

$$\alpha = B \int_{\varepsilon_V - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon_V) \frac{E_g - (\varepsilon - \varepsilon_V)}{E_g} \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (3.24)$$

$$\alpha = B \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} g(\varepsilon_C) \frac{\varepsilon - \varepsilon_V + \hbar\omega}{E_g} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \quad (3.25)$$

yo'zildi. Bu integrallarni analitik echimini topish uchun ularni ikkita integralni yig'indisi ko'rinishida yozildi. Birinchi integralda nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotini giperboliksekans, ikkinchi-sida Gauss taqsimot funktsiyasi bilan hisoblandi. Bu almashtirish natijasida yo'l qo'yiladigan xatolik (6,8%) katta bo'lmasligi [31] ishda ko'rsatilgan. (3.24) va (3.25) ifodalarni analitik echimlari

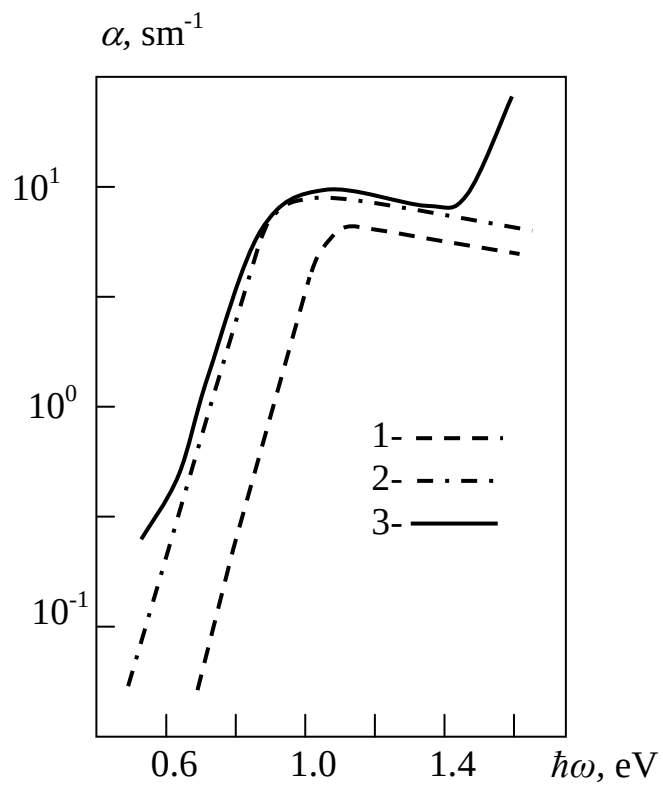
$$\begin{aligned} \alpha = & \frac{A \cdot g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_C) \cdot E_g \cdot \hbar\omega} \left\{ \frac{2}{b} (\varepsilon_C - \varepsilon_D + \hbar\omega) \left[\arctg(\exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))) - \arctg(\exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D))) \right] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2a} \left[\exp(-a(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)^2) - \exp(-a(\varepsilon_V - \varepsilon_D)^2) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\alpha = \frac{A \cdot g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_V) \cdot E_g \cdot \hbar \omega} \left\{ \frac{2}{b} (\varepsilon_D - \varepsilon_V + \hbar \omega) \left[\arctg \left(\exp(b(\varepsilon_C - \varepsilon_D)) \right) - \arctg \left(\exp(b(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar \omega)) \right) \right] - \frac{1}{2a} \left[\exp(-a(\varepsilon_C - \varepsilon_D)^2) - \exp(-a(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar \omega)^2) \right] \right\} \quad (4.27)$$

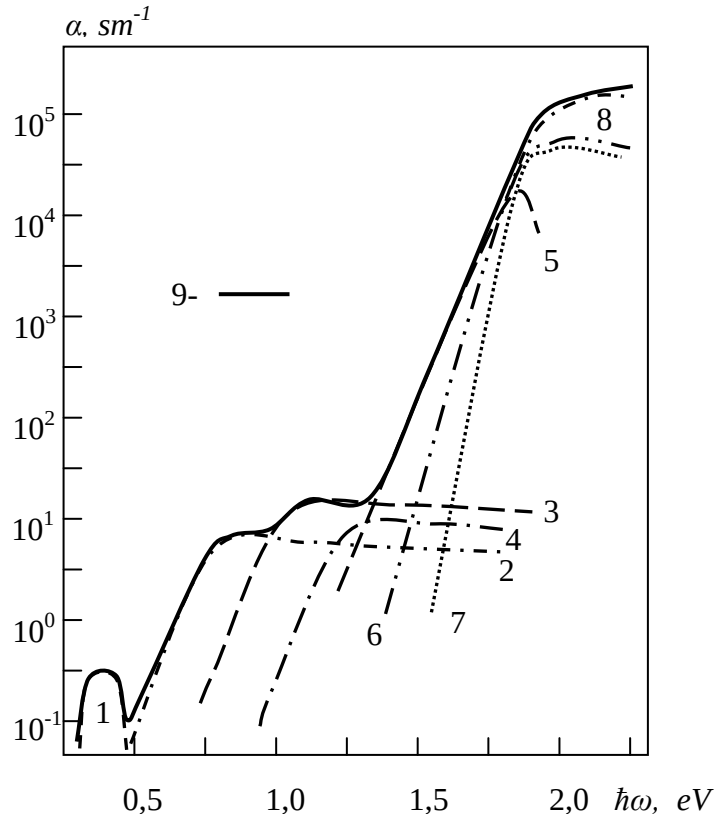
ko'rinishlarda bo'lishi aniqlandi. 3,5-rasmda (3.26) va (3.27) spektrlarni hisoblash natijalari keltirilgan. (3.20) ÷ (3.23) formulalarni hisoblashdan olingan spektral xarakteristikalar ham 3.5-rasmdagidan deyarli farq qilmadi. Spektrlarni nazariy tahili asosida:

- ruxsat etilgan zonalaridagi holatlar zichliklari energiyaga darajali taqsimot bilan bog'lansa, nuqsonlarda yutilish koeffitsientining spektral xarakteristikasida tajribalarda olingan aniq maksimumlar hosil bo'lmasligi;
- yutilgan fotonlarni energiyalari $\hbar\omega = \varepsilon_C - \varepsilon_D$ va $\hbar\omega = \varepsilon_D - \varepsilon_V$ larga teng bo'lganda spektral xarakteristika kuchsiz maksimumga ega bo'lishi;
- nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi maksimumining qiymati ortsa yoki kamaysa, spektral xarakteristika mos ravishda yuqoriga yoki pastga paralell ko'chishi xulosalari kelib chiqdi.

Nuqsonlardagi holatlar ishtirok etuvchi elektron o'tishlarini rejalashtirilgan maqsad bo'yicha hamma turlari qarab chiqildi. 3.6-rasmda psevdolegirlangan *a-Si:H* qatlamlarida yutilish koeffitsientining spektral xarakteristikasining ruxsat etilgan zonalaridagi holatlar zichligini energiyaga bog'lanishi o'zgarmas bo'lganda, barcha turdagi elektron o'tishlari uchun olingan formulalarning hisoblash natijalari keltirildi. Agar e'tibor berilsa, kichik energiyali fotonlar uchun asosiy rol ni nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalaridagi holatlar orasidagi elektron



3.5-rasm. Ruxsat etilgan zonalaridagi elektron holatlarini energiyaga bog'lanishi chiziqli bo'lganda nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalar orasida elektron o'tishlarini spektral xarakteristikasi. 1-valent zonadan nuqsonlarga o'tishlar. 2-nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishlar. 3-tajriba natijalari.



3,6-rasm. Psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ qatlamlarida ruxsat etilgan zonalardagi holatlar zichligi o'zgarmas bo'lgan hol uchun nuqsonlardagi holatlar ishtirok etuvchi barcha turdagi elektron o'tishlarining umumiy spektral xarakteristikasi (9). 1- $D_B \rightarrow D^0$, 2- D^- dan o'tkazuvchanlik zonasiga, 3-valent zonadan D^0 ga, 4- D^0 dan o'tkazuvchanlik zonasiga, 5-valent zona «dumi»dan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga, 6-valent zona «dumi»dan o'tkazuvchanlik zonasiga, 7-valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasi «dumi»ga, 8-ruxsat etilgan zonalararo o'tishlar.

o'tishlari o'ynashiga ishonch hosil qilish qiyin emas. Shu bilan birga, bu rasmda yutilgan fotonlarni energiyalari harakatchanlik tirqishi kengligi-dan kichik bo'lganda, ruxsat etilgan zonalarning dumlari ishtirokidagi elektron o'tishlari uchun umumiy yutilish koeffitsientini qiymatlari ham keltirilgan. Bu $\hbar\omega < 1,4$ eV oraliqda nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirok etuvchi optik o'tishlar haqiqatdan ham asosiy rolni o'ynashi aniqlandi. Ammo, 1.3-rasmda psevdolegirlangan *a-Si:H* ning nuqsonlarda yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikalarining aynan shu soha-sida, ulardan ba'zilari aniq maksimumga erishganligi keltirilgan. Bunday nomuvofiqlik sababi navbatdagi bo'limda o'rganiladi.

3.4. Nuqsonlardagi elektron holatlar ishtirokidagi yutilish koeffitsienti spektrlarining ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlar zichliklari funktsiyalari ko'rinishlariga bog'liqligi

Oldingi bo'limlarda fotonlarni nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirokidagi yutilishlarning spektral xarakteristikalari keltirilib chiqarildi. Hisoblashlar natijasida nuqsonlardagi holatlar ishtirok etuvchi yutilish turlari ichida asosiy rolni nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasiga yoki valent zonadan nuqsonlarga elektronlarni optik o'tishlari bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsientining qiymatlari o'ynashi aniqlandi. Bu bo'limda yutilish koeffitsienti spektral xarakteristika-sining ko'rinishini nuqsonlardagi va ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlari zichliklari funktsiyalariga bog'lanishlari qarab chiqiladi. Nuqsonlardagi holatlar zichligining maksimal qiymatini o'zgarishi ya'ni, nuqsonlar kontsentratsiyasini ortishi, nuqsonlarda yutilish koeffitsienti-ning qiymatlarini ortishiga olib keladi. Bu xossani albatta tajriba natijalari ham tasdiqlaydi. Nuqsonlardagi holatlarni maksimal qiymatini aniqlovchi (ε_D) energiyani o'zgarishi ham yutilish koeffitsienti qiymatlarini o'zgarishiga olib kelishi mumkinligini hisoblashlar ko'rsatdi. Nuqsonlarni energetik o'rni ruxsat

etilgan zonalaridan uzoqlashganda yutilish ko'effitsientining maksimum qiymati kichik, aks holda katta bo'lishi kuzatildi.

Nuqsonlarni holat zichligida b parametrni o'zgarishi ham yutilish ko'effitsienti spektral xarakteristikasini o'zgarishiga olib kelishi aniqlandi. Ammo bu o'zgarish faqat kichik energiyali fotonlar sohasiga tegishli bo'ldi, katta energiyali fotonlar sohasi deyarli o'zgarmay qoldi.

3.5-3.6-rasmlardan ko'rinadiki nuqsonlardagi holatlar zichligi funktsiyasini aniqlovchi parametrlarni o'zgarishi, umuman olganda nuqsonlarda yutilish ko'effitsientining spektral xarakteristikasining aniq maksimumga ega bo'lishini ta'minlay olmaydi. Ammo, nuqsonlarda yutilish ko'effitsientini turli namunalarda uchun tajribalarda olingan spektral xarakteristikalari (ayniqsa ularni o'stirishni texnologik parametrlari o'zgarganda) bu rasmlardagidan katta farq qiladi. 1.3-rasmda psevdolegirlangan $a\text{-Si:H}$ namunalari uchun nuqsonlarda yutilish ko'effitsientining spektral xarakteristikalari keltirilgan. Ularni solishtirishdan bitta savol tug'iladi. Namuna psevdolegirlangan bo'lganligi uchun, ularni barchasida nuqsonlarni parametrlarini (kontsentratsiyasi, energetik o'rni va boshqalar) o'zgarishi yutilish ko'effitsientining spektral xarakteristikasini ko'rinishini o'zgartirmasligi kerak edi. Nima uchun 1.3-rasmdagi yutilish ko'effitsientining spektral xarakteristikasini nuqsonlarda yutilish sohasi bir-biridan katta farq qiladi?

Bu farq ruxsat etilgan zonalaridagi holatlar zichliklarini energiyaga bog'lanishlari bilan tushuntirildi. Ma'lumki, valent va o'tkazuvchanlik zonalaridagi holatlar zichligini energiyaga bog'lanishi juda murakkab. Ular bir nechtdan maksimum va minimumlarga ega bo'ladi. Buni hisobga olgan holda ruxsat etilgan zonalarining chegaralaridagi holatlar ham Gauss yoki giperbolik sekans taqsimot funktsiyalariga bo'ysunadi

$$g(\varepsilon) = g(\varepsilon_c) \exp\left(-a(\varepsilon - \varepsilon_c)^2\right) \approx g(\varepsilon_c) \frac{1}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_c))},$$

deb, nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasiga optik o'tishlar uchun yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikasini Kubo-Grinvud formulasidan hisoblanganda quyidagi natija olindi:

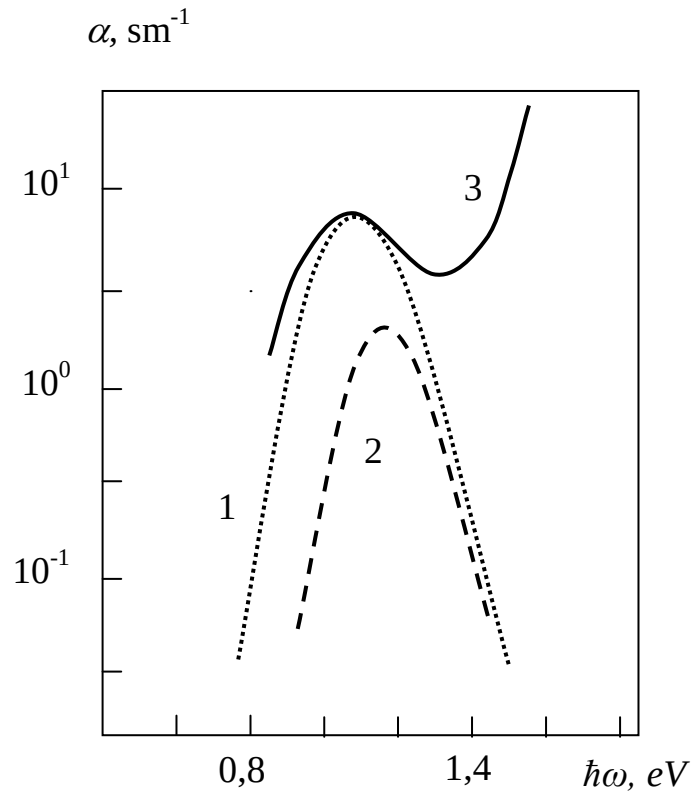
$$\alpha = \frac{A \cdot g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_V) b \cdot \hbar \omega \cdot \text{sh}(b(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar \omega))} \times \ln \left[\frac{1 + \left(\frac{g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_C)} \right)^2 + 2 \left(\frac{g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_C)} \right) \text{ch}(b(\varepsilon_C - \varepsilon_D))}{1 + \left(\frac{g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_C)} \right)^2 + 2 \left(\frac{g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_C)} \right) \text{ch}(2\hbar \omega - \varepsilon_C - \varepsilon_D)} \right], \quad (3.28)$$

xuddi shunday valent zonadan nuqsonlardagi holatlarga o'tishlar uchun

$$\alpha = \frac{A \cdot g(\varepsilon_D)}{g(\varepsilon_C) b \cdot \hbar \omega \cdot \text{sh}(b(\varepsilon_D - \varepsilon_V - \hbar \omega))} \times \ln \left[\frac{1 + \left(\frac{g(\varepsilon_V)}{g(\varepsilon_D)} \right)^2 + 2 \left(\frac{g(\varepsilon_V)}{g(\varepsilon_D)} \right) \text{ch}(b(\varepsilon_D - \varepsilon_V))}{1 + \left(\frac{g(\varepsilon_V)}{g(\varepsilon_D)} \right)^2 + 2 \left(\frac{g(\varepsilon_V)}{g(\varepsilon_D)} \right) \text{ch}(2\hbar \omega - \varepsilon_D - \varepsilon_V)} \right] \quad (3.29)$$

ifoda olindi. Bunda valent va o'tkazuvchanlik zonasi chegarasiga taqsimot-ning maksimumini mos kelishi talab qilindi. (3.28) va (3.29) spektrlarni hisoblash natijalari 3.7-rasmda keltirildi. Rasmdan ko'rinadiki, faqat shu holdagina nuqsonlarda yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikasi aniq maksimumga ega bo'ladi.

Hisoblashlardan $(\varepsilon_C - \varepsilon_D)$ va $(\varepsilon_D - \varepsilon_V)$ kattaliklarni qiymati o'zgarganda spektrdagi maksimumlarni energetik o'rnini siljishi va bu spektral xarakteristikalar bir-biriga o'xshagan ikkita egri chiziqdan iborat bo'lishi aniqlandi. Tadqiqotlar nuqsonlarda yutilish koeffitsienti spektrlarining ko'rinishi, valent yoki o'tkazuvchanlik zonasi chegarasidagi elektron holatlarini taqsimotidan aniqlanishini ko'rsatdi.



3,7-rasm. Ruxsat etilgan zonalaridagi elektron holatlarining zichligi Gauss yoki giperbolik sekans ko'rinishdagi taqsimotga ega bo'lganda, elektronlarni nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalar orasidagi optik o'tishlari bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikalar [32]. 1-valent zonadan nuqsonga, 2-nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasiga. 3-tajriba natijalari.

3 bob uchun xulosalar

1. Psevdolegirlangan α -Si:H struktura to'ridagi uzilgan bog'lanishlarning (nuqsonlar) elektron holatlari ishtirok etuvchi barcha optik o'tishlar uchun Kubo-Grinvud formulasidan Devis-Mott yaqinlashish usulida yutilish koeffitsienti spektrlarining analitik ifodalari keltirib chiqarildi.
2. Nuqsonlardagi holatlar ishtirok etuvchi optik o'tishlarning yutilish koeffitsientining qiymatini asosan nuqsonlar bilan ruxsat etilgan zonalar orasidagi optik o'tishlar aniqlashi, valent va o'tkazuvchanlik zonalari chegarasidagi elektron holatlari taqsimoti darajali bo'lganda nuqsonlarda yutilish spektrlarda aniq maksimumlar hosil bo'lmasligi ko'rsatildi.
3. Nuqsonlarda yutilish koeffitsienti spektrlarida aniq maksimumlar faqat ruxsat etilgan zonalarda aniq maksimumlar bo'lgandagina hosil bo'lishi ko'rsatildi.
4. Nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalarning eksponentsial «dum»laridagi orasidagi optik o'tishlarining spektrlari eksponentsial ko'rinishda bo'lishi aniqlandi.

OLINGAN ASOSIY XULOSA VA NATIJALAR

1. Hidrogenizatsiyalangan amorf kremniyda fotonlarni yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikalarini tadqiq qilishda, uni yutilgan fotonlarni energiyasiga, elektronlarni optik o'tish turlariga qarab sohalarga ajratib olish kerakligi ko'rsatildi.
2. Yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikasini Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra Kubo-Grinvud formulasidan hisoblashda undagi integralni yutilgan fotonlarni energiyasiga bog'liq bo'lgan elektronlarni optik o'tish turlariga mos komponentalarga ajratish shartlari aniqlandi.
3. Elektronlarni uzilgan bog'lanishlar hosil qiluvchi elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlarning barcha turlari uchun tajribalardan olinadigan natijalarga mos keluvchi partsial yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikalari keltirib chiqarildi.
4. Nuqsonlar hosil qiluvchi elektron holatlari ishtirok etuvchi optik o'tishlarning yutilish koeffitsienti spektral xarakteristikalarining ko'rinishini ruxsat etilgan zonalaridagi elektron holatlari zichligi taqsimoti aniqlashi ko'rsatildi.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI

1. Zaynobidinov S., Ikramov R.G., Jalalov R.M., Nuritdinova M.A., Xolmirzaev O.T. Spektri mejzonogo poglosheniya i opticheskaya uzel amorfniy poluprovodnikov. Uzbek journal of Physics, 2013, Vol. 15, № 5, pp. 52-57.
2. Ikramov R.G., Jalalov R.M., Abdulazizov B.T., Xolmirzayev O.T., Ortiqova M. Amorf yarim o'tkazgichlardanuqsonlarni energetik o'rni va optik yutilish koeffitsenti spektrlari. "Yarimo'tkazgichlar fizikasi va qurilmalari hamda ularni o'qitishning muammolari" hududiy ilmiy anjumani materiallari. Namangan, 2013, 71-72 b.
3. Zaynobidinov S., Ikramov R.G., Jalalov R.M., Xolmirzayev O.T., Boyto'rayeva G. Amorf yarimo'tkazgichlarda yutilish koeffitsienti spektri va elektron holatlari zichligi taqsimoti "Zamonaviy fizikaning dolzarb muammolari" respublika ilmiy-nazariy anjumani materiallari. Termiz, 2013, 136-138 b.
4. Zaynobidinov S., Nuritdinova M.A., Jalalov R.M., Xolmirzaev O.T., Kurbonov M. Spektri defektnogo poglosheniya amorfniy poluprovodnikov. IV mejdunarodnaya konferentsiya po aktualnim problemam molekulyarnoy spektroskopii kondensirovannix sred, Samarkand, 2013. 118-119 b.
5. Zaynobidinov S., Jalalov R.M., Xolmirzaev O.T., Abdulazizov B.T. Obrazovaniya maksimumov v spektrax defektnogo poglosheniya amorfniy poluprovodnikov. IV mejdunarodnaya konferentsiya po aktualnim problemam molekulyarnoy spektroskopii kondensirovannix sred, Samarkand, 2013. 116-117 b.
6. Ikramov R.G., Nuriddinova M.A., qaxxarov S., Jalolov R.M., Xolmirzaev O.T., Ortiqov E. A. Amorf yarimo'tkazgichlarda $\hbar\omega \geq E_g$ energiyali fotonlar uchun optik yutilish spektrlaridan elektron holatlari taqsimotini hisoblash usuli. "Kondensatsiyalangan muhitlar fizikasi va materialshunoslikning dolzarb masalalari" Respublika ilmiy – amaliy anjumani materiallari, Farg'ona, 2014. 72-75 b.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI.

1. Djounopulos Dj., Lyukovski Dj. Fizika gidrogenizirovannogo amorfno kremniya. -Moskva.: Mir, vip. 1,1987.- 286 s.
2. Mott N., Devis E., Elektronnie protsessi v nekristallicheskix veshchestvax.- Moskva.: Mir, 1982.-652 s.
3. Brodski M. Amorfnie poluprovodniki. – Moskva: Mir, 1982. – 419 s.
4. Andreev A.A., SHlimak I.S. Fotoelektricheskie yavleniya v amorfnom gidrirovannom kremnii i preobrazovateli solnechnoy energii. V knige «Trudi FTI AN SSSR im. A.F. Ioffe». -1984. -S. 222-252.
5. Yamasaki S., Oheda H., Matsuda A., Okushi H., Tanaka K. Gap-state profiles of a-Si:H dedused from below-gap optical absorption // J. Jour. of Appel. Phisics. –New York,1982. -Vol. 21. -No. 9. -pp. L539-L541.
6. Gelmont B.L., Perel V.I., YAssievich I.N. O pravile Urbaxa // Fizika Tverdogo Tela.-Sankt-Peterburg,1983. -T. 25. -V. 3. -S. 727-733.
7. Lanyon H.P. Electrical and optical properties of vitreous selenium. // Phys. Rev. - New York,1963. –V. 130.-№ 1. -P. 134-138.
8. Kocka J., Vanecek M., Schauer F. a-Si:H gap states investigated by CPM and SCLC // J. non-cryst. Solids. - North-Holland,1987. –V. 97-98. pt 1. -P. 715-722.
9. Okushi H., Tokumaru Y., Yamasaki S. Energy dependence of electron-capture cross section of gap states in n-type a-Si:H. // Phys. Rev. B. 1982. V 25. N 6. P. 4313-4316.
10. Vavilov V.S. Deystvie izlucheniya na poluprovodniki. M.: Fizmatgiz., 1963. – 72 s.
11. Fistul V.I. Vvedenie v fiziku poluprovodnikov. - M.: Visshaya shkola, 1984.- 352 s.

12. Ikramov R.G. a-Si:H pardalarida zonalararo yutilish koeffitsientini tadqiq qilish. // II Respublika ilmiy nazariy konferentsiya: Hozirgi zamon fizikasining dolzarb muammolari. – Termiz, 2004. - 26-27 b.
13. Malainho, E., Vasilevskiy, M. I., Alpuim, P. Filonovich, et al. Dielectric function of hydrogenated amorphous silicon near the optical absorption edge. // Journal of Applied Physics. 2009. -Vol.106. Issue 7. -P. 2731-2735.
14. Esteban, R.; Laroche, M.; Greffet, J. J Dielectric gratings for wide-angle, broadband absorption by thin film photovoltaic cells // Applied Physics Letters. 2010. -Vol.97. Issue 22. -P.2211-2214.
15. A.A.Ayvazov, B.G.Budyagan, O.N.Stanovov Metodika kompleksnogo issledovaniya opticheskix i elektrofizicheskix svoystv neuporyadochennix poluprovodnikov. // Zavodskaya laboratoriya, 1992 g, Vip.1. s. 54-56.
16. Willekens J., Brinza M., Gungor T. et al. Optical spectroscopy of the density of gap states in ETP-deposited a-Si:H.// J. non- cryst.Solids. 2004. – № 338-340. – P. 313-316.
17. Kazanskiy A.G., Terukov E.I., Forsh P.A. i dr. Osobennosti fotoelektricheskix i opticheskix svoystv plenok amorfnogo gidrogenizirovannogo kremniya, poluchennix plazmoximicheskim osajdeniem iz smesi monosilana s vodorodom.. // FTP.- Sankt-Peterburg, 2011. - T. 45. - № 4. –S. 452-455.
18. Vaynshteyn I.A., Zatsepin A.F., Kortov V.S. Osobennosti proyavleniya pravila Urbaxa v stekloobraznix materialax. // Fiz. i ximiya stekla, 1999. - T. 25. № 1. – S.53-58.
19. Vaynshteyn I.A., Zatsepin A.F., Kortov V.S. i dr. Pravilo Urbaxa v steklax PbO-SiO₂ // FTT. 2000. -T. 42. -№ 2. -S. 224 - 229.
20. Vanecek M., Abraham A., Stika O. et al. Gap states density in a-Si:H deduced from sub-gap optical absorption measurement on Schottky solar cells. // Phys. Stat. Sol. (a). 1984. –V. 83. -P. 617-623.

21. Golikova O.A., Kazanin M.M., Ikramov R.G. Light-induced defects in *a-Si:H*. // J. non-cryst. Solids. 1993. –V.164-165. -P.395-399.
22. Salem A.M. Optikal constants and associated functions of CGa_2Se_4 thin filmis. // J. Phys.D. 2003. – V. 36. – №. 8. – P. 1030-1035.
23. Bonch-Bruevich V.L., Zvyagin I.P. Elektronnaya teoriya neuporyadechennix poluprovodnikov. M.: Nauka, 1981.
24. Ikramov R.G. Mexanizmi elektronnix perexodov v plenkax amorfnogo gidrogenizirovannogo kremniya. // Materiali mejd. konf.: Fotoelktricheskie i opticheskie yavlenii v poluprovodnikovix strukturax. Fergana, 2006. -s. 121-122.
25. Djounopulos Dj., Lyukovski Dj. Fotoemissiya i opticheskie svoystva kremniya. M.: Mir, 1988.
26. Djalilov N.Z., Damirov G.M. Poglouenie i spektri opticheskix parametrov v amorfnix tverdix rastvorax sistemi Se-S. // FTP- Sankt-Peterburg, 2011. -T. 45. -№ 4.
27. Meden A., SHo M. Fizika i primeneniye amorfnix poluprovodnikov. - M.: Mir, 1991. – s.156 s.
28. Davis E.A., Mott N.F. Conduction in Non-crystalline Systems. // Phil. Mag. - 1970. – V.22. - № 179. - P. 903-922.
29. Vaynshteyn I.A., Zatsepin A.F., Kortov V.S. «O primenimosti empiricheskogo sootnosheniya Varshni dlya temperaturnoy zavisimosti shirini zaprezhennoy zoni» // FTT, 1999. -T. 41, -№ 6. -S. 994 - 998.
30. AF. Meftah, AM. Meftah, and A. Belghachi, Computer simulation of the *a-Si:H p-i-n* solar cell performance sensitivity to the free carrier's mobilities, the capture cross sections and the density of gap states // J. Phys.:Condens. Matter, 2006. –V.18. –P.9435-9446.
31. Zaynobidinov S., Ikramov R.G', Jalolov R.M., Nuritdinova M.A. Lokallashmagan holatlar zichligi va zonalararo optik yutilish spektrlari//

Materiali konferentsii. Posvyayatsya «Godu fiziki-2005», Fizika v Uzbekistane.- Tashkent, 2005.-C.76.

MINNATDORCHILIK!!!

Ushbu dissertatsiya ishini bajarishimda yaqindan yordam bergan ustozim R. G'. Ikramovga va natijalarni tahlil etishda o'z yordamlarini ayamagan NamDU "Fizika" kafedrasining barcha a'zolariga o'z minnatdorchiligimni bildiraman.