

NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH

NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

XOLMIRZAYEV OYBEK TO‘RAMIRZAYEVICH

**AMORF KREMNIYNING NUQSONLARDA YUTILISH SPEKTRLARI VA
ELEKTRON HOLATLAR ZICHLIGI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Namangan-2025

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
физика-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on
physical-matematical sciences**

Xolmirzayev Oybek To'ramirzayevich

Amorf kremniyning nuqsonlarda yutilish spektri va nuqsonlardagi elektron holatlar zichligi..... 3

Холмирзаев Ойбек Турамирзаевич

Спектры поглощения и электронная плотность состояний аморфного кремния при дефектах..... 23

Xolmirzayev Oybek To'ramirzayevich

Absorption spectra and electronic states density in defects of amorphous silicon..... 43

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 47

NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH

NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

XOLMIRZAYEV OYBEK TO‘RAMIRZAYEVICH

**AMORF KREMNIYNING NUQSONLARDA YUTILISH SPEKTRLARI VA
ELEKTRON HOLATLAR ZICHLIGI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Namangan-2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalari vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/FM615 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Namangan muhandislik-texnologiya institutida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasiga (www.namnti.uz) va Ziyonet Axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Ikramov Rustamjon G'ulomjonovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Gulyamov Gofurjon
fizika-matematika fanlari doktori, professor,

Rasulov Rustam Yavkachovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Urganch davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Namangan muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil "1" 02 soat 12⁰⁰ da majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz, Namangan muhandislik-texnologiya instituti 3-bino, 2-qavat, ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan muhandislik-texnologiya institutiining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (354 raqam bilan ro'yxatga olingan.) Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel: (99869) 225-10-07.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil "23" 01 da tarqatildi.
(2025 yil "23" 01 da № 21 raqamli reestr bayonnomasi.)



U.I. Erkaboyev
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
raisi, f.-m.f.d., professor

A.A. Abdugarimov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
ilmiy kotibi, PhD, dotsent

N.Yu. Sharibayev
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi,
f.-m.f.d., professor

Kirish (falasfa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda bugungi kunda amorf gidrogenizatsiyalangan kremniy (a-Si:H) dan displeylar uchun aktiv matrisalar, yupqa plyonkali tranzistorlar, fotodiodlar va getero o'tishli quyosh elementlari ishlab chiqarilmoqda. Yupqa plyonkali amorf nitrid kremniydan (a-SiN) getero o'tishli quyosh elementlari, fotodiodlar va tranzistorlarni ishlab chiqarishda amorf yarimo'tkazgichlarni roli juda katta hisoblanadi. Shuning uchun ham amorf yarimo'tkazgichlarning optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalari, elektrik va optik xossalari, ulardagi elektron holat zichligi keng ko'lamda o'rganilmoqda. Hozirgi paytda amorf yarimo'tkazgichlarni optik yutilish koeffitsiyenti spektrini nazariy usulda hisoblash uchun, bir nechta elektron holatlari zichligi taqsimotini empirik modellaridan foydalaniladi. Bu borada maqsadli ilmiy tadqiqotlarni olib borish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda amorf yarimo'tkazgichlarning nuqsonlarida optik yutilish koeffitsiyentini spektri va elektron holatlar zichligi taqsimotini o'rganish borasida ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu borada maqsadli ilmiy tadqiqotlarni jumladan, quyidagi yo'nalishlarda izlanishlar olib borish muhim vazifalardan hisoblanadi: elektronlarni nuqsonlardagi holatlar ishtirokidagi optik o'tish turlarini aniqlash; nuqsonlarda yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini nuqsonlarni energetik o'rni; nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini aniqlash muhim muammolardan biri hisoblanadi.

Mamlakatimizda fundamental tadqiqotlarni dolzarb ilmiy yo'nalishlariga e'tibor sezilarli darajada kuchaytirildi, xususan yarimo'tkazgichlarning amorf kremniydagi optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini hisoblash imkoniyatlari ochib berildi. O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirishning "O'zbekiston-2030" strategiyasida "Yashil iqtisodiyotga o'tish, uning asosi bo'lgan qayta tiklanuvchi energiyalardan foydalanish ko'rsatkichlarini keskin oshirish"¹ bo'yicha muhim vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda ilmiy-tadqiqot yutuqlarini rag'batlantirish va joriy etishning samarali mexanizmlarini yaratish masalalariga alohida e'tibor qaratish, shu jihatdan yarimo'tkazgichli asboblarda kechayotgan fizik jarayonlarni amaliyotga tatbiq etish natijasida gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarga xos bo'lgan barcha elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlar va nuqsonlardagi elektron holatlari zichligining taqsimoti bilan yutilish koeffitsiyenti spektri orasidagi bog'lanishlar haqidagi tasavvurlarni chuqurlashtirish juda muhim hisoblanadi.

Mazkur dissertatsiya ishida olib borilgan ilmiy-tadqiqot ishlari O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmoni, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-sonli «Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i, energetika mahsulotlariga

¹ O'zbekiston respublikasi Prezidentining 2023 yil 11-sentabrdagi PF-158-son "O'zbekiston-2030" strategiyasi to'g'risidagi Farmoni

qaramligini kamaytirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi qarori, hamda 2021 yil 19 martdagi PQ–5032 -son «Fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida»gi qarorlari va mazkur faoliyatga tegishli boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishi ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining II: «Energetika, astronomiya, energetika, mashinasozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika» ustuvor yo‘nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi., Tanaka, Devis, Mott, Taus va boshqa mualliflarning nazariy ishlarida gidrogenizatsiyalangan amorf kremniyning ruxsat etilgan zonalar chegaralaridagi elektron holatlari zichligini taqsimoti chiziqli yoki parabolik ko‘rinishda bo‘lishi ko‘rsatilgan. Bu taqsimotlardan foydalanib, mualliflar tomonidan harakatchanlik tirqishi kengligidan katta energiyali fotonlar yutilganda Kubo-Grinvud formulasidan optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalari aniqlangan. Spektrlarning analitik yechimlari kvadratik va kubik bog‘lanishga ega bo‘lgan. Bu bog‘lanishlar faqatgina elektronlarni ruxsat etilgan zonalararo optik o‘tishlari uchun olingan tajriba natijalarinigina tushuntira olgan. Chunki bu ishlarda katta energiyali fotonlar yutilganda, ruxsat etilgan zonalararo optik o‘tishlar bilan bir vaqtning o‘zida, ruxsat etilgan zonalar va ularni «dum»laridagi elektron holatlari orasidagi optik o‘tishlar inobatga olinmagan va Kubo-Grinvud formulasidagi integralni aniq integral ko‘rinishda yozilmaganligi uchun optik yutilish spektrlarni xususiy yechimlari aniqlanmagan. Shu bilan birga bu taqsimot funksiyalari aniq ko‘rinishga ega bo‘lmaganligi uchun spektrlardagi ba’zi parametrlarning qiymati qanday aniqlanishi haqida aniq ma’lumot berilmagan.

Hozirgi vaqtda gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo‘tkazgichlar harakatchanlik tirqishida joylashgan elektron holatlari zichligining taqsimoti uchun turli modellar taklif qilingan. Bu modellarda ruxsat etilgan zonalar dumlaridagi lokallashgan elektron holatlarining energiyaga bog‘lanishi eksponensial ko‘rinishga ega. Urbax, Yamasaki, Kulik, Brodskiy va Andreyevlarning ishlarida elektronlarni lokallashgan holatlar ishtirokidagi optik o‘tishlarning spektrlari uchun Urbax qoidasining bajarilishi ko‘rsatilgan. Ammo bu ishlarda ham harakatchanlik tirqishi kengligidan kichik energiyali fotonlar uchun, lokallashgan holatlar orasidagi optik o‘tishlar bilan birga, lokallashgan va lokallashmagan holatlararo o‘tishlarning 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‘lanishi Gauss taqsimot funksiyasi ko‘rinishida yoziladi. Gauss taqsimotini integrallab analitik yechimni olish mumkin bo‘lmaganligi uchun, hozirgacha nuqsonlarda yutilish koeffitsiyenti spektrlari uchun aniq analitik yechim olinmagan.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Ilmiy tadqiqot ishi Namangan muhandislik-texnologiya instituti ilmiy-tadqiqotlari rejasi asosida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo‘tkazgichlarga xos bo‘lgan nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirokidagi optik o‘tishlari uchun yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarining analitik ifodalarini fizik asoslash va bu spektrlardan foydalanib nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo‘tkazgich namunalarida fotonlarni fundamental yutilish sohasi uchun tajribalardan aniqlangan zonalararo yutilish koeffitsiyenti spektri bilan analitik keltirib chiqarilgan formuladan hisoblangan natijalarni solishtirish orqali namunaning analitik ifodadagi harakatchanlik tirqishining energetik kengligi va proporsionallik koeffitsiyentini aniqlash;

eksponensial yutilish spektri uchun tajribadan olingan natijalar bilan shu spektr uchun analitik hisoblangan formuladan olingan hisoblash natijalarini solishtirish orqali ruxsat etilgan zonalarning eksponensial dumlari egriligini aniqlovchi parametrlarni aniqlash;

elektronlarni uzilgan bog‘lanishlar (nuqsonlar, legirovchi kirishmalar) hosil qiluvchi holatlar ishtirok etuvchi barcha optik o‘tishlar uchun Kubo-Grinvud formulasidan nuqsonlarda yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini keltirib chiqarish va spektrning nuqsonlarda yutilish sohasi uchun aniqlangan tajriba natijalarini tushuntirish.

Amorf gidrogenizatsiyalangan kremniyni tajribadan aniqlangan nuqsonlarda yutilish spektridan foydalanib nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlash.

Tadqiqot ob’yekti gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo‘tkazgichlarni optik yutilish koeffitsiyenti spektrlaridan iborat.

Tadqiqotning predmeti yorug‘lik yutilishi jarayonlarining xususiyatlari va ularning spektrlarini gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo‘tkazgichlarda shakllanishi.

Tadqiqotning usullari Devis-Mott yaqinlashish usulida Kubo-Grinvud formulasini hisoblash.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo‘tkazgichlarning optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini Kubo-Grinvud formulasi yordamida Devis-Mott yaqinlashish usuli bilan nuqsonlarda yutilish spektrlarini hisoblash imkoniyati ochib berilgan;

birinchi marta nuqsonlarda yutilish spektri uchun yoziladigan Kubo-Grinvud formulasidagi integralni aniq integral ko‘rinishida yozib, bu formulani yutilgan fotonlarni energiyasiga bog‘liq holda, ajratib yozish usuli taklif qilingan;

birinchi marta nuqsonlar (uzilgan bog‘lanishlar)da yutilish koeffitsiyenti spektrlarini analitik ifodalari keltirib chiqarilgan va bu spektrni qiymatlari ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlari zichligi taqsimoti bilan aniqlanishi ko‘rsatilgan;

ilk bora amorf gidrogenizatsiyalangan kremniyni tajribalardan aniqlangan nuqsonlarda yutilish spektridan foydalanib, nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlash usuli taklif qilingan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

amorf yarimo'tkazgichlar nuqsonlarda yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini Devis-Mott yaqinlashish usuli bilan Kubo-Grinvud formulasi yordamida elektronlarning optik o'tishlarini sohalarga va turlarga ajratilib gidrogenizatsiyalangan amorf kremniyga xos bo'lgan barcha nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotlari va optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalari orasidagi bog'lanishlari aniqlangan;

nuqsonlarda yutilish spektrlari uchun yangi formulalar keltirib chiqarilgan va bu formulalar yordamida gidrogenizatsiyalangan amorf kremniyning nuqsonlaridagi elektron holatlari zichligini aniqlashning yangi usuli taklif qilingan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi: Yutilish koeffitsiyenti spektrlarini hisoblash natijalarining tajriba natijalariga mos kelishi va an'anaviy matematik hisoblash usullaridan foydalanilganligi bilan ta'minlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati amorf yarimo'tkazgichlarga xos bo'lgan barcha nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlar bilan yutilish koeffitsiyenti spektri orasidagi bog'lanishlar haqidagi tasavvurlarni kengaytirish imkonini berishdan iborat.

Gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarga xos bo'lgan barcha nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlar uchun yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini hisoblash uchun taklif qilingan usul optik xossalari yaxshilangan optoelektronika asboblarni yaratish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Amorf kremniyning nuqsonlarda yutilish spektrlari va nuqsonlardagi elektron holatlar zichligi uchun olingan natijalar asosida:

Gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini Kubo-Grinvud formulasi yordamida Devis-Mott yaqinlashish usuli bilan nuqsonlarda yutilish spektrlarini hisoblash imkoniyati ochib berilgan yangi usullaridan «Foton» aksiyadorlik jamiyatida amorf yarimo'tkazgichli optoelektron qurilmalar ishlab chiqarishda foydalanildi («O'zeltexsanoat» aksiyadorlik kompaniyasining 2024 yil 5 iyundagi 117-son ma'lumotnomasi). «Foton» aksionerlik jamiyatida olib borilgan ilmiy izlanishlarda ko'rsatilgan natijalar asosida namunalari ishlab chiqildi;

amorf kremniyning nuqsonlarda yutilish spektrlari va nuqsonlardagi elektron holatlar zichligi natijalaridan Malayziyaning "Putra" universiteti ION markazi ilmiy laboratoriyasida yangi turdagi organik quyosh elementlari (DSSC) ning fotoelektrik parametrlarini hisoblashda qo'llanilishi mumkinligi aniqlandi. Hisob-kitoblar tajriba natijalari bilan mos kelishi kuzatildi. (Malayziya respublikasi "Universiti Putra Malaysia". 2024-yi 15-avgustdagi Q.M.S 00794 (R) sonli ma'lumotnomasi) Natijada amorf yarimo'tkazgichli (fotodiod, fototranzistor, fototiristor va quyosh batareyasi) namunalari yasaldi va ularning tashqi muhit ta'sirini sezilarli darajada kamaytirish mumkin ekanligi aniqlandi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari jami 9 ta, jumladan 1 ta xalqaro va 8 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida maruza qilingan va muhokamadan o'tgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 16 ta ilmiy ish, shulardan O'zbekiston respublikasi Oliy attestatsiya kommissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta ilmiy maqola, jumladan 1 tasi Scopus ma'lumotlar bazasida kiritilgan xalqaro jurnallarda nashr qilingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 106 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida tadqiqotning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, ob'yekti va predmeti tavsiflangan, fan va tadqiqot usullarining dissertatsiya mavzusi bilan OTM da aniqlangan, ilmiy tadqiqot ishlarini bog'liqligi dissertatsiya bajarilgan rivojlanishni ustivor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning "**Adabiyotlar tahlili. Hidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini**" deb nomlangan birinchi bobida bu kungacha aniqlangan gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarga xos bo'lgan nuqsonlarni turlari, nuqsonlarda yutilish spektrlari va bu spektrlardan foydalanib nuqsonlarni konsentratsiyasini aniqlash usuli bayon qilingan. Amorf yarimo'tkazgichlarni optik yutilish spektrlari haqidagi ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning "**Amorf yarimo'tkazgichlardagi nuqsonlarda elektron holatlari ishtirokidagi optik yutilish spektrlari**" deb nomlangan ikkinchi bobida gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning struktura to'ridagi uzilgan bog'lanishlar yoki nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirok etuvchi optik o'tishlar bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsiyenti spektrlari tadqiq qilingan. Nuqsonlardagi elektron holatlari ishtirok etuvchi optik o'tishlarni beshta turga ajratib olish kerakligi ko'rsatilgan. Yutilish koeffitsiyentini spektral xarakteristikalarini hisoblashda Kubo-Grinvud formulasini yutilgan fotonlarni energiyasiga va elektronlarni optik o'tish turlariga moslashtirib olib nuqsonlararo, valent zona va uning dumi va nuqson, nuqson va o'tkazuvchanlik zonasi va uni hamda nuqson orasidagi elektronlarni optik o'tishlari uchun analitik yechimlar olingan.

Ma'lumki, gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarni harakatchanlik tirqishida joylashgan uzilgan bog'lanishlar hosil qiluvchi nuqsonlarni zaryadini holatiga qarab uchta turga ajratiladi. D^0 -neytral nuqson, D^0 holatga erkin elektron kelib joylashganda D^- -manfiy zaryadli yoki undan elektron chiqib ketganda D^+ -musbat zaryadli nuqsonlar hosil bo'ladi. Ba'zi bir gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning harakatchanlik tiriqishida D^- va D^+ turdagi nuqsonlar

holatlar ishtirokidagi optik o'tishlar uchun olingan natijalarni, mos ravishda donor yoki akseptor kirishma bilan legirlangan amorf yarimo'tkazgich namunalari uchun qo'llash mumkin bo'ladi. Adabiyotlarda milltilama gaz razryadida olingan, xususiyy *a-Si:H* laridagi D^+ , D^0 va D^- zaryadli nuqsonlarni energetik o'rinlari va konsentratsiyalari uchun $\varepsilon_{D^0}-\varepsilon_V \approx 0,78$ eV, $\varepsilon_{D^-}-\varepsilon_V \approx 0,5$ eV, $\varepsilon_{D^+}-\varepsilon_V \approx 1,28$ eV va $N_{D^0} = 4.5 \cdot 10^{15}$ sm⁻³, $N_{D^-} = 3 \cdot 10^{15}$ sm⁻³, $N_{D^+} = 3 \cdot 10^{15}$ sm⁻³ natijalar keltirilgan.

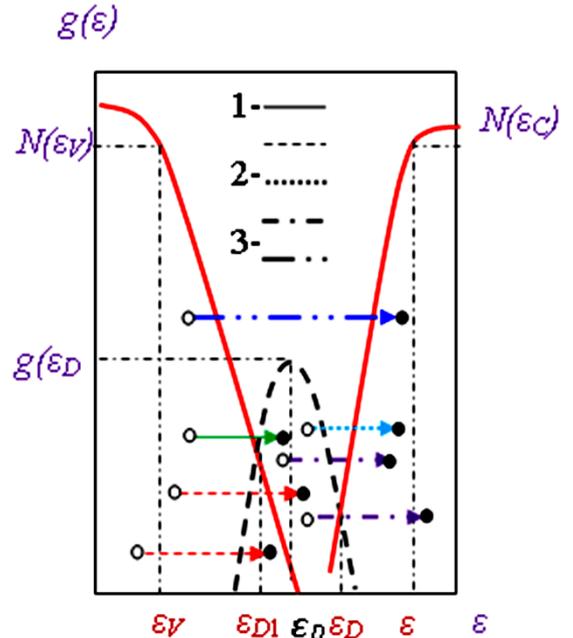
Ma'lumki, fotonlarni, ruxsat etilgan zonalar va ularni dumlaridagi elektron holatlari ishtirok etuvchi yutilishlarida, elektronlarni valent zona va uni dumidan nuqsonga hamda nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasi va uni dumiga optik o'tishlari yuz beradi. Yutilgan fotonlarni energiyasiga bog'liq ravishda, elektronlarni bu optik o'tish turlari 1- rasmida keltirilgan. 1-yutilgan fotonlarni energiyasi uchun $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V < \hbar\omega$ shart bajarilganda optik o'tishda ishtirok etuvchi elektronlar faqat valent zona dumidan nuqsonlarga, 2- $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V > \hbar\omega$ shart bajarilganda esa, elektronlar bir vaqtini o'zida valent zona dumidan va valent zonadan nuqsonga o'tadilar (1-rasm).

Yutilgan fotonlarni energiyasi uchun 3 - $\varepsilon_C-\varepsilon_{D2} > \hbar\omega$ shart bajarilganda fotonlar elektronlarni faqat nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga, 4 - $\varepsilon_C-\varepsilon_{D2} < \hbar\omega$ shart bajarilganda esa, bir vaqtini o'zida elektronlarni nuqsonlardan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga va o'tkazuvchanlik zonasiga optik o'tishlari sodir bo'ladi (1-rasm).

Odatda amorf yarimo'tkazgichlarni yutilish koeffitsiyenti spektrlarni Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra Kubo –Grinvud formulasidan hisoblanadi:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int \frac{g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon \quad (1)$$

Bu formuladagi A –yutilgan fotonlarni energiyasiga bog'liq bo'lmagan proporsianallik koeffitsiyenti, $g(\varepsilon)$ - optik o'tishda ishtirok etuvchi elektronlarni boshlang'ich va $g(\varepsilon + \hbar\omega)$ oxirgi holatlari zichliklari. Birinchidan (1) formuladan xususiyy yechimni aniqlash uchun undagi integralni aniq integral ko'rinishida yozish kerak. Ikkinchidan esa, bu formulani analitik yechimlarini aniqlash uchun ruxsat etilgan zonalar va ularni dumlaridagi, hamda nuqsonlardagi elektron holatlari taqsimotini bilish kerak. Amorf yarim o'tkazgichlarni optik yutilish koeffitsiyenti spektrlarini analitik hisoblash uchun elektronlar zichligi taqsimotlarini turli modellardan foydalaniladi. Bu modellarni deyarli barchasida ruxsat etilgan



1-rasm. Amorf yarimo'tkazgichlarda nuqsonlardagi holatlar ishtirokidagi elektronlarni optik o'tish turlarini yutilgan fotonlarni energiyasiga bog'lanishi.

- 1) $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V > \hbar\omega$ va 2) $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V < \hbar\omega$,
 3) $\varepsilon_C-\varepsilon_{D2} > \hbar\omega$ va 4) $\varepsilon_C-\varepsilon_{D2} < \hbar\omega$,
5-valent zona dumidan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o'tishlari

zonalaridagi elektron holatlari zichligi taqsimoti parabolik yoki chiziqli ularni dumlaridagi elektron holatlari zichligi taqsimoti esa eksponensial bo‘lishi ko‘rsatilgan. Buni hisobga olib, shu ishda ruxsat etilgan zonalar va ularni dumlaridagi elektron holatlari zichligi taqsimotlari uchun, quyidagi model taklif qilingan:

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1}, \quad n_1 = 1/2, 1 \quad \text{va} \quad g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \quad (2)$$

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g} \right)^{n_2}, \quad n_2 = 1/2, 1 \quad \text{va} \quad g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \quad (3)$$

Bu yerda $N(\varepsilon_V)$ – valent zonadagi va $N(\varepsilon_C)$ – o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligini effektiv qiymatlari, ε_V – valent zonaning yuqori chegarasi va ε_C – o‘tkazuvchanlik zonasining quyi chegarasi, β_1 – valent zonasining va β_2 – o‘tkazuvchanlik zonasining eksponensial dumlarini egriligini aniqlovchi parametrlar. n_1 – valent zonadagi elektron holatlari zichligi taqsimotini darajasi, n_2 – o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini darajasi.

Amorf yarimo‘tkazgichlarni nuqsonlaridagi elektron holatlari zichligi taqsimoti giperboliksekans:

$$g(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} = \frac{2g(\varepsilon_D)}{\exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D)) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} \quad (4)$$

yoki Gauss taqsimotiga:

$$g(\varepsilon) = g(\varepsilon_D) \exp(-a(\varepsilon - \varepsilon_D)^2) \quad (5)$$

bo‘ysunadi. Bu yerda b - va a – nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini effektiv yarim kengligini aniqlovchi parametrlar, ε_D – nuqsonlarni maksimumini energetik o‘rni, $g(\varepsilon_D)$ – nuqsonlardagi elektron holati zichligi taqsimotini maksimal qiymati.

(4) va (5) formulalar bilan aniqlanadigan taqsimotlar bilan chegaralangan nuqsonlarni konsentratsiyasi bir-biriga teng bo‘lishi uchun $a = \frac{b^2}{\pi}$ shart bajarilishi kerakligi ko‘rsatilgan.

Kubo-Grinvud formulasidagi integralni aniq integral ko‘rinishda $\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V < \hbar\omega$ shart uchun quyidagicha yozamiz:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D1} - \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1}} g(\varepsilon) g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (6)$$

Elektronlarni optik o‘tishda ishtirok etuvchi holat zichliklarini, (2) va (4) ifodalarini (6) formulaga qo‘yib quyidagi ifodani olamiz:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D1}-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D1}} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)} \times \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))(2b\hbar\omega + \ln \frac{(\exp(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D)) + 1)}{(\exp(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D + \hbar\omega)) + 1)}) \quad (7)$$

Bu formuladagi ε_{D1} – Valent zona dumidagi va nuqsonlardagi elektron holatlari taqsimotining kesishish nuqtasini energetik o‘rni (1 - rasm) va $B=AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)$.

Yuqoridagi formulani $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V > \hbar\omega$ shart bajarilganda yozish uchun elektronlarni optik o‘tishlariga moslashtirsak:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D1}-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D1}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_{D1}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_{D1}-\hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (8)$$

ifoda hosil bo‘ladi. Bu formuladagi α_1 – valent zona dumidan nuqsonga, α_2 - esa valent zonadan nuqsonga optik o‘tishlarini parsial spektrlari.

Elektronlarni valent zona dumidan nuqsonlarga optik o‘tishlar uchun:

$$\alpha_1 = A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_{D1}} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)\hbar\omega} \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V)) + \ln \frac{(\exp(2b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)) + 1)}{(\exp(2b(\varepsilon_{D1} + \varepsilon_D + \hbar\omega)) + 1)} \quad (9)$$

ifodani olamiz.

$n_1=n_2=1$ bo‘ladigan hol uchun:

$$\alpha_2 = A \int_{\varepsilon_{D1}-\hbar\omega}^{\varepsilon_V} N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right) \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{2Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)E_g\hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon_D + \hbar\omega) \times (\arctg \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)) - \arctg \exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D))) - \frac{Bg(\varepsilon_D)}{2aN(\varepsilon_C)E_g\hbar\omega} (\exp(-a(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))^2 - \exp(-a(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D))^2) \quad (10)$$

$n_1=n_2=1/2$ bo‘ladigan hol uchun analitik yechimni olishni imkoni bo‘lmadi, shuning uchun, uni taqribiy hisoblash usullaridan foydalanib hisoblandi.

Elektronlarni nuqsonlardan o‘tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o‘tishlari uchun (10) formulaga o‘xshab Kubo-Grinvud formulasini $\varepsilon_C-\varepsilon_{D2} > \hbar\omega$ shart uchun quyidagicha yozamiz:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D2}-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (11)$$

Bu formuladagi ε_{D2} – nuqsonlar va o‘tkazuvchanlik zonasi dumidagi elektron holatlari taqsimotining kesishish nuqtasini energetik o‘rni (1 - rasm). (11) formulaga (3)-(4) formulalar bilan berilgan taqsimot funksiyalarini qo‘yib hisoblashlarni bajaramiz.

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D2}-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C + \hbar\omega)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \quad (12)$$

$$= \frac{Bg(\varepsilon_D)}{N(\varepsilon_V)b\hbar\omega} \exp(b(\varepsilon_D - \varepsilon_C + \hbar\omega)) \ln \frac{(1 + \exp(2b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D)))}{(1 + \exp(2b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D - \hbar\omega)))}$$

$\varepsilon_C - \varepsilon_{D2} < \hbar\omega$ shart uchun yana (11) formulani elektronlarni optik o'tishlariga moslashtirsak:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D2}-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_C-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_{D2}-\hbar\omega}^{\varepsilon_C-\hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (13)$$

ifodani olamiz. Bu yerda α_1 - o'tkazuvchanlik zonasidan nuqsonga, α_2 - esa o'tkazuvchanlik zonasi dumidan nuqsonga optik o'tishlarini parsial spektrlari. (13) formulaga (3) va (4), (5) taqsimot funksiyalarini qo'yib nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasiga va nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o'tishlarni parsial spektrlarini hisoblaymiz.

$n_1=n_2=1$ bo'lgan hol uchun esa:

$$\alpha_1 = A \int_{\varepsilon_C-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V + \hbar\omega}{E_g} \right) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} =$$

$$= \frac{2Bg(\varepsilon_D)}{b\hbar\omega E_g N(\varepsilon_V)} (\arctg(\exp(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D))) - \arctg(\exp(b(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar\omega)))) - \quad (14)$$

$$- \frac{Bg(\varepsilon_D)}{2a\hbar\omega E_g N(\varepsilon_V)} (\exp(-a(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D)^2) - \exp(-a(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar\omega)^2))$$

ifodalarni olamiz.

$n_1=n_2=1/2$ bo'ladigan hol uchun analitik yechimni olishni imkoni bo'lmadi, shuning uchun, uni taqribiy hisoblash usullaridan foydalanib hisoblandi.

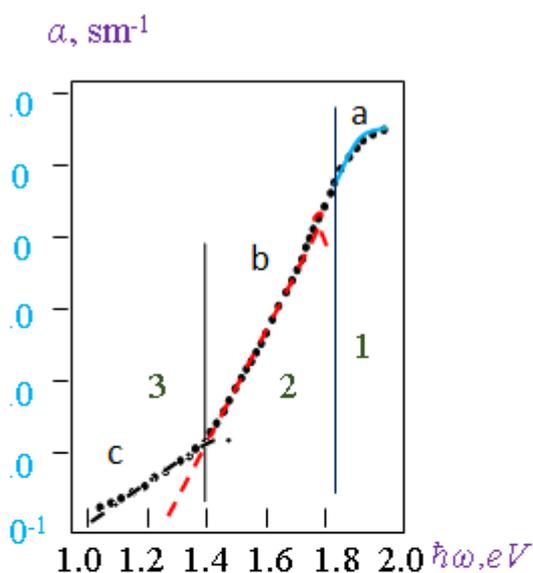
Nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o'tishlarni parsial spektrlarini hisoblaymiz:

$$\alpha_2 = A \int_{\varepsilon_{D2}-\hbar\omega}^{\varepsilon_C-\hbar\omega} \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C + \hbar\omega)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{Bg(\varepsilon_D)}{b\hbar\omega N(\varepsilon_C)} \times$$

$$\times \exp(b(\varepsilon_D - \varepsilon_C + \hbar\omega)) \ln \frac{(1 + \exp(2b(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar\omega)))}{(1 + \exp(2b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D - \hbar\omega)))} \quad (15)$$

(7), (9) va (12), (15) formulalardan valent zona dumidan nuqsonga va nuqsondan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga elektronlarni optik o'tishlarning yutilish spektrlarning hisoblashlar ularni analitik yechimlarini olish uchun $b = \beta_1$, $b = \beta_2$ shartlar bajarilishi kerak ekanligini ko'rsatdi. (10) va (14) formulalardagi b ni qiymati ixtiyoriy bo'lishi mumkin.

$\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V < \hbar\omega$ va $\varepsilon_C - \varepsilon_{D2} > \hbar\omega$ shartlar uchun hisoblangan (7), (9) hamda (12), (15) formulalarni, $\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V > \hbar\omega$ va $\varepsilon_C - \varepsilon_{D2} < \hbar\omega$ shartlar uchun hisoblangan (10), (14) formulalarni ko'rinishlari deyarli bir-biridan farq qilmasligini hisobga olib biz elektronlarni faqat valent zona va uni dumidan nuqsonlarga optik o'tishlari bilan aniqlanadigan spektrlarni qarab chiqamiz.



2 – rasm. Tajribalardan aniqlangan a-Si:H ni tajribadan aniqlangan optik yutilish spektri. 1 – zonalararo yutilish sohasi, 2 – eksponensial yutilish sohasi, 3 – nuqsonlarda yutilish sohasi. Formulalardan hisoblangan optik yutilish spektrlari: a – zonalararo yutilish sohasi, b – eksponensial yutilish sohasi, c – nuqsonlarda yutilish sohasi.

uchun ruxsat etilgan zonalar va nuqsonlar orasidagi optik o'tishlarni shartlarini quyidagi $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V > \hbar\omega < 1.38 \text{ eV}$ va $\varepsilon_C-\varepsilon_{D2} < \hbar\omega < 1.38 \text{ eV}$ ko'inishlarda yozamiz.

Adabiyotlarda zonalararo yutilish spektrining analitik ifodasi uchun $n_1 = n_2 = 1/2$ bo'lganda:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{B}{4\hbar\omega E_g} \left[2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega} - (E_g - \hbar\omega)^2 \arctg \left(\frac{E_g - \hbar\omega}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right) \right] \quad (16)$$

ifoda olingan. Zonalararo yutilish spektri uchun tajribadan aniqlangan va (16) formuladan olingan hisoblash natijalari bir-biriga mos kelishi uchun $B = 1,71 \cdot 10^5 \text{ sm}^{-1}$ va $E_g = 1,78 \text{ eV}$ ga teng bo'lishi kerakligi aniqlandi (2 – rasm tutash egri chiziq).

Adabiyotlarda B va E_g larni qiymatlari optik yutilish koeffitsiyentini barcha sohalarida bir xil qiymatga ega bo'lishi ko'rsatilgan va eksponensial yutilish spektrining analitik yechimi uchun:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{B}{(\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g)) \exp((\beta_1 - \beta_2)(\varepsilon_C - \varepsilon_0)) [\exp((\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega) - 1] \quad (17)$$

ifoda olingan. Eksponensial yutilish spektrini tajribadan aniqlangan (17) formuladan hisoblangan natijalar $\beta_1 = 24,2 \text{ eV}^{-1}$ va $\beta_2 = 31,7 \text{ eV}^{-1}$ bir-biriga mos kelishi aniqlandi (2 – rasm, punktir egri chiziq).

Yuqoridagi parsial spektrlarni hisoblash uchun, ulardagi $B, E_g, \varepsilon_{D1}, \varepsilon_{D2}, g(\varepsilon_D), \beta_1, \beta_2$, va b parametrlarni aniqlash kerak. Buning uchun optik yutilish koeffitsiyenti spektrlarining tajribalardan aniqlangan qiymatlaridan foydalanamiz.

Yuqori chastotali miltillama gaz razryadida o'stirilgan legirlanmagan amorf gidrogenizatsiyalangan kremniyni tajribalardan aniqlangan yutilish koeffitsiyentini spektri keltirilgan (2-rasm). Bu spektrni zonalararo, eksponensial va nuqsonlarda yutilish sohalariga ajratamiz. Analitik hisoblangan formuladagi B va E_g larni moslashtiruvchi parametrlar sifatida qarab, tajribadan olingan zonalararo yutilish spektrlari qiymatlarini bir-biriga moslashtirish orqali aniqlaymiz, xuddi shu usulda eksponensial yutilish spektri sohasidan β_1 va β_2 larni, nuqsonlarda yutilish sohasidan esa $g(\varepsilon_D)$ va b ni aniqlaymiz. 2- rasmdan ko'rinadiki nuqsonlarda yutilish spektrini boshlanishi yutilgan fotonlarni energiyasi $\hbar\omega = 1.38 \text{ eV}$ nuqtaga mos kelar ekan, shuning

ε_{D1} va ε_{D2} lar ruxsat etilgan zonalarini eksponensial dumlari va nuqsonlardagi elektron holatlari taqsimotlarini kesishish nuqtasini energetik o'rnini bo'lganligi uchun ularni quyidagi formulalardan hisoblaymiz:

$$N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_C)) = 2g(\varepsilon_D) \exp(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D)) \quad (18)$$

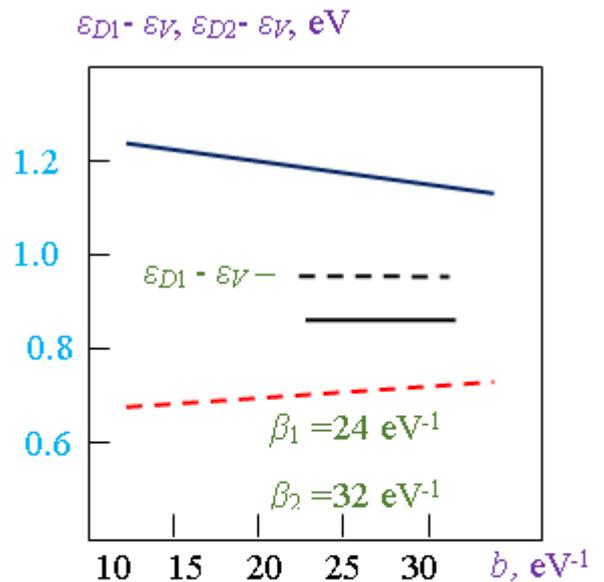
$$N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V)) = 2g(\varepsilon_D) \exp(-b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D)) \quad (19)$$

Bulardan quyidagi ifodalarni olamiz:

$$\varepsilon_{D1} = (\ln(\frac{N(\varepsilon_V)}{2g(\varepsilon_D)}) + b\varepsilon_D + \beta_1\varepsilon_V) / (b + \beta_1) \quad (20)$$

$$\varepsilon_{D2} = (\ln(\frac{2g(\varepsilon_D)}{N(\varepsilon_C)}) + b\varepsilon_D + \beta_2\varepsilon_C) / (b + \beta_2) \quad (21)$$

Bu formulalardan olingan hisoblash natijalari 3- rasmda keltirilgan. b ni qiymati 14 dan 35 gacha o'zgarganda, ε_{D1} va ε_{D2} - 0,1 oraliqda o'zgarishini ko'rsatdi (3-rasm). Hisoblashlar shuni ko'rsatdiki ε_{D1} va ε_{D2} ni bu o'zgarishlari yutilish spektrlari ko'rinishlariga dyarli ta'sir qilmas ekan. Yuqoridagilarni hisobga olib $\varepsilon_D^0 - \varepsilon_V \approx 0,56$ eV va $N_D^0 = 5 \cdot 10^{16}$ sm⁻³ qiymat uchun bajarilgan elektronlarni valent zonadan nuqsonga optik o'tishlar uchun hisoblashlar $n_1=1$, va $n_1=1/2$ bo'lganda olingan taqribiy hisoblash natijalari bu spektrlar bir-biridan umuman farq qilmasligini ko'rsatdi. Shuni ta'kidlab o'tamizki, tajriba natijalari elektronlarni valent zonadan va uni dumidan optik o'tishlarini parsial spektrlarni yig'indisi bilan aniqlanadi. Shuning uchun b ni turli qiymatlari uchun (14) va (15) formuladan $\varepsilon_D^0 - \varepsilon_V \approx 0,56$ eV va $N_D^0 = 5 \cdot 10^{16}$ sm⁻³ qiymat uchun olingan hisoblash natijalari 4-rasmda keltirilgan. Shu rasmda solishtirib ko'rish uchun (14) formuladan hisoblangan elektronlarni valent zonadan nuqsonga optik o'tishlarni spektri ham keltirilgan. Rasmdan ko'rinadiki, elektronlarni valent zona dumidan nuqsonga optik o'tishlarini spektrlari nuqsonlarda yutilish spektrining ko'rinishiga ta'sir qilmas ekan. 2-rasmdan ko'rinadiki, bu namunaning nuqsonlarda yutilish spektrini qiymatlari yutilgan fotonlarni energiyasi kichiklashib borgan sari kamayib borar ekan. Bunday kamayishni elektronlarni faqat valent zonadan $\varepsilon_D^+ - \varepsilon_V \approx 1,36$ eV nuqsonga optik o'tishlarining spektrlarida kuzatish mumkin ekan. Bu 2 - rasmda keltirilgan tajriba natijalaridagi *a-Si:H* namunasi nuqsonlarda yutilish spektrini aniqlashda asosiy rol D^+ nuqson o'ynashini (c - chiziq) ko'rsatadi.



3 - rasm. (20) va (21) formulalardan hisoblangan valent va o'tkazuvchanlik zonalarini dumlari hamda, nuqsonlardagi elektron holatlari taqsimotlarini kesishish nuqtalarini energetik o'rinlarini b ga bog'lanishi.

Dissertatsiya ishining “**Gidrogeni-zatsiyalangan amorf yarimo‘tkazgichlarga xos nuqsonlar va nuqsonlarda yutilish spektrlarini hisoblash**” deb nomlangan uchinchi bobida amorf gidrogenizatsiyalangan kremniyga xos nuqsonlar, ularni konsentratsiyalari va energetik o‘rinlari xaqida ma’lumotlar berilgan. Kubo-Grinvud formulasidan foydalanib nuqsonlar ishtirokidagi elektronlarni optik o‘tishlari uchun nuqsonlarda yutilish koeffitsiyetini parsial spektrlari hisoblangan. Buning uchun Kubo-Grinvud formulasidagi integralni aniq integral ko‘rinishida yozish va bu integralni chegaralarini yutilgan fotonlarni energiyasiga bog‘liq ravishda tanlashni yangi usuli keltirilgan. Kubo-Grinvud formulasidan Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko‘ra amorf gidrogenizatsiyalangan kremniydagi nuqsonlar ishtirokidagi parsial yutilish spektrlari uchun yangi formulalar olingan.

Yuqorida ko‘rdikki, gidrogenizatsiyalangan amorf yarimo‘tkazgichlarni harakatchanlik tirqishida joylashgan uzilgan bog‘lanishlar hosil qiluvchi nuqsonlarni zaryadini holatiga qarab turlarga ajratiladi.

Amorf gidrogenizatsiyalangan kremniyda bivakansiya va trivakansiya ko‘rinishidagi nuqsonlarni konsentratsiyasi juda kichik bo‘lganligi uchun ular bu materialni elektrofizik xarakteristikalariga deyal ta’sir qilmaydi.

Endi $g(\varepsilon_D)$ ni hisoblashni qarab chiqamiz:

$$N_D = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} d(\varepsilon) = \frac{2}{b} g(\varepsilon_D) \arctg \exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D)) \Big|_{-\infty}^{\infty} = \frac{2\pi}{b} g(\varepsilon_D), \quad g(\varepsilon_D) = \frac{bN_D}{2\pi} \quad (22)$$

(22) formuladan N_D ni o‘rniga tajribadan aniqlangan qiymatlarni qo‘yib bajarilgan hisoblash natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

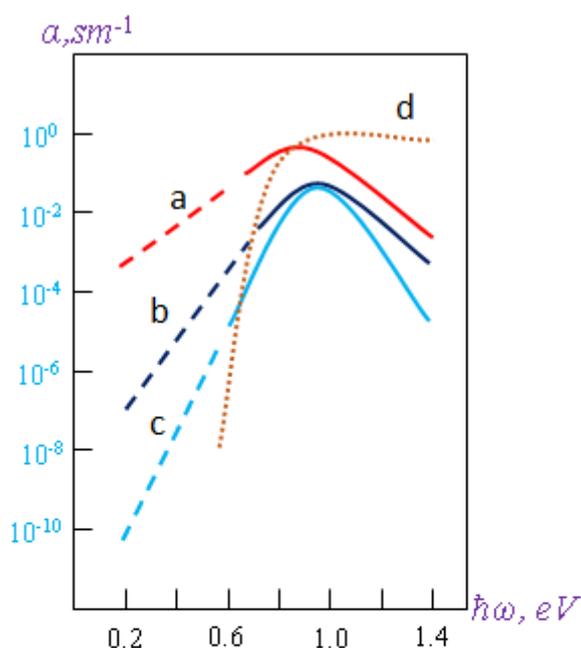
1-jadval.

| | b, eV^{-1} | $g(\varepsilon_D), eV^{-1} sm^{-3}$ | b, eV^{-1} | $g(\varepsilon_D), eV^{-1} sm^{-3}$ | b, eV^{-1} | $g(\varepsilon_D), eV^{-1} sm^{-3}$ |
|-------|--------------|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| D^0 | 2 | $8.6 \cdot 10^{15}$ | 24 | $1.72 \cdot 10^{16}$ | 32 | $2.29 \cdot 10^{16}$ |
| D^- | 2 | $5.73 \cdot 10^{15}$ | 24 | $1.15 \cdot 10^{16}$ | 32 | $1.53 \cdot 10^{16}$ |
| D^+ | 2 | $5.73 \cdot 10^{15}$ | 24 | $1.15 \cdot 10^{16}$ | 32 | $1.53 \cdot 10^{16}$ |

Yuqoridagilarni hisobga olib $\varepsilon_D^0 - \varepsilon_V \approx 0,56 eV$ va $N_D^0 = 5 \cdot 10^{16} sm^{-3}$ qiymat uchun bajarilgan elektronlarni valent zonadan nuqsonga optik o‘tishlar uchun hisoblashlar $n_1=1$ va $n_1=1/2$ bo‘lganda olingan taqribiy hisoblash natijalari bu spektrlar bir-biridan umuman farq qilmasligini ko‘rsatdi Bu 2-rasmda keltirilgan tajriba natijalaridagi $a-Si:H$ namunasining nuqsonlarda yutilish spektrini aniqlashda asosiy rolni D^+ nuqson o‘ynashini ko‘rsatdi.

Dissertatsiyaning “**Amorf gidroge-nizatsiyalangan kremniy nuqsonlaridagi elektron holatlarning zichligini hisoblashning yangi usuli**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida Kubo-Grinvud formulasini ikki xil ko‘rinishidan keltirib chiqarilgan spektrlar bilan aynan bir xil bo‘lishi ko‘rsatilgan. Elektronlarni valent zonadan nuqsonga optik o‘tishlari uchun yozilgan Kubo-Grinvud formulasidan nuqsonlardagi elektron holatlari zichligini taqsimotini aniqlovchi yangi formula keltirib chiqarilgan. Amorf gidrogenizatsiyalangan kremniyni tajribalardan

aniqlangan nuqsonlarda yutilish spektrini qiymatlaridan foydalanib, bu materialning D^+ nuqsonidagi elektron holatlari zichligining taqsimoti aniqlangan.



4- rasm. Valent zonaning dumidan ϵ_D - nuqsonga 1 - $\epsilon_{D1}-\epsilon_V > \hbar\omega$ va 2- $\epsilon_{D1}-\epsilon_V < \hbar\omega$ bo'lganda elektronlarni optik o'tishlarini parsial spektrlari. a - $b = 8 \text{ eV}^{-1}$, b - $b = 24 \text{ eV}^{-1}$, c - $b = 32 \text{ eV}^{-1}$, g - valent zonadan ϵ_D - nuqsonga elektronlarni optik o'tishlarini parsial spektri.

yarimo'tkazgichlarning optik yutilish spektrlarini nuqsonda yutilish sohasini nazariy hisoblash juda qiyin vazifadir.

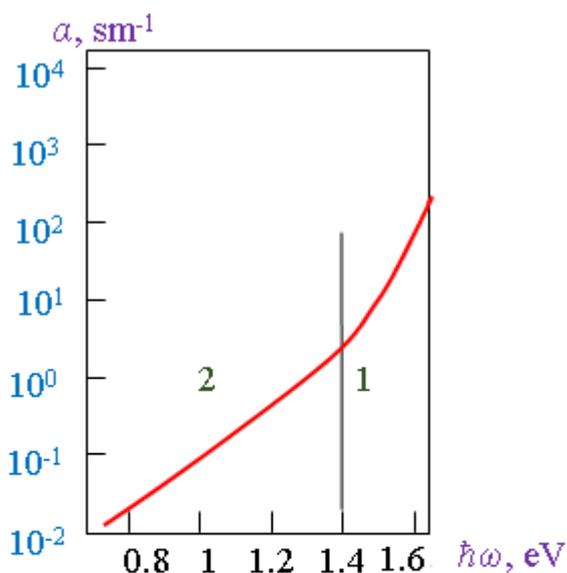
Oldingi bobda nuqsonlarda yutish spektri qiymatlarini asosan nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalar orasidagi elektronlarning optik o'tishlari aniqlashi ko'rsatilgan. Bu optik o'tishlar uchun Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra Kubo-Grinvud formulasini valent zonadan nuqsonlarga elektronning optik o'tishlari uchun quyidagi ko'rinishda yozilishini oldiroq ko'rsatib o'tdik: $\epsilon_{D1}-\epsilon_V < \hbar\omega$ bo'lganda:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int g_V(\epsilon) g_D(\epsilon + \hbar\omega) \frac{d\epsilon}{\hbar\omega} \quad (23)$$

yoki

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int g_V(\epsilon - \hbar\omega) g_D(\epsilon) \frac{d\epsilon}{\hbar\omega} \quad (24)$$

Ko'rinib turibdiki, nuqsonlarda yutiish spektri nuqsonlardagi elektron holatlari zichligiga bog'liq bo'lar ekan. Shuning uchun valent zonadan nuqsonga optik o'tish parsial spektrining analitik yechimi ma'lum bo'lsa, bu spektrdan foydalanib nuqsonlardagi elektron holatlarning zichligi taqsimotini aniqlash mumkin. Buni



5 - rasm. Valent zonadan D^+ nuqsonga elektronlarni optik o'tishlari uchun hisoblangan parsial nuqsongarda yutilish spektri 1 – eksponensial yutilish va

2 – nuqsongarda yutilishning spektrlari.

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1 + \alpha_2 \ddot{e}. \quad (25)$$

Bu yerda α_1 – elektronlarni valent zona dumidan nuqsonga, α_2 – esa valent zonadan nuqsonga optik o'tishlarini parsial spektrlari.

Amorf gidrogenizatsiyalanagan kremiyning nuqsongarda yutilish spektrini tajribadan aniqlangan natijalari 2-rasmda keltirilgan.

Ammo nuqsongalarni konsentratsiyasi energiyetik holatlarining yuqoridagi tajribalardan aniqlangan qiymatlarida, nuqsongarda yutilishning parsial spektrlarining umumiy qiymati, 2-rasmda ko'rsatilgan nuqsongarda yutilishning eksperimental spektriga mos kelmadi. Keyingi hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, faqat $\varepsilon_{D^+} - \varepsilon_V \approx 1,28 \text{ eV}$, $N_{D^+} = 6 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, $b = 10 \text{ eV}^{-1}$ bo'lganda valent zonadan nuqsonga optik o'tishlari uchun hisoblangan spektrlar eksperiment natijalariga mos keldi. (5-rasm, c - chiziq). Bu shuni anglatadiki, 4-rasmda keltirilgan *a-Si:H* dagi nuqsongalarni konsentratsiyasi yuqorida keltirilgan nuqsongalarni konsentratsiyalari bilan bir xil bo'lmas ekan.

(25) formulani elektronlarni valet zona dumidan va valet zonadan nuqsongalarga optik o'tishlarini parsial spektri uchun quyidagi ifodalarni yozamiz:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (26)$$

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (27)$$

hisobga olgan holda, ushbu bobda nuqsongardagi elektron holatlarning zichlik taqsimotini aniqlashning yangi usulini taklif qilamiz. Yuqorida ko'rdikki, Kubo-Grinvud formulasidan optik yutilish koeffitsiyenti spektrlarining xususiy yechimini aniqlash uchun bu formuladagi integralni aniq integral ko'rinishida yozish kerakligi ko'rsatib o'tildi va (23) formulani elektronlarni optik o'tishlariga moslashtirish ko'rsatib o'tildi.

Endi (24) formulalarni (23) formulaga o'xshab, elektronlarni optik o'tishlariga moslashtiramiz:

Bu formulalarga valent zona va uni dumidagi hamda nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini qo‘yib (26) formuladan valent zona dumidan nuqsonga va (27) formuladan valent zona dumidan nuqsonga elektronlarni optik o‘tishlarini parsial spektrlarini hisoblaymiz:

$$\alpha_1(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{2AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} \frac{\exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V))}{\exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D)) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} d\varepsilon$$

Yana 3 bobdagiga o‘xshab $\beta_I = b$ bo‘lishini talab qilamiz:

$$\begin{aligned} \alpha_1(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{b\hbar\omega} \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D)) \left[\ln \frac{\exp(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D + \hbar\omega))}{1 + \exp(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D + \hbar\omega))} - \ln \frac{\exp(2b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))}{1 + \exp(2b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

(28) spektr bilan (9) spektrlarni ko‘rinishi bir-biridan umuman farq qilmasligini ko‘rish mumkin.

Endi elektronlarni valent zonadan nuqsonga optik o‘tishlarini spektrlarini hisoblaymiz.

$$\begin{aligned} \alpha_2(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1} \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{2AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1} \frac{1}{\exp(b((\varepsilon - \varepsilon_D))) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} d\varepsilon \end{aligned}$$

$n_1=1$ bo‘lganda:

$$\begin{aligned} \alpha_2(\hbar\omega) &= \frac{2AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{E_g \hbar\omega} \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} \frac{(\varepsilon_C - \varepsilon)}{\exp(b((\varepsilon - \varepsilon_D))) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} d\varepsilon = \\ &= \frac{AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{E_g \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon_D) \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} \frac{(\varepsilon - \varepsilon_D)}{\text{ch}(b((\varepsilon - \varepsilon_D)))} d(\varepsilon - \varepsilon_D) \end{aligned}$$

Analistik yechimni olish uchun giperbolik sekans taqsimotini o‘rniga Gauss taqsimotini qo‘yamiz.

$$\begin{aligned} \alpha_2(\hbar\omega) &= \frac{AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{E_g \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon_D) \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} \frac{(\varepsilon - \varepsilon_D)}{\text{ch}(b((\varepsilon - \varepsilon_D)))} d(\varepsilon - \varepsilon_D) = \\ &= \frac{AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{2aE_g \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon_D) [\exp(a(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)^2) - \exp(a(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D)^2)] \end{aligned} \quad (29)$$

(29) formula bilan (10) formulani bir xil ekanligidan quyidagi xulosani chiqarish mumkin.

(23) formuladan olingan elektronlarni valent zonadan va valent zonaning dumidan nuqsonlarga optik o‘tishlarini spektri bilan (24) formuladan olingan spektr bir-biridan umuman farq qilmasligini ko‘rsatdi. Agar Kubo-Grinvud formulasidagi aniq integralni chegaralari va bu integraldagi elektron holatlari zichligi taqsimotlari

to'g'ri tanlansa nuqsonlarda yutilish spektrlarini (23) va (24) formulalardan hisoblash mumkin ekan.

Ikki o'zgaruvchili funktsiyani integralidan bitta o'zgaruvchi bo'yicha hosila olish uchun quyidagi formuladan hisoblanadi:

$$\frac{d}{dy} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \frac{\partial \beta(y)}{\partial y} f(\beta(y), y) - \frac{\partial \alpha(y)}{\partial y} f(\alpha(y), y) \quad (30)$$

Biz bu formulani (26) formulaga qo'llaymiz va D^+ nuqsonning energetik holatlarini taqsimoti uchun quyidagi ifodani olamiz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial \hbar \omega} &= A \frac{\partial}{\partial \hbar \omega} \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar \omega} g_V(\varepsilon - \hbar \omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar \omega} = \\ &= A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar \omega} g_D(\varepsilon) \frac{\partial}{\partial \hbar \omega} g_V(\varepsilon - \hbar \omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar \omega} - \frac{\alpha}{\hbar \omega} + g_D(\varepsilon_V + \hbar \omega) g_V(\varepsilon_V) \end{aligned} \quad (31)$$

Ushbu formulada biz elektron holatlarning valent zonadagi taqsimotini va D^+ nuqsondagi elektron holatlarining zichlik taqsimoti modelidan foydalanamiz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial \hbar \omega} &= A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar \omega} \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} \frac{\partial}{\partial \hbar \omega} (N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon - \hbar \omega}{E_g \hbar \omega} \right) d\varepsilon - \frac{\alpha}{\hbar \omega} + \frac{A}{\hbar \omega} N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_V}{E_g} \right) + \\ &+ \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon_V + \hbar \omega - \varepsilon_D))} = \frac{Ag(\varepsilon_D)N(\varepsilon_V)}{E_g \hbar \omega} \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar \omega} \frac{d\varepsilon}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} - \frac{\alpha}{\hbar \omega} + \frac{Ag(\varepsilon_D)N(\varepsilon_V)}{\hbar \omega} \frac{1}{\text{ch}(b(\varepsilon_V + \hbar \omega - \varepsilon_D))} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial \hbar \omega} &= \frac{2Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)\hbar \omega E_g} [\arctg \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar \omega)) - \arctg \exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D))] - \\ &- \frac{\alpha}{\hbar \omega} + \frac{B}{N(\varepsilon_C)\hbar \omega} g_D(\varepsilon_V + \hbar \omega - \varepsilon_D) \end{aligned} \quad (33)$$

Endi biz ushbu $\varepsilon_V + \hbar \omega - \varepsilon_D$ energiya qayerdagi energetik holatni aniqlashini qarab chiqamiz.

$$g_D(\varepsilon - \varepsilon_D) = g_D(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar \omega) = g_D(\varepsilon), \quad \varepsilon = \varepsilon_V + \hbar \omega \quad (34)$$

Bundan kelib chiqadiki, D^+ nuqsonning energetik holati valent zonaning yuqori chegarasidan $\hbar \omega$ ga yuqorida joylashgan bo'lar ekan.

$$g_D(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} = \frac{g(\varepsilon_D)}{\text{ch}(b(\varepsilon_V + \hbar \omega - \varepsilon_D))} \quad (35)$$

(34) formuladan foydalanib (33) ni quyidagi kurrinishda yozamiz:

$$\begin{aligned} g_D(\varepsilon) &= \frac{N(\varepsilon_C)\hbar \omega}{B} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \hbar \omega} + \frac{\alpha}{\hbar \omega} - \frac{2Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)\hbar \omega E_g} \times \right. \\ &\left. \times [\arctg \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar \omega)) - \arctg \exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D))] \right) \end{aligned} \quad (36)$$

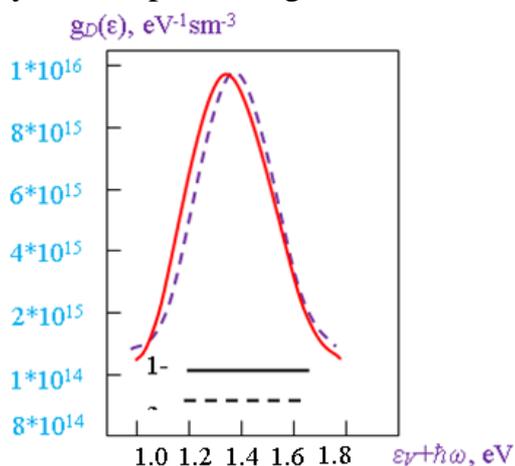
Biz (36) formulani quyidagicha yozamiz:

$$g_{D_i}(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_C)(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2B} \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} + \frac{\alpha_{i+1} + \alpha_i}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i} - \frac{4Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)Eg} \right) \times \left[\arctg \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + (\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)/2)) - \arctg \exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D)) \right] \quad (37)$$

Biz (34) formulani quyidagicha yozamiz:

$$g_{D_i}(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon_V + \frac{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i}{2} - \varepsilon_D))} \quad (38)$$

bu yerda $\hbar\omega_i$, $\hbar\omega_{i+1}$, α_i , α_{i+1} nuqsonlarda yutilish spektrining valet zonadan D^+ nuqsonga elektronlarning optik o'tishlari uchun yutilgan fotonlarni energiyalari va nuqsonlarda yutilish koeffitsiyentining tajribadan aniqlangan qiymatlari (2- rasm). (37) va (38) formulalardan 5-rasmda ko'rsatilgan elektronlarni valent zonadan D^+ optik o'tishlarini parsial spektrining qiymatlaridan foydalanib D^+ nuqsonidagi elektron holatlarning zichligi 6-rasmda keltirilgan.



6 - rasm. 1 - (37) formuladan 2 - (38) formuladan hisoblangan D^+ nuqsondagi elektron holatlarning zichligining taqsimoti.

XULOSALAR

Olib borilgan tadqiqotlar natijasida quyidagi xulosalar taqdim qilinadi:

1. Hidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarning nuqsonlarda yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini Devis-Mott yaqinlashish usuli bilan "Kubo-Grinvud formulasi"dan hisoblashda, uni yutilgan fotonlarni energiyasi bo'yicha sohalarga ajratish shartlari aniqlandi.

2. Nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalar hamda ularni «dum» laridagi elektron holatlari ishtirok etuvchi optik o'tishlar bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsiyenti spektrlarini hisoblash uchun Kubo-Grinvud formulasini elektronlarni optik o'tish turlariga moslashtirish shartlari aniqlandi.

3. Elektronlarni nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlari orasidagi optik o'tishlari aniqlaydigan yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteritikalarining ko'rinishi ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlari zichligining taqsimoti bilan aniqlash ko'rsatildi.

4. Nuqsonlarda yutilish koeffitsiyenti spektrlarining Kubo-Grinvud formulasidan hisoblash uchun, bu formulani elektronlarni optik o'tish turlariga moslashtirish kerakligi ko'rsatildi.

5. Nuqsonlar va ruxsat etilgan zonalarning eksponensial «dumlari» dagi elektron holatlari orasidagi optik o'tishlarning yutilish koeffitsiyenti spektrleri aniqlandi.

6. Amorf yarimo'tkazgichlarni optik yutilish koeffitsiyenti spektri qiymatlaridan foydalanib nuqsonlardagi elektron holatlarning zichlik taqsimotini aniqlashning yangi usulini taklif qilindi.

7. Agar amorf yarimo'tkazgichning tajribalardan aniqlangan optik yutilish koeffitsiyenti barcha sohalari ma'lum bo'lsa, ushbu spektr va Kubo-Grinvud formulasidan nuqsonlardagi elektron holatlari zichligi taqsimotni aniqlash mumkin ekanligi ko'rsatildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.11.2022.FM/Т.66.04 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

НАМАНГАНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ХОЛМИРЗАЕВ ОЙБЕК ТУРАМИРЗАЕВИЧ

**СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ И ЭЛЕКТРОННАЯ ПЛОТНОСТЬ
СОСТОЯНИЙ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ ПРИ ДЕФЕКТАХ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО – МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Наманган – 2025

Тема диссертации доктора философии зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования, науки и инноваций Республики Узбекистан

по физико-математическим наукам при Министерстве высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан за № В2023.4.PhD/FM615.

Диссертация выполнена в Наманганском инженерно – технологическом институте. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.nammti.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: Икрамов Рустамжон Гуломжонович
доктор физико – математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Гулямов Гофуржон
доктор физико – математических наук, профессор

Расулов Рустам Явкачович
доктор физико – математических наук, профессор

Ведущая организация: Ургенчский государственный университет

Защита диссертации состоится «1» 02 2025 года в 12⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 при Наманганском инженерно – технологическом институте по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская 7, Административное здание Наманганского инженерно – технологического института, 3-здания, 2-этаж, малый зал совещаний, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно - ресурсном центре Наманганского инженерно – технологического института (зарегистрирована за № 354) по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75.

Автореферат диссертации разослан «23» 01 2025 г.
(протокол рассылки № 21 от «23» 01 2025 г.)



У.Н.Эркабоев
Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф-м.н., профессор

А.А. Абдукаримов
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, PhD., доцент

Н.Ю. Шарibaев
Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф-м.н., профессор



Введение (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. Сегодня из аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) в мире производят активные матрицы для дисплеев, тонкопленочные транзисторы, фотодиоды и гетеропереходные солнечные элементы. Роль аморфных полупроводников в производстве гетеропереходных солнечных элементов, фотодиодов и транзисторов из тонкопленочного аморфного нитрида кремния (α -SiN) очень велика. Поэтому широко изучаются спектральные характеристики коэффициента оптического поглощения, электрические и оптические свойства аморфных полупроводников, плотность электронных состояний в них. В настоящее время эмпирические модели распределения плотности нескольких электронных состояний используются для теоретического расчета спектра коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников. В этом отношении важно проводить целевые научные исследования.

В нашей стране значительно возросло внимание к современным научным направлениям фундаментальных исследований, в частности, выявлены возможности расчета спектральных характеристик коэффициента оптического поглощения полупроводников в аморфном кремнии. В стратегии дальнейшего развития Республики Узбекистан «Узбекистан-2030» определены важные задачи в части «Переход к зеленой экономике, резкому увеличению показателей использования возобновляемых источников энергии, которые являются ее основой»¹. При реализации этих задач особое внимание следует уделить созданию эффективных механизмов продвижения и внедрения достижений научных исследований, и в связи с этим реализация физических процессов в полупроводниковых приборах с участием всех электронных состояний, характерных для гидрогенизированные аморфных полупроводников очень важно углубить понимание связи между распределением плотности электронных состояний в дефектах и спектром коэффициента поглощения.

Научно-исследовательская работа, выполненная в данной диссертации, основана на Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» № ПФ-60, Указ О. Постановления Президента Республики Узбекистан от 10 июля 2020 года № PQ-4779 «Повышение энергоэффективности экономики и использования имеющихся ресурсов» Решение о дополнительных мерах по снижению зависимости отраслей экономики от продукции топливно-энергетического комплекса путем привлечения «О мерах развития» и других нормативно-правовых документов, связанных с этой деятельностью, служит в определенной степени реализации поставленных задач.

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года № ПФ-158 о стратегии «Узбекистан-2030»

Связь научно-исследовательской работы с приоритетными направлениями развития науки и технологий. Настоящее исследование выполнено в рамках приоритетном направлении по развитию науки и техники Республики: III «Развитие энергетики, энергоресурсной экономики, транспорта, машиностроения и приборостроения, современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения»

Степень изученности проблемы. В теоретических работах Тауца, Мотта, Дэвиса, Танаки и других авторов было показано, что распределение плотности состояний электронов на границах разрешенных зон гидрогенизированного аморфного кремния имеет линейного или параболического распределение. Используя этих распределений, авторы определили спектральные характеристики коэффициента оптического поглощения по формуле Кубо-Гринвуда при поглощении фотонов с энергиями, превышающими ширину щели подвижности. Аналитические решения спектров имеют квадратичную и кубическую зависимость. Эти спектры могли объяснить лишь экспериментальные результаты, полученные для оптических переходов электрона между разрешенными зонами. Потому что в этих исследованиях при поглощении фотонов высоких энергий одновременно не учитываются оптические переходы между электронными состояниями разрешенных зон и их «хвостами». Поскольку интеграл в формуле Кубо-Гринвуда не записан в форме определенного интеграла, не определены частных решений спектров оптического поглощения. В то же время, использованные функции распределения не имеют явного вида, неясно, как определяется значение некоторых параметров в полученных спектрах.

В настоящее время предложены различные модели для распределения плотности состояний электронов в щель подвижности гидрогенизированных аморфных полупроводников. В этих моделях энергетическая зависимость локализованных электронных состояний в хвостах разрешенных зон имеет экспоненциальный вид. В работах Урбахом, Ямасаки, Куликом, Бродским и Андреевы показаны выполнение правила Урбаха для спектров оптических переходов с участием локализованных состояний. Но даже в этих работах для фотонов с энергией, меньшей ширины щели подвижности, наряду с оптическими переходами между локализованными состояниями не учитывалось наличие переходов между локализованными и нелокализованными состояниями, а также оптических переходов с участием электронных состояний в дефектах.

Известно, что энергетическая зависимость распределения плотности состояний электронов созданные оборванными связями, записывается в виде функции распределения Гаусса. Поскольку получить аналитическое решение путем интегрирования распределения Гаусса невозможно, до сих пор не получено точное аналитическое решение спектров коэффициента поглощения в дефектах. Тот факт, что эту проблему можно решить, используя распределение в виде гиперболического секанса вместо распределения Гаусса, позволяет определять электронные состояния в дефектах.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательской работы высшего учебного заведения, в котором выполняется диссертация. Научно-исследовательская работа выполнена на основе плана научно-исследовательских работ Наманганского инженерно-технологического института.

Цель исследования - физическое обоснование аналитических выражений спектральных характеристик коэффициента поглощения для оптических переходов с участием электронных состояний в дефектах, типичных для гидрогенизированных аморфных полупроводников и определение по этим спектрам распределения плотности состояний электронов в дефектах.

Задачи исследования:

определить энергетической ширины щели подвижности и коэффициента пропорциональности образца путем сравнения результатов, рассчитанных по аналитически полученной формуле, со спектром коэффициента межзонного поглощения, определенным из экспериментов для области фундаментального поглощения фотонов в образцах гидрогенизированных аморфных полупроводников;

определить параметров, определяющих кривизну экспоненциальных хвостов разрешенных зон, путем сравнения результатов эксперимента для экспоненциального спектра с результатами расчета, полученными по аналитически рассчитанного спектра;

вывести спектральные характеристики коэффициента поглощения в дефектах из формулы Кубо-Гринвуда для всех оптических переходов электрона с участием состояний в оборванных связях (дефекты, легирующие примеси) и объяснение экспериментальных результатов, определенных для области дефектного поглощения;

определить распределение плотности состояний электронов в дефектах по экспериментальному спектру дефектного поглощения аморфного гидрогенизированного кремния.

Объектом исследования являются спектры коэффициента оптического поглощения гидрогенизированных аморфных полупроводников.

Предметов исследования особенности процессов поглощения света и формирование их спектров в гидрогенизированных аморфных полупроводниках.

Методы исследования: Вычисление формулы Кубо-Гринвуда методом приближения Дэвиса-Мотта.

Научная новизна исследования состоит в том, что:

выявлена возможность расчета спектров поглощения в дефектах по формуле Кубо-Гринвуда с использованием метода аппроксимации Дэвиса-Мотта спектральных характеристик коэффициента оптического поглощения гидрогенизированных аморфных полупроводников;

впервые предложен преобразование формулы Кубо — Гринвуда для спектра дефектного поглощения в зависимости от энергии поглощенных фотонов в виде определенного интеграла;

впервые предложен способ написать интеграл формулы Кубо - Гринвуда в виде определенного интеграла для спектра поглощения в дефектах и написать эту формулу отдельно в зависимости от энергии поглощенных фотонов;

впервые получены аналитические выражения спектров поглощения в дефектах и показано, что значения этого спектра определяются распределением плотности электронных состояний в разрешенных зонах;

впервые предложен метод определения распределение плотности электронных состояний в дефектах с использованием экспериментально определенных спектров дефектного поглощения аморфного гидрогенизированного кремния.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

выведена зависимость между спектральными характеристиками коэффициента оптического поглощения и распределением плотности электронных состояний для всех дефектов характерных гидрогенизированного аморфного кремния на основе формулы Кубо-Гринвуда по приближению Дэвиса-Мотта, которое оптические переходы электронов были разделены на области и типы;

выведены новые формулы для спектров поглощения в дефектах и с помощью этих формул предложен новый метод определения плотности состояний электронов в дефектах гидрогенизированного аморфного кремния.

Достоверность результатов исследования основывается тем фактом, что теоретически рассчитанные результаты спектров коэффициента поглощения, соответствуют результатам эксперимента, представленным в литературе и использованием традиционных математических методов расчета.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в расширении представления о связи между спектром коэффициента поглощения и оптическими переходами с участием электронных состояний во всех дефектах, характерных для аморфных полупроводников.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что полученные результаты предложенный по новой методике, для расчета спектральных характеристик коэффициента поглощения оптических переходов с участием электронных состояний во всех дефектах характерного для аморфных полупроводников позволяет создать приборы оптоэлектроники с улучшенными оптическими свойствами.

Внедрение результатов исследований. На основе полученных результатов для спектров поглощения аморфного кремния в дефектах и плотности состояний электронов в дефектах были:

использованы при производстве аморфных полупроводниковых оптоэлектронных приборов на АО «Фотон» с новыми методами расчета спектральные характеристики коэффициента оптического поглощения в дефектах по формуле Кубо-Гринвуда с приближением Дэвиса-Мотта (Справка 117 от 5 июня 2024 года АО «Uzeltexsanoat»). Изготовлен образцы

разработанные на основе результатов научных исследований, проведенных в АО «Фотон», оптоэлектрические параметры образцов соответствуют существующим нормативным технологическим процессам;

определены возможность применение полученных результатов для спектров поглощения аморфного кремния в дефектах и плотности электронных состояний в дефектах при расчете фотоэлектрических параметров органических солнечных элементов нового типа (DSSC) в научной лаборатории Ионного центра Университета Путры Малайзия. Было обнаружено, что расчеты согласуются с экспериментальными результатами (Справка Q.M.S 00794 (R) Университета Путра Малайзия от 15 августа 2024 г.).

Апробация результатов исследования. Результаты исследований обсуждались на 9 научно-практических конференциях, в том числе 1 международных и 8 республиканских

Публикация результатов исследования. По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, из них 6 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 1 статья в зарубежных международных реферируемых Scopus журналах.

Структура и объем диссертации. Состав диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составил 107 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введение диссертации обосновывается актуальность и необходимость исследования, описываются цель и задачи, объект и предмет исследования, определяются наука и методы исследования, тема диссертации в вузе, показана актуальность научно-исследовательских работ приоритетным направлениям развития диссертации, описана научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта научная и практическая значимость результатов, приведены сведения о выполнении исследования. результаты на практике, опубликованы работы и приведена структура диссертации.

В первой главе диссертации под названием **“Обзор литературы. Спектральные характеристики коэффициента оптического поглощения гидрогенизированных аморфных полупроводников”** представлены виды дефектных состояний свойственные аморфным гидрогенизированным полупроводникам определенные до настоящего времени, спектры дефектного поглощения и метод определения концентрации дефектных состояний. Представлены данные о спектрах оптического поглощения аморфных полупроводников.

Вторая глава диссертации **«Спектры оптического поглощения с участием электронных состояний в дефектах аморфных полупроводников»** исследовались спектры коэффициентов поглощения,

определяемые оптическими переходами с участием оборванных связей, т.е. дефектов структурной сетки гидрогенизированных аморфных полупроводников. Показано, что оптические переходы с участием электронных состояний в дефектах можно разделить на пять типов. Путем подгонки формулы Кубо-Гринвуда в зависимости от энергии поглощенных фотонов и типам оптических переходов электронов при расчете спектральных характеристик коэффициента дефектного поглощения.

Известно, что дефекты расположенные в щели подвижности гидрогенизированных аморфных полупроводников делятся на три типа в зависимости от зарядового состояния. D^0 -нейтральный дефект, имеющий один электрон и одну дырку когда свободный электрон переходит в состояние D^0 , образуются дефект D^- с отрицательным зарядом или когда электрон покидает его образуется дефект D^+ -положительным зарядом. Результаты, полученные для оптических переходов с участием дефектных состояний D^- и D^+ -типа в щели подвижности некоторых гидрогенизированных аморфных полупроводников, могут быть применены к образцам, легированных доноромы или акцепторомы примесями соответственно. В литературах для собственной $a-Si:H$ полученного в тлеющем газовом разряде для энергетического положения и концентраций D^+ , D^0 и D^- дефектов приведена результаты $\varepsilon_{D^0} - \varepsilon_V \approx 0,78$ эВ, $\varepsilon_{D^-} - \varepsilon_V \approx 0,5$ эВ, $\varepsilon_{D^+} - \varepsilon_V \approx 1,28$ эВ и $N_{D^0} = 4.5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $N_{D^-} = 3 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $N_{D^+} = 3 \cdot 10^{15}$ см⁻³.

Известно, что при поглощении фотонов происходят оптические переходы электронов из валентной зоны и ее хвоста в дефект и из дефекта в зоны проводимости и в ее хвост. В зависимости от энергии поглощенных фотонов эти типы оптических переходов электронов представлены на рис.1. Для энергии поглощенных фотонов когда выполняется условие 1 - $\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V > \hbar\omega$ электроны переходит только от хвоста валентной зоны в дефект (рис. 1). 2 - $\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V < \hbar\omega$ при выполнении условия электроны совершают оптические переходы от хвоста валентной зоны и от валентной зоны в дефект одновременно (рис. 1).

Для энергии поглощенных фотонов когда выполняется условия 3 - $\varepsilon_C - \varepsilon_{D2} > \hbar\omega$ фотоны переносят электроны только от дефекта в хвост зоны проводимости, а при выполнении условия 4 - $\varepsilon_C - \varepsilon_{D2} < \hbar\omega$ оптические переходы электронов от дефекта в хвост зоны проводимости и в зону проводимости одновременно (рис.1).

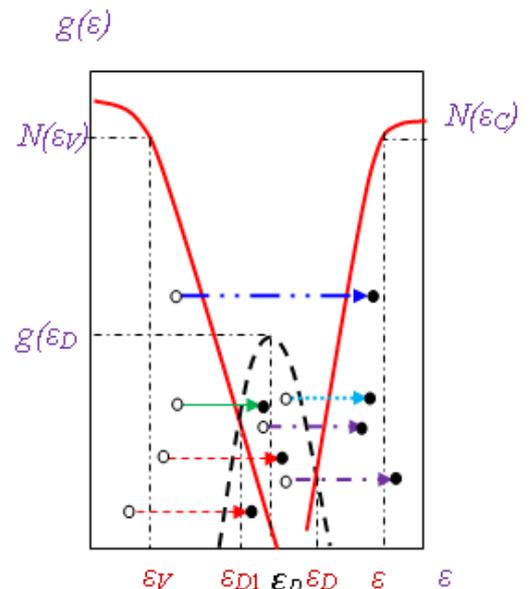


Рис.1. Виды оптических переходов с участием дефектных состояний аморфных полупроводников. Для энергии поглощенных фотонов 1 - $\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V < \hbar\omega$ и 2 - $\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V > \hbar\omega$, 3 - $\varepsilon_C - \varepsilon_{D2} > \hbar\omega$ и 4 - $\varepsilon_C - \varepsilon_{D2} < \hbar\omega$.

Обычно спектры коэффициента поглощения аморфных полупроводников рассчитывают по формуле Кубо-Гринвуда согласно приближению Дэвиса-Мотта:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int \frac{g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon \quad (1)$$

A в этой формуле — коэффициент пропорциональности, не зависящий от энергии поглощенных фотонов, $g(\varepsilon)$ — начальное состояние электронов, участвующих в оптическом переходе и $g(\varepsilon + \hbar\omega)$ плотность конечных состояний. Во-первых, чтобы определить частное решение по формуле (1), необходимо интеграла в этой формуле записать в определенной форме. Во-вторых, чтобы найти аналитические решения по этой формулы, необходимо знать распределение плотности электронных состояний в разрешенных зонах и их хвостах, а также в дефектах. Различные эмпирические модели распределения плотности электронных состояний используются для аналитического расчета спектров коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников. Практически во всех этих моделях распределение плотности электронных состояний в запрещенной зоне имеет параболический или линейный, а распределение плотности электронных состояний в их хвостах экспоненциальный характер. Учитывая это, в данной работе предлагается следующая модель распределения плотности электронных состояний в разрешенных зонах и их хвостах:

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1}, \quad n_1 = 1/2, 1 \quad \text{и} \quad g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \quad (2)$$

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g} \right)^{n_2}, \quad n_2 = 1/2, 1 \quad \text{и} \quad g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \quad (3)$$

Где эффективные значения плотности электронных состояний $N(\varepsilon_V)$ — в валентной зоне и $N(\varepsilon_C)$ — в зоне проводимости, ε_V — верхняя граница валентной зоны и ε_C — нижняя граница зоны проводимости, параметры, определяющие кривизну экспоненциальных хвостов β_1 — валентной зоны и β_2 — зоны проводимости, степень распределения плотности электронных состояний n_1 — в валентной зоне и n_2 — в зоне проводимости.

Распределение плотности электронных состояний в дефектах аморфных полупроводников представляет собой распределению Гаусса:

$$g(\varepsilon) = g(\varepsilon_D) \exp(-a(\varepsilon - \varepsilon_D)^2) \quad (4)$$

или распределению гиперболического секанса:

$$g(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_D)}{\operatorname{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} = \frac{2g(\varepsilon_D)}{\exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D)) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} \quad (5)$$

где b и a — параметры, определяющие эффективную полуширину распределения плотности электронных состояний в дефектах, ε_D — максимальное энергетическое положение дефектов, $g(\varepsilon_D)$ — максимальное значение распределения плотности электронных состояний в дефектах.

Концентрации дефектов, ограниченные распределением, определяемым формулами, (4) и (5) будет равны друг другу когда $a = \frac{b^2}{\pi}$.

Интеграл в формуле Кубо-Гринвуда в определенной форме для условия $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V < \hbar\omega$ запишем так:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D1}-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D1}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (6)$$

Подставив в формулу (6) плотности состояний, участвующих в оптическом переходе электронов, (2) и (5), получим следующее выражение:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D1}-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D1}} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)} \times \times \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))(2b\hbar\omega + \ln \frac{(\exp(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D)) + 1)}{(\exp(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D + \hbar\omega)) + 1)}) \quad (7)$$

В этих формулах ε_{D1} – Энергетическое положение точки пересечения распределения электронных состояний хвоста валентной зоны и дефектов (рис. 1) и $B=AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)$.

Формулу (6) сопоставим оптическим переходам электронов при выполнении условия $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V < \hbar\omega$ в виде:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D1}-\hbar\omega}^{\varepsilon_{D1}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_{D1}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_{D1}-\hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (8)$$

В этой формуле α_1 — парциальный спектр оптических переходов электронов от хвоста валентной зоны в дефект, α_2 — парциальный спектр оптических переходов электронов от валентной зоны в дефект.

Для оптических переходов электронов от хвоста валентной зоны в дефект получаем выражение:

$$\alpha_1 = A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_{D1}} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = = \frac{Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)\hbar\omega} \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V)) + \ln \frac{(\exp(2b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)) + 1)}{(\exp(2b(\varepsilon_{D1} + \varepsilon_D + \hbar\omega)) + 1)} \quad (9)$$

Для оптических переходов электронов от валентной зоны в дефект в случае, когда $n_1=n_2=1$:

$$\alpha_2 = A \int_{\varepsilon_{D1}-\hbar\omega}^{\varepsilon_V} N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right) \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{2Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)E_g \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon_D + \hbar\omega) \times \times (\arctg \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)) - \arctg \exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D))) - - \frac{Bg(\varepsilon_D)}{2aN(\varepsilon_C)E_g \hbar\omega} (\exp(-a(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))^2 - \exp(-a(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D))^2) \quad (10)$$

Для случая, когда $n_1=n_2=1/2$ аналитического решения получить не удалось, поэтому его рассчитывали численными методами.

Для оптического перехода электронов от дефектов в хвост зоны проводимости, аналогично формуле (6), запишем формулу Кубо-Гринвуда для условия $\varepsilon_C - \varepsilon_{D2} > \hbar\omega$ следующим образом:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D2} - \hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (11)$$

ε_{D2} - в этой формуле — энергетическое положение точки пересечения распределения электронных состояний дефекта и хвоста зоне проводимости (рис.1). Выполним расчеты, подставив в формулу (11) функции распределения, заданные формулами (3)-(4).

$$\begin{aligned} \alpha &= A \int_{\varepsilon_{D2} - \hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C + \hbar\omega)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{Bg(\varepsilon_D)}{N(\varepsilon_V)b\hbar\omega} \exp(b(\varepsilon_D - \varepsilon_C + \hbar\omega)) \ln \frac{(1 + \exp(2b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D)))}{(1 + \exp(2b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D - \hbar\omega)))} \end{aligned} \quad (12)$$

Если адаптировать формулу (11) для условия $\varepsilon_C - \varepsilon_{D2} < \hbar\omega$ к оптическим переходам электронов получаем выражение:

$$\alpha = A \int_{\varepsilon_{D2} - \hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_{D2} - \hbar\omega}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (13)$$

где α_1 — парциальный спектр оптических переходов от дефекта в зону проводимости, α_2 — парциальный спектр оптических переходов от дефекта в хвост зоны проводимости. Подставив функции распределения (3) и (4), (5) в формулу (13), рассчитаем парциальные спектры оптических переходов от дефекта в зону проводимости и от дефекта в хвост зоны проводимости.

А для случая, когда $n_1 = n_2 = 1$ получаем выражения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= A \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_{D2}} \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V + \hbar\omega}{E_g} \right) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{2Bg(\varepsilon_D)}{b\hbar\omega E_g N(\varepsilon_V)} (\arctg(\exp(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D))) - \\ &- \arctg(\exp(b(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar\omega)))) - \frac{Bg(\varepsilon_D)}{2a\hbar\omega E_g N(\varepsilon_V)} (\exp(-a(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D)^2) - \exp(-a(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar\omega)^2)) \end{aligned} \quad (14)$$

Аналитического решения для случая, когда $n_1 = n_2 = 1/2$ получить не удалось, поэтому его рассчитывали численными методами расчета. Рассчитаем парциальные спектры оптических переходов от дефекта в хвост зоны проводимости:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= A \int_{\varepsilon_{D2} - \hbar\omega}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C + \hbar\omega)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{Bg(\varepsilon_D)}{b\hbar\omega N(\varepsilon_C)} \times \\ &\times \exp(b(\varepsilon_D - \varepsilon_C + \hbar\omega)) \ln \frac{(1 + \exp(2b(\varepsilon_C - \varepsilon_D - \hbar\omega)))}{(1 + \exp(2b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D - \hbar\omega)))} \end{aligned} \quad (15)$$

(7), (9) и (12), (15) расчеты спектров поглощения оптических переходов электронов от хвоста валентной зоны в дефект и от дефекта в хвост зоны проводимости для получения их аналитических решений показали, что условия должны быть выполнены $b = \beta_1$, $b = \beta_2$. Значение b в формулах (10) и (14) может быть произвольным.

Формулы (7), (9) и (12), (15) рассчитаны для условий $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V < \hbar\omega$ и $\varepsilon_C-\varepsilon_{D2} > \hbar\omega$, $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V > \hbar\omega$ и $\varepsilon_C-\varepsilon_{D2} < \hbar\omega$ рассчитаны для условий (10), (14) учитывая, что эти выражения существенно не отличаются друг от друга, мы рассматриваем спектры, в которых определяются только оптическими переходами электронов от валентной зоны и ее хвоста в дефект. Для расчета приведенных выше парциальных спектров в них параметры B , E_g , ε_{D1} , ε_{D2} , $g(\varepsilon_D)$, β_1 , β_2 , и b должны быть определены. Для этого мы используем экспериментально определенные значения спектров коэффициента оптического поглощения α -Si:H. На рис.2 представлен спектр коэффициента поглощения, определенный в экспериментах на нелегированном аморфном гидрогенизированном кремнии, выращенном в высокочастотном мгновенном газовом разряде. Разобьем этот спектр на межзонные, экспоненциальные и дефектные области поглощения. Глядя на B и E_g в аналитически рассчитанной формуле как подгоночные параметры, определяем путем сопоставления значений спектров межзонного поглощения, полученных в результате эксперимента, аналогично определяем β_1 и β_2 по области экспоненциального спектра поглощения, а $g(\varepsilon_D)$ и b – от области в дефектного поглощения.

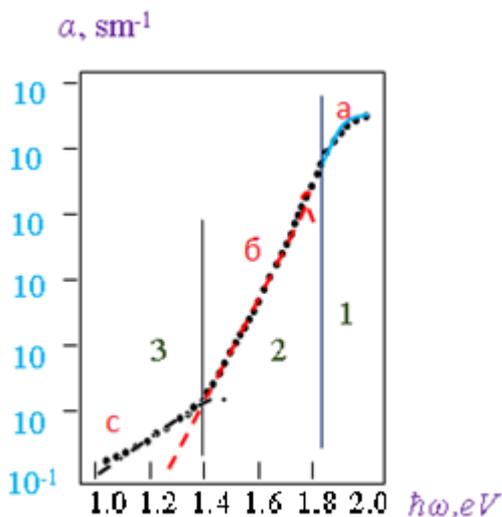


Рис.2. Экспериментально определенная спектр оптического поглощения α -Si:H :

- 1 - область межзонного поглощения,
 - 2 - область экспоненциального поглощения,
 - 3 - область дефектного поглощения.
- Спектры оптического поглощения, рассчитанные формулам:
- a - область межзонного поглощения,
 - b - область экспоненциального поглощения,
 - c - область дефектного поглощения.

Из рис.2 видно, что начало спектра поглощения в дефектах соответствует точке, где энергия поглощенных фотонов равна $\hbar\omega = 1.38$ eV, поэтому условия оптических переходов между разрешенными зонами и дефектами напишем следующие: $\varepsilon_{D1}-\varepsilon_V > \hbar\omega < 1.38$ eV и $\varepsilon_C-\varepsilon_{D2} < \hbar\omega < 1.38$ eV выражение. Для получение аналитического выражения, когда $n_1 = n_2 = 1/2$ спектра межзонального поглощения получаем:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{B}{4\hbar\omega E_g} \left[2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega} - (E_g - \hbar\omega)^2 \arctg\left(\frac{E_g - \hbar\omega}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}}\right) \right] \quad (16)$$

Установлено, что $B = 1,71 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ в $E_g = 1,78 \text{ эВ}$ будет равными экспериментально определенная и расчетные результаты, полученные по формуле (16) для спектра межзонного поглощения (рис.2. кривая - *a*). Как показано в литературах значения B и E_g имеет одинаковое значение для всех областей коэффициента оптического поглощения, а также для аналитического решения экспоненциального поглощения получено выражение:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{B}{(\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g)) \exp((\beta_1 - \beta_2)(\varepsilon_C - \varepsilon_0)) [\exp((\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega) - 1] \quad (17)$$

Экспоненциальный спектр поглощения, рассчитанный по формуле (17), определенный из эксперимента при $\beta_1 = 24,2 \text{ эВ}^{-1}$ и $\beta_2 = 31,7 \text{ эВ}^{-1}$ установлено, что они соответствуют друг другу (рис.2. кривая *b*).

Поскольку ε_{D1} и ε_{D2} являются энергетическими точками пересечения экспоненциальных хвостов разрешенных зон и распределения электронных состояний в дефектах, то рассчитаем их по следующим формулам:

$$N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_C)) = 2g(\varepsilon_D) \exp(b(\varepsilon_{D2} - \varepsilon_D)) \quad (18)$$

$$N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V)) = 2g(\varepsilon_D) \exp(-b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D)) \quad (19)$$

Отсюда мы получаем следующие выражения:

$$\varepsilon_{D1} = (\ln(\frac{N(\varepsilon_V)}{2g(\varepsilon_D)}) + b\varepsilon_D + \beta_1\varepsilon_V) / (b + \beta_1) \quad (20)$$

$$\varepsilon_{D2} = (\ln(\frac{2g(\varepsilon_D)}{N(\varepsilon_C)}) + b\varepsilon_D + \beta_2\varepsilon_C) / (b + \beta_2) \quad (21)$$

Результаты расчетов, полученные по этим формулам, представлены на рис.3. Было показано, что при изменении значения b от 14 до 35 ε_{D1} и ε_{D2} изменяются в диапазоне - 0,1 эВ (рис. 3). Расчеты показали, что эти изменения ε_{D1} и ε_{D2} существенно не влияют на вид спектров поглощения. С учетом выше изложенного расчеты оптических переходов электронов из валентной зоны в дефекты, выполненные для значений $\varepsilon_D^0 - \varepsilon_V \approx 0,56 \text{ эВ}$ и $N_D^0 = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, являются приближенными результатами расчета, полученными при $n_1=1$ и $n_1=1/2$ показали, что спектры совершенно не отличались друг от друга. Подчеркнем, что результаты эксперимента определяются суммой парциальных спектров оптических переходов электронов из валентной зоны и ее хвоста. Поэтому результаты расчета, полученные по формулам (14) и (15) для различных значений b при $\varepsilon_D^0 - \varepsilon_V \approx 0,56 \text{ эВ}$ в $N_D^0 = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, представлены на рис.4.

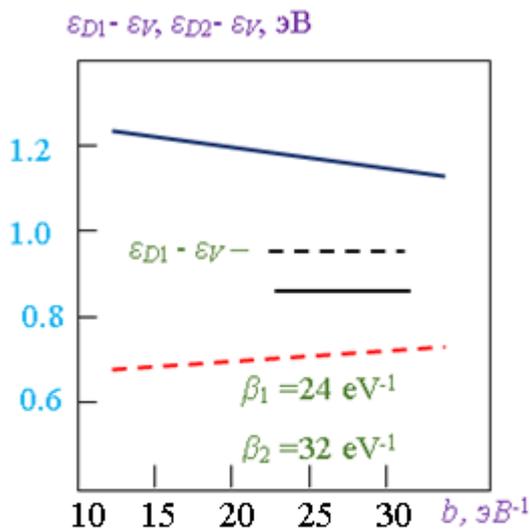


Рис.3. Зависимость от b точки пересечения электронных состояний в дефектах и хвостов валентной зоны и зоны проводимости рассчитанные по формулам (20) и (21).

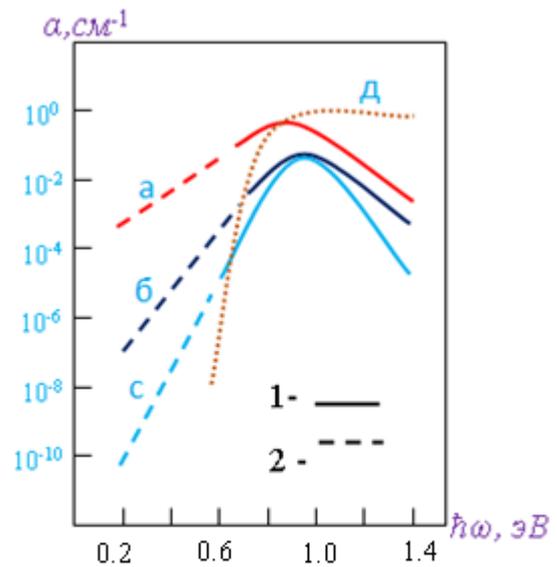


Рис.4. Парциальные спектры электронных переходов от хвоста валентной зоны в ϵ_D -дефекту при 1 - $\epsilon_{D1} - \epsilon_V > \hbar\omega$ и 2- $\epsilon_{D1} - \epsilon_V < \hbar\omega$ а - $b = 8 \text{ эВ}^{-1}$, б - $b = 24 \text{ эВ}^{-1}$, с - $b = 32 \text{ эВ}^{-1}$.

На этом рисунке для сравнения представлен спектр оптических переходов электронов из валентной зоны в дефект, рассчитанный по формуле (14). Из рисунка видно, что спектры оптических переходов электронов из хвоста валентной зоны в дефект не влияют на вид спектра поглощения в дефектах. Из рис.2 видно, что значения спектра поглощения этого образца в дефектах уменьшаются по мере уменьшения энергии поглощенных фотонов.

Такое снижение можно наблюдать только в спектрах оптических переходов электронов из валентной зоны в дефект $\epsilon_D^+ - \epsilon_V \approx 1,36 \text{ эВ}$ Это показывает, что основную роль в определении спектра поглощения дефектов образца $\alpha\text{-Si:H}$ в экспериментальных результатах, представленных на рис. 2 (кривая - в), играют дефекты D^+ .

В третьей главе диссертации «**Расчет спектров дефектного поглощения характерных для гидрогенизированных аморфных полупроводников**» приводятся сведения о дефектах, характерных для аморфного гидрогенизированного кремния, их концентрациях и энергетическом положении. По формуле Кубо-Гринвуда рассчитаны парциальные спектры дефектного поглощения. Для этого представлен новый метод записи интеграла в формуле Кубо-Гринвуда в виде определенного интеграла и выбора пределов этого интеграла в зависимости от энергии поглощенных фотонов. На основе формулы Кубо-Гринвуда методом приближения Дэвиса-Мотта получены новые формулы для парциальных спектров дефектного поглощения в аморфном гидрогенизированном кремнии.

Как мы видели выше, гидрогенизированные аморфные полупроводники делятся на следующие типы в зависимости от зарядового положения дефектов, образующих оборванные связи, расположенные в щели подвижности.

Поскольку концентрация дефектов в виде бивакансий и тривакансий в аморфном гидрогенизированном кремнии очень мала, они практически не влияют на электрофизические характеристики этого материала.

Теперь давайте посмотрим на вычисление $g(\varepsilon_D)$:

$$N_D = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} d(\varepsilon) = \frac{2}{b} g(\varepsilon_D) \operatorname{arctg} \exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D)) \Big|_{-\infty}^{\infty} = \frac{2\pi}{b} g(\varepsilon_D), \quad g(\varepsilon_D) = \frac{bN_D}{2\pi} \quad (22)$$

В табл. 1 представлены результаты расчетов, выполненных путем замены N_D из формулы (22) на экспериментально определенные значения.

Таблица 1.

| | $b, \text{эВ}^{-1}$ | $g(\varepsilon_D), \text{эВ}^{-1} \text{см}^{-3}$ | $b, \text{эВ}^{-1}$ | $g(\varepsilon_D), \text{эВ}^{-1} \text{см}^{-3}$ | $b, \text{эВ}^{-1}$ | $g(\varepsilon_D), \text{эВ}^{-1} \text{см}^{-3}$ |
|-------|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|
| D^0 | 2 | $8.6 \cdot 10^{15}$ | 24 | $1.72 \cdot 10^{16}$ | 32 | $2.29 \cdot 10^{16}$ |
| D^- | 2 | $5.73 \cdot 10^{15}$ | 24 | $1.15 \cdot 10^{16}$ | 32 | $1.53 \cdot 10^{16}$ |
| D^+ | 2 | $5.73 \cdot 10^{15}$ | 24 | $1.15 \cdot 10^{16}$ | 32 | $1.53 \cdot 10^{16}$ |

С учетом вышеизложенного расчеты оптических переходов электронов из валентной зоны в дефект проведены для $\varepsilon_D^0 - \varepsilon_V \approx 0,56 \text{ эВ}$ и $N_D^0 = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ сравнение результаты расчетов, полученные при $n_1=1$ и $n_1=1/2$ этих спектров показали, что они совершенно не отличаются друг от друга. Это показало, что основную роль в определении спектра поглощения дефектов образца $\alpha\text{-Si:H}$ в экспериментальных результатах, представленных на рис.2, играют дефектные состояния.

В четвёртой главе диссертационной работы под названием «**Новый метод расчета плотности электронных состояний в дефектах аморфного гидрогенизированного кремния**» показывает, что спектры дефектного поглощения, полученные по двум различным видам формулы Кубо-Гринвуда, совершенно одинаковы. Из формулы Кубо-Гринвуда, записанной для оптического перехода электронов из валентной зоны в дефект. Распределение плотности электронных состояний в дефекте D^+ этого материала определялось с использованием значений спектра дефектного поглощения, определенных в экспериментах. Известно, что спектры дефектного поглощения в $\alpha\text{-Si:H}$ начинаются при энергии поглощенных фотонов менее 1,4 эВ. В аморфном гидрогенизированном кремнии, учитывая количество моновакансий в нем, при таких энергиях в целом могут одновременно происходить восемнадцать оптических переходов, связанных с электронными состояниями в дефектах. В то же время при поглощении фотонов с такой энергией происходит и оптический переход электронов из хвоста валентной зоны в хвост зоны проводимости (экспоненциальное поглощение).

Экспериментально определяемые спектры поглощения в дефектах определяются суммой парциальных спектров, соответствующих выше указанным оптическим переходам электронов. Поэтому в физике аморфных полупроводников теоретический расчет спектров оптического поглощения аморфных полупроводников в области дефектного поглощения представляет собой весьма сложную задачу.

В предыдущей главе было показано, что значения спектра поглощения в дефектах определяются в основном оптическими переходами электронов между состояниями в дефектах и в разрешенных зонах. Согласно приближению Дэвиса-Мотта для этих оптических переходов мы уже показали, что формула Кубо-Гринвуда для оптических переходов электронов из валентной зоны в дефекты может быть записана в следующем виде: при $\varepsilon_{D1} - \varepsilon_V < \hbar\omega$:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int g_V(\varepsilon) g_D(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (23)$$

или

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (24)$$

Видно, что спектр поглощения в дефектах зависит от плотности электронных состояний в дефектах. Поэтому, если известно аналитическое решение парциального спектра оптического перехода из валентной зоны в дефект, то по этому спектру можно определить распределение плотности электронных состояний в дефектах. Учитывая это, в данной главе мы предлагаем новый метод определения плотности распределения электронных состояний в дефектах. Выше мы видели, что для определения собственного решения спектров коэффициента оптического поглощения по формуле Кубо-Гринвуда было показано, что интеграл в этой формуле следует записать в виде определенного интеграла, и показано, что можно адаптировать формула (23) к оптическим переходам электронов.

Теперь адаптируем формулы (24) к оптическим переходам электронов, аналогично формуле (23):

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (25)$$

Здесь α_1 — парциальные спектры оптических переходов электронов из хвоста валентной зоны в дефект, α_2 — парциальные спектры оптических переходов из валентной зоны в дефект.

Экспериментально определенные результаты спектра поглощения аморфного гидрированного кремния в дефектах представлены на рис.2.

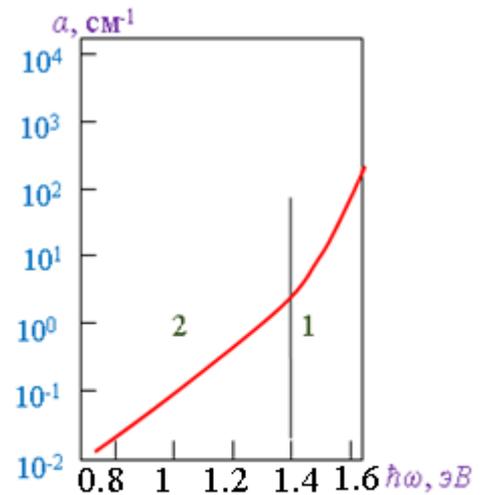


Рис. 5. Парциальный спектр света на дефектах поглощения, рассчитанный для оптического перехода электронов из валентной зоны в дефект D^+ , 1 – экспоненциальное поглощение и 2 – спектр дефектного поглощения.

Но при указанных выше экспериментально определенных значениях энергетических состояний концентрации дефектов суммарная величина парциальных спектров поглощения в дефектах не соответствовала экспериментальному спектру дефектного поглощения, показанному на рис. 2. Дальнейшие расчеты показали, что только рассчитанные спектры оптических переходов из валентной зоны в дефект при $\varepsilon_D^+ - \varepsilon_V \approx 1,28$ эВ, $N_D^+ = 6 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $b = 10$ эВ⁻¹ соответствуют экспериментальным результатам. (рис.5.). Это означает, что концентрация дефектов в α -Si:H, показанная на рис.4, не совпадает с концентрацией дефектов, показанной выше.

(25) запишем следующие выражения для парциального спектра оптических переходов электронов от хвоста валентной зоны и от валентной зоны в дефектам:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (26)$$

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (27)$$

Подставляя в эти формулы распределения плотности электронных состояний в валентной зоне, ее хвосте и дефектах, рассчитаем парциальные спектры оптических переходов электронов от хвоста валентной зоны в дефект по формуле (26) и по формуле (27)):

$$\alpha_1(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{2AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} \frac{\exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V))}{\exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D)) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} d\varepsilon$$

Опять же, как и в главе 3, мы потребуем, чтобы $\beta_1 = b$:

$$\alpha_1(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_{D1} + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{b\hbar\omega} \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D)) \left[\ln \frac{\exp(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D + \hbar\omega))}{1 + \exp(2b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D + \hbar\omega))} - \right. \\ \left. - \ln \frac{\exp(2b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))}{1 + \exp(2b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega))} \right] \quad (28)$$

Видно, что спектры (28) и (9) совершенно не различаются.

Теперь рассчитаем спектры оптических переходов электронов из валентной зоны в дефект.

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1} \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ = \frac{2AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1} \frac{1}{\exp(b((\varepsilon - \varepsilon_D))) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} d\varepsilon$$

когда $n_1 = 1$:

$$\begin{aligned}\alpha_2(\hbar\omega) &= \frac{2AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{E_g \hbar\omega} \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} \frac{(\varepsilon_C - \varepsilon)}{\exp(b((\varepsilon - \varepsilon_D)) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D)))} d\varepsilon = \\ &= \frac{AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{E_g \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon_D) \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} \frac{(\varepsilon - \varepsilon_D)}{\operatorname{ch}(b((\varepsilon - \varepsilon_D)))} d(\varepsilon - \varepsilon_D)\end{aligned}$$

Чтобы получить аналитическое решение, мы заменяем распределение гиперболической последовательности распределением Гаусса.

$$\begin{aligned}\alpha_2(\hbar\omega) &= \frac{AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{E_g \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon_D) \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} \frac{(\varepsilon - \varepsilon_D)}{\operatorname{ch}(b((\varepsilon - \varepsilon_D)))} d(\varepsilon - \varepsilon_D) = \\ &= \frac{AN(\varepsilon_V)g(\varepsilon_D)}{2aE_g \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon_D) [\exp(a(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)^2) - \exp(a(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D)^2)]\end{aligned}\quad (29)$$

Из того, что формулы (29) и формулы (10) одинаковы, можно сделать следующий вывод.

Спектры оптических переходов электронов от валентной зоны и хвоста валентной зоны в дефекты, полученный по формуле (23), и спектр, полученный по формуле (24), совершенно не отличаются друг от друга. Поэтому, спектры дефектного поглощения можно рассчитать по формулам (23) и (24), если правильно выбрать пределы определеного интеграла в формуле Кубо-Гринвуда и распределение плотности электронных состояний в этом интеграле.

Интеграл от функции двух переменных по одной переменной вычисляется по следующей формуле:

$$\frac{d}{dy} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \frac{\partial \beta(y)}{\partial y} f(\beta(y), y) - \frac{\partial \alpha(y)}{\partial y} f(\alpha(y), y) \quad (30)$$

Применим эту формулу к формуле (26) и получим следующее выражение для распределения энергетических состояний D⁺-дефекта:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \hbar\omega} = A \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} g_D(\varepsilon) \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} - \frac{\alpha}{\hbar\omega} + g_D(\varepsilon_V + \hbar\omega) g_V(\varepsilon_V) \quad (31)$$

В этой формулировке мы используем модель распределения электронных состояний в валентной зоне и плотности распределения электронных состояний в D⁺-дефекте:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \alpha}{\partial \hbar\omega} &= A \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} \frac{g(\varepsilon_D)}{\operatorname{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} (N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon - \hbar\omega}{E_g \hbar\omega} \right) d\varepsilon - \frac{\alpha}{\hbar\omega} + \frac{A}{\hbar\omega} N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_V}{E_g} \right) + \\ &+ \frac{g(\varepsilon_D)}{\operatorname{ch}(b(\varepsilon_V + \hbar\omega - \varepsilon_D))} = \frac{Ag(\varepsilon_D)N(\varepsilon_V)}{E_g \hbar\omega} \int_{\varepsilon_{D1}}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} \frac{d\varepsilon}{\operatorname{ch}(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} - \frac{\alpha}{\hbar\omega} + \frac{Ag(\varepsilon_D)N(\varepsilon_V)}{\hbar\omega} \frac{1}{\operatorname{ch}(b(\varepsilon_V + \hbar\omega - \varepsilon_D))}\end{aligned}\quad (32)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \alpha}{\partial \hbar\omega} &= \frac{2Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)\hbar\omega E_g} [\operatorname{arctg} \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)) - \operatorname{arctg} \exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D))] - \\ &- \frac{\alpha}{\hbar\omega} + \frac{B}{N(\varepsilon_C)\hbar\omega} g_D(\varepsilon_V + \hbar\omega - \varepsilon_D)\end{aligned}\quad (33)$$

Теперь мы определяем, какую энергетическую определяет энергетическое состояние $\varepsilon_V + \hbar\omega - \varepsilon_D$.

$$g_D(\varepsilon - \varepsilon_D) = g_D(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega) = g_D(\varepsilon), \quad \varepsilon = \varepsilon_V + \hbar\omega \quad (34)$$

Отсюда следует, что энергетическое состояние дефекта D^+ расположено выше верхней границы валентной зоны на $\hbar\omega$.

$$g_D(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon_V + \hbar\omega - \varepsilon_D))} \quad (35)$$

Используя формулу (34), запишем (33) в следующем виде:

$$g_D(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_C)\hbar\omega}{B} \left(\frac{\partial\alpha}{\partial\hbar\omega} + \frac{\alpha}{\hbar\omega} - \frac{2Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)\hbar\omega Eg} [\arctg \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + \hbar\omega)) - \arctg \exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D))] \right) \quad (36)$$

Запишем формулу (36) следующим образом:

$$g_{D1}(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_C)(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2B} \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} + \frac{\alpha_{i+1} + \alpha_i}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i} - \frac{4Bg(\varepsilon_D)}{bN(\varepsilon_C)(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)Eg} \times \right. \quad (37)$$

$$\left. \times [\arctg \exp(b(\varepsilon_V - \varepsilon_D + (\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)/2)) - \arctg \exp(b(\varepsilon_{D1} - \varepsilon_D))] \right)$$

Запишем формулу (34) следующим образом:

$$g_{D1}(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon_V + \frac{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i}{2} - \varepsilon_D))} \quad (38)$$

где $\hbar\omega_i$, $\hbar\omega_{i+1}$, α_i , α_{i+1} - энергии поглощенных фотонов оптического перехода электронов от валентной зоны в D^+ дефект, экспериментально определенные значения коэффициента дефектного поглощения (рис. 2). Из формул (37) и (38) с использованием значений парциального спектра оптических переходов электронов от валентной зоны в D^+ , показанных на рис. 5, плотность электронных состояний в дефекте D^+ показана на рис.6.

ВЫВОДЫ

На основании исследования спектров оптического поглощения и плотности электронных состояний аморфных полупроводников были сделаны следующие выводы:

1. Определены условия разделения формулы «Кубо-Гринвуда» на области в зависимости от энергии поглощенных фотонов при расчете спектральных характеристик коэффициента поглощения в дефектах

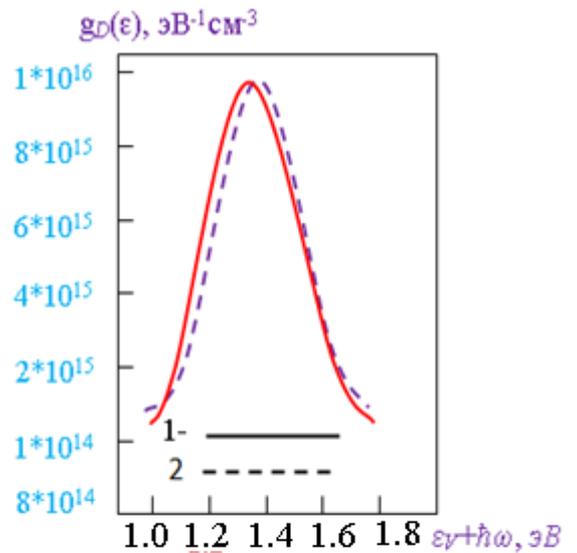


Рис. 6. 1 - распределение плотности электронных состояний в дефекте D^+ , рассчитанные по формуле (37), и 2 - по формуле (38).

гидрогенизированных аморфных полупроводников по этой формуле методом приближение Дэвиса-Мотта.

2. Определены условия соответствия формулы Кубо-Гринвуда к типам оптических переходов электрона при расчета спектров коэффициента поглощения определяемых оптическими переходами с участием электронных состояний в дефектах, разрешенных зон и их хвостах.

3. Показано, что вид спектральных характеристик коэффициента поглощения, с оптическими переходами электронов между электронными состояниями в дефектах и разрешенных зон, определяются распределением плотности состояний электронов в разрешенных зонах.

4. Показано необходимость соответствия формулу Кубо-Гринвуда к типам оптических переходов электронов при расчета спектров коэффициента поглощения в дефектах по этой формулу.

5. Определены спектры коэффициентов поглощения оптических переходов между электронными состояниями в дефектах и в экспоненциальных хвостах разрешенных зон.

6. Предложен новый метод определения плотности состояний электронов в дефектах по спектральным значениям коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников.

7. Показано, что если известен спектр коэффициента оптического поглощения аморфного полупроводника, полученный из экспериментов, то по этому спектру и формуле Кубо-Гринвуда можно определить распределение плотности электронных состояний в дефектах.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04
ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE
NAMANGAN INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

NAMANGAN INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY

HOLMIRZAYEV OYBEK TO‘RAMIRZAYEVICH

**ABSORPTION SPECTRA AND ELECTRONIC STATES DENSITY IN
DEFECTS OF AMORPHOUS SILICON**

01.04.10 – Physics of semiconductors

**ABSTRACT OF DISSERTATION DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Namangan – 2025

The topic of the dissertation Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2023.4.PhD/FM615.

The dissertation was completed at the Namangan Institute of Engineering and Technology. The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the website Of the Scientific Council (www.nammti.uz) and on the Information and Educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: **Ikramov Rustamjon G'ulomjonovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Gulyamov Gofurjon**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

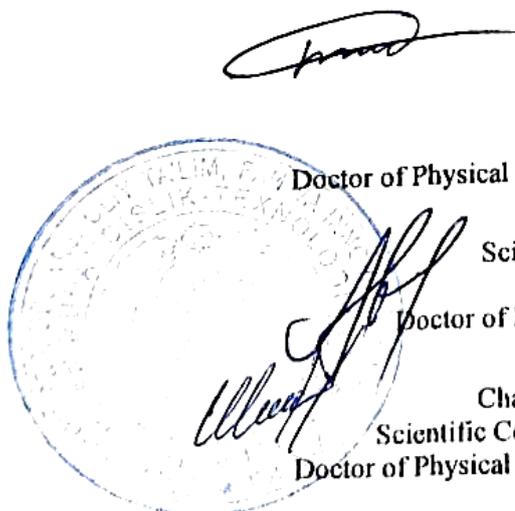
Rasulov Rustam Yavkachovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Urgench State University**

The defense of the dissertation will be held at 12⁰⁰ on " 1 " 02 2025 at the meeting of Scientific Council PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan institute of Engineering and Technology. (Adress: 160115, Namangan city, Kasansay Str. 7, administrative building, small conference hall, tel. (+99869)228-76-68, 225-10-07, Fax: (+99869) 228-76-75. e-mail: niei_info@edu.uz)

You can get acquainted with the dissertation work at the Information Resource Center of the Namangan Institute of Engineering and Technology (registration number No. 354). Address: 160115, Namangan city, Kasansay Str.7, tel. (+99869) 228-76-68; Fax: (+99869) 228-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz

The abstract of the dissertation was sent on " 23 " 01 , 2025.
(mailing protocol No. 21 on " 23 " 01 2025)



U.I.Erkaboev
Chairman of Scientific Council
on award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

A.A. Abdugarimov
Scientific Secretary of Scientific Council
on award of Scientific Degrees,
Doctor of Philosophy(PhD), Associate Professor

N.Sharibayev
Chairman of the Scientific Seminar at the
Scientific Council on award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of research work is to provide a physical basis for the analytical expressions of the spectral characteristics of the absorption coefficient for optical transitions involving electronic states in defects typical of hydrogenated amorphous semiconductors and to determine the density distribution of electronic states in defects using these spectra.

The object of research work consists of optical absorption coefficient spectra of hydrogenated amorphous semiconductors.

The scientific novelty of the research work are as follows:

the optical absorption coefficient spectral characteristics of hydrogenated amorphous semiconductors using the Kubo-Greenwood formula, the Davis-Mott approximation method reveals the possibility of calculating absorption spectra in defects;

for the first time, the integral of the Kubo-Greenwood formula for the absorption spectrum in defects was written in the form of a definite integral, and the method of writing this formula separately depending on the energy of the absorbed photons was proposed;

For the first time, analytical expressions of the spectra of the absorption coefficient in defects (broken bonds) were derived and it was shown that this spectrum can be determined by the distribution of the density of electronic states in the allowed zones;

for the first time, a method for determining the distribution of the density of electronic states in the defects was proposed using the absorption spectrum of the experimentally determined defects of amorphous hydrogenated silicon.

The practical results of the research are as follows:

amorphous semiconductors determine spectral characteristics of absorption coefficient in defects using the Davis-Mott approximation method, using Kubo-Greenwood formula to separate the optical transitions of electrons into areas and types, the relationship between density distributions of electron states in all defects and spectral characteristics of optical absorption coefficient characteristic of hydrogenated amorphous silicon connections are identified;

new formulas for absorption spectra in defects were derived, and with the help of these formulas, a new method for determining the density of electronic states in defects of hydrogenated amorphous silicon was proposed.

The reliability of the research results is ensured by the agreement of the results of the calculation of absorption coefficient spectra with the experimental results and the use of traditional mathematical calculation methods.

Scientific and practical significance of research results.

The scientific significance of the research results is to allow to expand the ideas about the connections between the absorption coefficient spectrum and the optical transitions with the participation of the electronic states in all the defects characteristic of amorphous semiconductors.

The practical significance of the research results is that the proposed method for calculating the spectral characteristics of the absorption coefficient for optical

transitions involving electronic states in all defects characteristic of hydrogenated amorphous semiconductors allows for the creation of optoelectronic devices with improved optical properties.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, a list of references and applications. The volume of the dissertation is 101 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть, I part)

1. Ikramov R.G., Muminov X.A., Nuritdinova M.A., Sulstonov B.Q., **Xolmirzayev O.T.**, Mamaxanov A.A. Dangerous bonds individual of hydrogenated amorphous silicon and defect absorption spectra // *East European Journal of Physics*. 2023. Vol.4, pp 244-250 (№4, **Scopus**. IF:0.8, Q4; <https://periodicals.karazin.ua/eejp/article/view/22452>)
2. Ikramov R.G., **Xolmirzayev O.T.**, Sultanov B. K., Muminov K. A., Khasankhanov K. A., Abdullaeva G. U. Spectra of the defect absorption coefficient of amorphous semiconductors // *Andijon davlat universiteti ilmiy xabarnomasi*. 2022. Vol. 4, pp. 24-27 (01.00.00 № 6)
3. Абдулазизов. Б.Т., Икрамов.Р.Г., Нуриддинова.М.А., Султанов.Б.К., **Холмирзаев.О.Т.**, Дефекты, характерные для гидрогенизированных аморфных полупроводников, и спектры дефектного поглощения // *Узбекский журнал физики*. 2023. Vol. 25, pp. 7-14 (01.00.00. №3)
4. Ikramov R.G., Nuritdinova M.A., Sulstonov B.Q., **Xolmirzayev O.T.** Hidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlarga xos nuqsonlar va nuqsonlarda yutilish spektrlari // *Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi*. 2022. Maxsus son. 628-636 betar (01.00.00. №14).
5. Ikramov R.G., Nuritdinova M.A., Sulstonov B.Q., **Xolmirzayev O.T.** Amorf yarimo'tkazgichlarni nuqsonlardagi elektron holatlarining zichligini hisoblash // *Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi*. 2024. 29-33 betlar. (01.00.00. № 5)
6. Икрамов Р.Г., Нуриддинова М.А., Султонов Б.К., **Холмирзаев О.Т.** Новый метод расчета плотности состояний электронов в дефектах аморфных полупроводников // *Buxoro davlat universiteti ilmiy axborotnomasi*. 2024. 154-160 betlar (01.00.00. №10)
7. Jalalov R. M. Ikramov R.G'., Nuriddinova M. A., Mo'minov X. A., Sultanov B. Q., **Xolmirzayev O. T.** Amorf yarimo'tkazgichlarda nuqsonlardagi elektron holatlar zichligini hisoblashning yangi usuli. // *Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi*. 2024. № 10, 20-24 betlar (01.00.00. №10)

II bo'lim (II часть, II part)

8. Икрамов Р.Г. Муминов Х.А. **Холмирзаев О.Т.** Султанов Б.К. Хасанханов Х.А. Абдуллаева Г.У. Спектры коэффициента дефектного поглощения аморфных полупроводников // Great Britain Scientific Collection "Interconf", Manchester. 2022. №107, p. 409-419.
9. Икрамов.Р.Г., Зайнобиддинов.С., Жалолов.Р.М., **Холмирзаев.О.Т.** Образования максимумов в спектрах дефектново поглощения аморфных полупроводников. // "IV международная конференция по актуальным

- проблемам молекулярной спектроскопии конденсированных сред», Самарканд. -2013. - с.116-119.
10. Zaynobiddinov S., Ikramov R.G., Jalolov R.M., **Xolmirzayev O.T.**, Boyto'rayeva G. Amorf yarimo'tkazgichlarda yutilish ko'fsenti spektri va elektron holatlari zichligi taqsimoti // "Zamonaviy fizikaning dolzarb muammolari Respublika ilmiy-nazariy anjumani. 1-qism. Fundamental tadqiqotlar natijalari. 2013. 4-5 betlar.
 11. Ikramov R.G., Nuritdinova M.A., Sulstonov B.Q., **Xolmirzayev O.T.**, Nematullayev J.R. Hidrogenizatsiyalangan amorf yarimo'tkazgichlardagi nuqson va nuqsonlardagi yutilish spektrlari // Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari mavzusidagi Respublika ilmiy amaliy anjumani to'plami. Namangan. 2023. 58-59 betlar.
 12. Икрамов Р.Г., Жалолов Р.М., **Холмирзаев О.Т.** Аморф кремнидаги нуқсонлар ва нуқсонлардаги ютилиш спекторлари // Международная научно практическая конференция. Андижан. 2023. стр.177-178.
 13. Ikramov R.G., Jalolov R.M., Abdullazizov B.T., **Xolmirzayev O.T.** Amorf yarimo'tkazgichlarda nuqsonlarni energetik o'rni va optik yutilish ko'fsenti spektrlari // "Yarimo'tkazgilar fizikasi va qurilmalari hamda ularning muammolari" mavzusida hududiy ilmiy anjuman. Namangan. 2013. 31-32 betlar
 14. Ikramov R.G'., **Xolmirzayev O.T.**, Sulstonov B.Q., Nuriddinova M.A. Amorf yarimo'tkazgichlarning optik yutilish ko'ffisientini fundamental yutilish sohasi // "Yarimo'tkazgichlar fizikasining fundamental va amaliy muammolari: yechimlari va istiqbollari" mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. 1-qism. Namangan. 2024. 175-180 betlar.
 15. Ikramov R.G'., **Xolmirzayev O.T.**, Sulstonov B.Q., Muminov X.A. Amorf yarimo'tkazgichlarni optik yutilish ko'ffisientini eksponensial yutilish sohasi // "Yarimo'tkazgichlar fizikasining fundamental va amaliy muammolari: yechimlari va istiqbollari" mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. 1-qism. Namangan. 2024. 118-123 betlar.
 16. Ikramov R.G'., Nuriddinova M.A., Muminov X.A., Sulstonov B.Q., **Xolmirzayev O.T.** a-Si:H ning harakatchanlik tirqishini teperaturaga bog'lanishi // "Yarimo'tkazgichlar fizikasining fundamental va amaliy muammolari: yechimlari va istiqbollari" mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. 1-qism. Namangan. 2024. 247-249 betlar.

Avtoreferat Namangan Shahar “Rahimbobo Mashrab” nashriyotida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi (23.01.2025).

Bosishga ruxsat etildi 23.01.2025-y.
Bichimi 60X84 1/16, Times New Roman”
Garniturada raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 3. Adadi: 100. Buyurtma: № 1

“FAZILAT ORGTEX SERVIS”

Hususiy korxonasi bosmoxonasida chop etildi.
Manzil: Namangan sh. Amir Temur ko‘chasi 97 uy.
Tel: (+998) 91-346-44-43, (+998) 99-608-69-44