

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

---

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI**

**SULTONOV BOBUR QOBULJON O'G'LI**

**AMORF YARIMO'TKAZGICHLARNING OPTIK YUTILISH  
SPEKTRLARI VA ELEKTRON HOLATLARI ZICHLIGI**

**01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi**

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

**Namangan-2024**

**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**

**Sultonov Bobur Qobuljon o'g'li**

Amorf yarimo'tkazgichlarning optik yutilish spektrlari va elektron holatlari  
zichligi..... 3

**Султонов Бобур Кобулжон угли**

Спектры оптического поглощения и плотность электронных  
состояний аморфных полупроводников ..... 23

**Sultonov Bobur Qobuljon ugli**

Optical absorption spectra and density of electronic states of amorphous  
semiconductors..... 45

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 49

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

---

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI**

**SULTONOV BOBUR QOBULJON O'G'LI**

**AMORF YARIMO'TKAZGICHLARNING OPTIK YUTILISH  
SPEKTRLARI VA ELEKTRON HOLATLARI ZICHLIGI**

**01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi**

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

**Namangan-2024**

**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, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasiga ([www.nammti.uz](http://www.nammti.uz)) va Ziyonet Axborot-ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

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

**Rasmiy opponenlar:**

**Zaynabidinov Sirojiddin Zaynabidinovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor,  
O'zR FA akademigi

**Rasulov Rustam Yavkachovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot:**

**Buxoro davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Namangan muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli Ilmiy kengashning 2024 yil "2" noyabr soat 10:00 dagi 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](mailto:niei_info@edu.uz), Namangan muhandislik-texnologiya instituti 3-bino, 1-qavat, ilmiy kengash xonasi).

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

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ da tarqatildi.  
(2024 yil " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ dagi № \_\_\_\_\_ 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 zarurati va dolzarbligi.** Jahonda bugungi kunda zamonaviy mikroelektronika va fotoenergetika qurilmalarini yaratishda, 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 asosiy parametrlaridan bo'lgan optik yutilish koeffitsiyentini spektri va elektron holatlar zichligi borasida ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda, jumladan amorf yarimo'tkazgich namunalarda optik yutilish koeffitsiyenti spektrining zonalararo yutilish sohasidan zonalararo yutilish koeffitsiyenti bilan o'tkazuvchanlik zonasidagi lokallashmagan elektron holatlari zichligi taqsimoti orasidagi bog'lanishlarni aniqlash; eksponensial yutilish sohasidan o'tkazuvchanlik zonasining eksponensial dumidagi lokallashgan elektron holatlari zichligini taqsimoti orasidagi munosabatlarni aniqlash bo'yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Shu bilan birga amorf yarimo'tkazgichlarning elektron holatlar zichligini nazariy usulda tadqiq etish yarimo'tkazgichlar fizikasining dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda quyosh energiyasidan keng foydalanish va quyosh elementlarining samaradorligini oshirishga yordam beradigan yangi texnologiyalarni yaratish bo'yicha keng ko'lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. Qabul qilingan "O'zbekiston-2030" strategiyasida "Yashil iqtisodiyot"ga o'tish, uning asosi bo'lgan qayta tiklanuvchi energiyadan foydalanish ko'rsatkichlarini keskin oshirish"<sup>1</sup> bo'yicha muhim vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, amorf kremniy elektron holatlar zichligini nazariy usulda aniqlash, amorf kremniy asosidagi quyosh elementlarini samaradorligini oshirish muhim hisoblanadi. Shu munosabat bilan, samaradorligi yuqori fotoelementlarni yaratishda amorf yarimo'tkazgichli materiallarni olish talab etilmoqda. Bu materiallar ichida amorf kremniy asosiy hisoblanib, yaratilgan zamonaviy planar texnologiya ko'plab elektron asboblari va qurilmalar, yassi led ekranlar tannarxi birmuncha arzon bo'lgan quyosh panellari, ishlab chiqarish imkonini bermoqda. Amorf yarimo'tkazgichlarga xos bo'lgan barcha elektron holatlari ishtirokidagi optik o'tishlar bilan yutilish koeffitsiyenti spektri orasidagi bog'lanishlar haqidagi tasavvurlarni chuqurlashtirish juda muhim hisoblanadi.

---

<sup>1</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023 yil 11-sentabrdagi PF-158-son "O'zbekiston — 2030" strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni

Mazkur dissertatsiya ishida olib borilgan ilmiy-tadqiqot ishlari O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvarda “2022-2026 yillarga muljallangan Yangi O‘zbekiston taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida” gi PF-60-son Farmoni, 2020-yil 10-iyuldagi “Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg‘i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida” gi PQ-4779-son, 2018-yil 14-iyuldagi “Ilmiy va ilmiy-texnikaviy faoliyat natijalarini tijoratlashtirish samaradorligini oshirish bo‘yicha chora-tadbirlar to‘g‘risida” gi PQ-3855-sonli, 2021-yil 19-martdagi “Fizika sohasida ta‘lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora tadbirlari to‘g‘risida” gi PQ-5032-son qarorlari va mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga bog‘liqligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III: “Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligini rivojlanishi” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Jahonning ilg‘or ilmiy tadqiqot markazlarida amorf yarimo‘tkazgichlarning fotoelektrik va elektrofizik xususiyatlari tadqiq qilinmoqda. Xususan bu borada V.Y.Urbach, W.Ch.Chen, J.L.Feldman (AQSH), G.D.Codi, J.Taus (Chexiya), J.A. Guerra (Germaniya), B.A.Najafov (Ozarbayjon), A.A.Pronkin, T.A.Golikova (Rossiya)lar tomonidan amorf yarimo‘tkazgichlar haqida amaliy va nazariy tadqiqotlar olib borilgan.

O‘zbekistonlik mashxur akademiklar: R.A.Muminov, M.K.Baxadirxanov va S.Zaynobidinov ilmiy maktablarida hamda professorlar: Q.F.Abduraxmanov, E.Z.Imomov, R.Ya.Rasulov, Sh.Otajonov, M.Tursunovlar tomonidan yarimo‘tkazgichlarda optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalari borasida ko‘plab ilmiy izlanishlar amalga oshirilgan. Yuqorida nomlari keltirilgan olimlar tomonidan o‘tkazilgan ilmiy tadqiqotlarda amorf yarimo‘tkazgichlarning optik yutilish spektrlari orqali o‘tkazuvchanlik zonasi va shu zona dumidagi elektron holatlar zichligini nazariy usulda shu davrgacha o‘rganilmagan.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejaları bilan bog‘liqligi.** Tadqiqot Namangan muhandislik texnologiya instituti ilmiy-tadqiqotlari rejasi asosida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** amorf yarimo‘tkazgichlarni zonalararo, eksponensial yutilish spektrlari eksperimental qiymatlaridan va Kubo-Grinvud formulasidan foydalanib, ularni o‘tkazuvchanlik zonasi va shu zonaning dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini aniqlashdan iborat.

#### **Tadqiqotning vazifalari:**

amorf yarimo‘tkazgichlarni zonalararo va eksponensial yutilish spektrlari uchun Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko‘ra yoziladigan Kubo-Grinvud formulasidagi aniqmas integralni aniq integral ko‘rinishida yozish;

amorf yarimo‘tkazgichlarni zonalararo yutilish spektrining analitik ko‘rinishidagi proporsionallik koeffitsiyenti va harakatchanlik tirqishining energetik

kengligini tajribalardan aniqlangan zonalararo yutilish spektrlariga moslashtirish orqali aniqlash;

zonalararo yutilish spektridan uchun Kubo-Grinvud formulasidan o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlaydigan analitik ifodani keltirib chiqarish va amorf uglorodni tajribalardan aniqlangan zonalararo yutilish spektri qiymatlaridan uni o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlash;

amorf yarimo'tkazgichlarni eksponensial yutilish spektrning analitik ko'rinishidagi proporsionallik koeffitsiyenti, harakatchanlik tirqishining energetik kengligi hamda, valent va o'tkazuvchanlik zonalar eksponensial dumlari egriligini aniqlovchi parametrlarni zonalararo va eksponensial yutilish spektrlarining tajribalardan aniqlangan va analitik ifodalaridan hisoblangan qiymatlarini solishtirish orqali aniqlash;

amorf selen-oltingugurt qattiq qorishmasi uchun tajribadan aniqlangan eksponensial yutilish spektrining qiymatlaridan va Kubo-Grinvud formulasidan foydalanib, o'tkazuvchanlik zonasining dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlash.

**Tadqiqot ob'yekti** sifatida amorf uglorodni (*a-C*) tajribalardan aniqlangan zonalararo yutilish spektri hamda, amorf selen-oltingugurt qattiq qorishmasini (*a-Se<sub>0.5</sub>S<sub>0.5</sub>*) tajribalardan aniqlangan zonalararo va eksponensial yutilish spektrlari olingan.

**Tadqiqotning predmeti:** amorf yarimo'tkazgichlarda yorug'likni zonalararo va eksponensial yutilish spektrlarini tajribalardan aniqlangan qiymatlaridan o'tkazuvchanlik zonasi va uni dumidagi elektron holatlari zichligining taqsimotilarini aniqlanishdan iborat.

**Tadqiqotning usullari.** Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra Kubo-Grinvud formulasidan foydalanish, taqribiy hisoblash usuli va kompyuter grafikasi usuli (Maple7).

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

ilk bor amorf yarimo'tkazgichlarni zonalararo optik yutilish spektrining analitik ko'rinishidagi proporsionallik koeffitsiyenti va harakatchanlik tirqishining energetik kengligini tajribalardan aniqlangan zonalararo yutilish spektrlariga moslashtirish orqali aniqlash kerakligini ko'rsatilgan;

ilk bor zonalararo yutilish spektri uchun Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra yozilgan Kubo-Grinvud formulasidan o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini analitik ifodasini keltirib chiqarilganligi va amorf uglorodni tajribalardan aniqlangan zonalararo yutilish spektri qiymatlaridan uni o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligi taqsimoti aniqlangan;

ilk bor amorf yarimo'tkazgichlarni eksponensial yutilish spektrning analitik ifodasidagi proporsionallik koeffitsiyenti, harakatchanlik tirqishining energetik kengligi hamda, valent va o'tkazuvchanlik zonalar eksponensial dumlari egriligini aniqlovchi parametrlarni aniqlash uchun zonalararo va eksponensial yutilish spektrlarining tajribalardan aniqlangan va analitik ifodalaridan hisoblangan qiymatlarni solishtirish orqali aniqlash kerakligini ko'rsatilgan;

birinchi marta eksponensial yutilish spektri uchun Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra yozilgan Kubo-Grinvud formulasidan o'tkazuvchanlik zonasi dumidagi elektron holatlari zichligini taqsimotini aniqlovchi ifodalarni keltirib chiqarilgan;

ilk bor amorf selen-oltingugurt qattiq qorishmasi uchun tajribadan aniqlangan eksponensial yutilish spektrining qiymatlaridan va eksponensial yutilish spektri uchun yozilgan Kubo-Grinvud formulasidan foydalanib, shu materialni o'tkazuvchanlik zonasining dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimoti aniqlangan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

amorf yarimo'tkazgichlarni zonalararo va eksponensial yutilish spektrlarini Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra yozilgan Kubo-Grinvud formulasidan amorf yarimo'tkazgichlarni o'tkazuvchanlik zonasi va uni dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini analitik ifodalari keltirib chiqarilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchligi:** olib borilgan nazariy hisoblashlarni bajarishda xalqaro tan olingan metodlardan va uslubiy jihatdan sinalgan matematik usullardan foydalanilgani, nazariy hisoblangan natijalar adabiyotlarda keltirilgan tajriba natijalariga mos kelishi bilan asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati amorf yarimo'tkazgichlarga xos bo'lgan elektron holatlari zichligi taqsimotlari va zonalararo hamda, eksponensial yutilish spektrlari orasidagi bog'lanishlar haqidagi tasavvurlarni kengaytirish imkonini berishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati amorf yarimo'tkazgichlarga xos bo'lgan elektron holatlari zichligi taqsimotini hisoblash uchun taklif qilingan yangi usulda olinadigan natijalar optik xossalari yaxshilangan optoelektronika asboblari yaratish imkonini beradi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Amorf yarimo'tkazgichlarni spektral xarakteristikalarini va elektron holatlari zichligining taqsimoti, harakatchanlik tirqishining energetik kengligini zonalararo yutilish spektralini tadqiq qilishda olingan ilmiy natijalar asosida;

amorf yarimo'tkazgichlarda zonalararo optik yutilish spektridan foydalanib o'tkazuvchanlik zonasi va o'tkazuvchanlik zonasi dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini hisoblashni yangi usullaridan «Foton» aksiyadorlik jamiyatida amorf yarimo'tkazgichli optoelektron qurilmalar ishlab chiqarishda foydalanildi («O'zeltexsanoat» aksiyadorlik kompaniyasining 2024 yil 22 fevraldagi 04-3/296-con ma'lumotnomasi). «Foton» aksionerlik jamiyatida olib borilgan ilmiy izlanishlarda ko'rsatilgan natijalar asosida namunalar ishlab chiqildi;

amorf yarimo'tkazgichlarni spektral xarakteristikalarini va elektron holatlari zichligini taqsimoti natijalaridan Malayziyaning «Putra » universiteti ION markazi ilmiy laboratoriyasida yangi turdagi organik quyosh elementlari (DSSS) ning fotoelektrik parametrlarini hisoblashda qo'llanilishi mumkinligi aniqlandi. Hisob-kitoblar tajriba natijalari bilan mos kelishi kuzatildi. (Malayziya respublikasi «Universiti Putra Malaysia». 2024-yil 16-apreldagi Q.M.S 00794 (R) sonli

ma'lumotnomasi). Natijada amorf yarimo'tkazgichli quyosh elementlariga tashqi muhit ta'sirini sezilarli darajada kamaytirish mumkin ekanligi aniqlandi.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Mazkur tadqiqot natijalari 9 ta, jumladan 5 ta xalqaro va 4 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 17ta ilmiy ish, shulardan O'zbekiston respublikasi Oliy attestatsiya kommissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 9 ta ilmiy maqola, jumladan 3 tasi Scopus ma'lumotlar bazasida kiritilgan horijiy xalqaro jurnallarda nashr qilingan.

**Dissertatsiya hajmi va tuzilishi.** Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 110 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 ilmiy tadqiqot ishlari ni bog'liqligi dissertatsiya bajarilgan OTM da aniqlangan, 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. Amorf yarimo'tkazgich-larning optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini va elektron holatlari zichligi taqsimoti**" deb nomlangan birinchi bobida amorf yarimo'tkazgichlarni optik yutilish koeffitsiyentini analitik hisoblash uchun ishlatiladigan Kubo-Grinvud formulasini turli usullarda yozilishi keltirilgan. Bu formuladan yutilish koeffitsiyenti spektrlarini hisoblash uchun foydalaniladigan elektron holatlari zichligi taqsimotlari haqidagi ma'lumotlar keltirilgan. Ruxsat etilgan zonalar va ularni dumlaridagi elektron holatlari ishtirok etuvchi optik yutilish koeffitsiyentlarini hisoblash usullari va ularni kamchiliklari haqidagi ma'lumotlar berilgan. Yuqoridagilardan kelib chiqib dissertatsiya ishida olib boriladigan, vazifalar uchun ilmiy tadqiqot uchun masalani qo'yilishi begilangan.

Dissertatsiya ishining "**Kubo-Grinvud formulasini aniq integral ko'rinishda yozilishi**" deb nomlangan ikkinchi bobida optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini xususiy yechimlarni aniqlash uchun Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra yozilgan Kubo-Grinvud formulasidagi integralni aniq integral ko'rinishda yozish kerakligi ko'rsatilgan.

Ma'lumki, amorf yarimo'tkazgichlarning zonalararo yutilish koeffitsiyenti spektrini ruxsat etilgan zonalaridagi elektron holatlari zichligini taqsimoti ma'lum bo'lganda Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra Kubo-Grinvud formulasidan aniqlash mumkin. Bu formulani umumiy ko'rinishda quyidagicha yoziladi.

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 \Omega}{(m^*)^2 n_0 c} \int \frac{g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega)(f(\varepsilon) - f(\varepsilon + \hbar\omega))}{\hbar\omega} |D|^2 d\varepsilon \quad (1)$$

bu yerda  $e$ –elektron zaryadi,  $\hbar$ –Plank doimiysi,  $m^*$ -elektronlarni effektiv massasi,  $\Omega$ – $\varepsilon$  energiyali elektronni xususiy funksiyasi uchun normallashtirilgan hajm,  $\omega$ –yutilgan fotonni chastotasi,  $n_0$ –muhitning sindirish ko‘rsatgichi,  $c$ -yorug‘lik tezligi,  $g(\varepsilon)$  – optik o‘tishda ishtirok etuvchi elektronlarni foton yutilishidan oldingi va  $g(\varepsilon + \hbar\omega)$  - keyingi holatlarining zichliklarining taqsimotlari,  $|D|^2$  – elektronlarni optik o‘tishlarining matrisa elementi dispersiyasi,  $f(\varepsilon)$  - va  $f(\varepsilon + \hbar\omega)$  – Fermi-Dirak taqsimotlari bo‘lib ular quyidagilarga teng:

$$f(\varepsilon) = 1/(1 + \exp((\varepsilon - \varepsilon_F)/kT)),$$

$$f(\varepsilon + \hbar\omega) = 1/(1 + \exp((\varepsilon - \varepsilon_F + \hbar\omega)/kT)).$$

Fermi-Dirak taqsimotlaridagi  $\varepsilon_F < 0$ ,  $\varepsilon < 0$ ,  $\varepsilon < \varepsilon_F$  va  $\hbar\omega > \varepsilon - \varepsilon_F$  bo‘lganligi uchun, yutilgan fotonlarni energiyasi fononlarni energiyasidan juda katta bo‘lganda, ya‘ni  $\hbar\omega \gg kT$   $f(\varepsilon) \approx 1$  va  $f(\varepsilon + \hbar\omega) \approx 0$  teng bo‘ladi. Bu hol uchun Kubo-Grinvud formulasi quyidagi ko‘rinishga keladi:

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

Kubo-Grinvud formulasini Devis-Mott yaqinlashish usuli bo‘yicha hisoblashda elektronlarni bitta turdagi optik o‘tishlari uchun,  $|D|^2$  –elektronlarni optik o‘tishlarining matrisa elementi dispersiya o‘zgarish bo‘ladi deb, uni integral ostidan chiqarib yoziladi: Zonalararo o‘tishlar uchun,  $\frac{m}{m^*} = 1$  va  $k = \frac{\pi}{a}$  bo‘lganda ( $k$  - elektronlarning to‘lqin soni,  $a$  - esa o‘rganilayotgan namunaning atomlari orasidagi o‘rtacha masofa),  $D = \pi \left(\frac{a}{\Omega}\right)^{1/2}$  ko‘rinishda yozish mumkin. Bundan foydalanib amorf yarimo‘tkazgichlar uchun Devis – Mott yaqinlashish usuliga ko‘ra, fotonlarni zonalararo yutilish spektri uchun Kubo-Grinvud formulasini quyidagi ko‘rinishda yoziladi

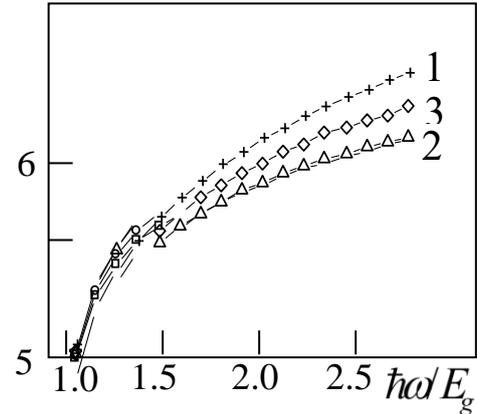
$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^4 e^2 \hbar^2 a}{m^2 n_0 c} \int \frac{g_v(\varepsilon)g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon \quad (3)$$

Quyida bu formulani hisoblashning bir usuli keltirilgan. (3) formulani:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int \frac{g_v(\varepsilon)g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon, \quad (4)$$

ko‘rinishda yozilgan. Bu yerda  $A$  – yutilgan fotonlarni chastotasiga bog‘liq bo‘lmagan proporsionallik koeffitsiyenti  $A = \frac{8\pi^4 e^2 \hbar^2 a}{m^2 n_0 c}$ . Bu formuladagi integral

$\lg(\alpha, \text{SM}^{-1})$



1-rasm. Zonalararo optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarining ruxsat etilgan zonalararo elektron holatlari taqsimotiga bog‘lanishi. Bu yerda 1 -  $n_1=1; n_2=1$ ; 2 -  $n_1=1/2; n_2=1/2$ , 3 -  $n_1=1$ ;

aniqmas bo‘lganligi uchun undan umumiy yechimni olish mumkin xalos. Bu umumiy yechim tajriba natijalarini qa’noatlantirmaganligi uchun Kubo-Grinvud formulasidagi integralni aniq integral ko‘rinisha yozilsa uni yechimi tajriba natijalarini qa’noatlanirishi ko‘rsatilgan.

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} \frac{g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon. \quad (5)$$

Amorf yarimo‘tkazgichlarda xarakatchanlik tirqishining energetik kengligidan katta energiyali fotonlar yutilganda elektronlar valent zona va uni dumidan o‘tkazuvchanlik zonasiga yoki uning dumiga o‘tishini hisobga olib, yuqoridagi formulani elektronlarni optik o‘tishlariga moslashtirib:

$$\begin{aligned} \alpha(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} \frac{g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon = A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_0} \frac{g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon + \\ &+ A \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} \frac{g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon + A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} \frac{g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \end{aligned} \quad (6)$$

Bu yerda  $\alpha_1$ - elektronlarni valent zona dumidan o‘tkazuvchanlik zonasiga,  $\alpha_2$  – valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga,  $\alpha_3$  – esa valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o‘tishlarini parsial spektrlari.

Yuqoridagi formulalardagi elektron holatlari zichligi taqsimotlari uchun quyidagi modeldan foydalanilgan:

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left( \frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1} \quad n_1 = 1/2, 1, \quad \text{bu yerda } \varepsilon \leq \varepsilon_V \quad (7)$$

$$g(\varepsilon + \hbar\omega) = N(\varepsilon_C) \left( \frac{\varepsilon + \hbar\omega - \varepsilon_V}{E_g} \right)^{n_2} \quad n_2 = 1/2, 1, \quad \text{bu yerda } \varepsilon_S \leq \varepsilon. \quad (8)$$

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)), \quad \text{bu yerda } \varepsilon_V < \varepsilon < \varepsilon_0. \quad (9)$$

$$g(\varepsilon + \hbar\omega) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon + \hbar\omega - \varepsilon_C)), \quad \text{bu yerda } \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_C \quad (10)$$

Bu yerda  $n_1$  -,  $n_2$  – ruxsat etilgan onalardagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarining darajalari,  $N(\varepsilon_V)$  va  $N(\varepsilon_C)$  lar mos ravishda valent va o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichliklari taqsimotini effektiv qiymatlari,  $\varepsilon_0$  – valent va o‘tkazuvchanlik zonalari dumlarining kesishish nuqtasini energetik o‘rni.

Yuqorida keltirilgan elektron holatlari zichliklari taqsimotlarini Kubo-Grinvud formulasiga qo‘yib, yuqorida ko‘rsatilgan uch xil elektronlarni optik o‘tishlari uchun parsial yutilish koeffisiyenti spektral xarakteristikalari ifodalarini aniqlangan. Ular ustida bajarilgan hisoblashlar yutilish koeffisiyentini fundamental yutilish sohasida zonlararo yutilish spektri asosiy rolni o‘ynashi ko‘rsatilgan.

Xuddi shu usulda ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlari taqsimoti parabolik va chiziqli bo‘lgan hollar uchun, mos ravishda:

$$\alpha_2 = \frac{B}{4E_g \hbar\omega} \left( 2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega} - (E_g + \hbar\omega)^2 \arctg \left( \frac{E_g - \hbar\omega}{\sqrt{4E_g \hbar\omega}} \right) \right), \quad (11)$$

$$\alpha_2 = \frac{B}{E_g^2 \hbar\omega} \frac{\hbar\omega - E_g}{6} (E_g^2 + 4\hbar\omega E_g + \hbar^2 \omega^2) \quad (12)$$

ifodalar olingan. Bu ifodadagi  $B=AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)$  proporsionallik koeffitsiyenti o'zgaras kattalik. Elektronlarni zonalararo optik o'tishlarining spektrlarini hisoblashlar, ruxsat etilgan zonalaridagi elektron holatlarining taqsimoti darajali bo'lganda, valent va o'tkazuvchanlik zonalaridagi elektron holatlari zichligi taqsimotidagi darajalarni o'zaro almashtirish olinadigan natijaga ta'sir qilmasligini ko'rsatgan. Buni hisobga olib va ruxsat etilgan zonalaridagi lokallashmagan holatlar zichliklari energiyaga bog'lanish darajalari bir-biridan farq qiladigan hollarning turli kombinatsiyalari uchun zonalararo yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini:

Ruxsat etilgan zonalaridagi elektron holatlaridan biri parabolik, ikkinchisi chiziqli bo'lgan holda esa:

$$\alpha_2 = \frac{2B}{15\sqrt{E_g^3}\hbar\omega} \left( 5(E_g + \hbar\omega) \left( \sqrt{\hbar\omega^3} - \sqrt{E_g^3} \right) - 3 \left( \sqrt{\hbar\omega^5} - \sqrt{E_g^5} \right) \right). \quad (13)$$

ko'rinishdagi ifoda olingan. 1-rasmda elektronlarni zonalararo elektron optik o'tishlari bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini ruxsat etilgan zonalaridagi elektron holatlari zichligining taqsimotiga bog'lanishlari keltirilgan. Rasmdan ko'rinadiki bu spektrlar sifat jihatidan bir-biridan farq qilmaydi va tajribalardan olinadigan natijalarga mos keladi.

Ma'lumki, agar amorf yarimo'tkazgichlarda yutilgan fotonlar energiyasi harakatchanlik tirqishining energetik kengligidan kichik bo'lsa, ular, bir vaqtni o'zida, elektronlarni valent zonaning dumidan o'tkazuvchanlik zonasiga, valen zona dumidan o'kazuvchanlik zonasi dumiga hamda valent zonadan o'kazuvchanlik zonasi dumiga o'tkazishi mumkin. Elektronlarni bu o'tishlari bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsiyenti spektrlarini qarab chiqamiz. Yuqoridagi kabi, Devis-Mott yaqinlashish usuliga ko'ra Kubo-Grinvud formulasidan va elektron holatlari zichligi taqsimoti uchun yuqorida taklif qilgan modeldan foydalanamiz:

$$\begin{aligned} \alpha(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon+\hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_C-\hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon+\hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C-\hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon+\hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \\ &+ A \int_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon+\hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1(\hbar\omega) + \alpha_2(\hbar\omega) + \alpha_3(\hbar\omega) \end{aligned} \quad (14)$$

Bu yerda  $\alpha_1$  – elektronlarni valent zona dumidan o'tkazuvchanlik zonasiga,  $\alpha_2$  – valent zona dumidan o'kazuvchanlik zonasi dumiga,  $\alpha_3$  - valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o'tishlarini prasiyal spektrlari. Hisoblashlarni yana, legirlanmagan ammo n-tip elektro'tkazuvchanlikka ega bo'lgan amorf yarimo'tkazgichlarda yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini qarab chiqishdan boshlaymiz.

$\varepsilon_0-\varepsilon_V < \hbar\omega < \varepsilon_C-\varepsilon_V = E_g$  sohada yutilish koeffitsiyenti uchta komponentani yig'indisidan iborat bo'lishi yuqorida aytib o'tilgan edi. (14) formula yordamida olingan prasiyal spektrlarni hisoblashlar eksponensial yutilish spektrini aniqlashda asosiy rolni elektronlarni valent zona dumidan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o'tishlari bilan aniqlanuvchi prasiyal spektr o'yinashini ko'rsatdi.

Shunga asoslangan holda, lokallashgan holatlararo o'tishlarga mos keluvchi yutilish koeffitsiyenti spektrlari quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = B \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (15)$$

Hisoblashlardan

$$\alpha_2 = \frac{A}{(\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g)) [1 - \exp((\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega - E_g))], \quad (16)$$

ifoda olingan. Bu spektrni hisoblashlardan olingan natijalar 2 rasmda keltirilgan. Bu spektr elektronlarni amorf yarimo‘tkazgichlarni harakatchanlik tirqishida joylashgan lokallashgan holatlararo optik o‘tishlari bilan aniqlanganligi uchun ular fotoo‘tkazuvchanlik hosil qilmaydigan elektron o‘tishlari deb nomlanadi. Agar elektronlar valent zona dumidan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tsa elektronli, valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasi dumiga o‘tganda esa, kovakli fotoo‘tkazuvchanlik hosil bo‘ladi.

Dissertatsiyaning “**Amorf yarimo‘tkazgichlarning zonalararo yutilish spektridan o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichliklari taqsimotini hisoblash**” deb nomlangan uchinchi bobida optik yutilish spektrining funamental yutilish sohasi uchun yozilgan Kubo-Grinvudning ikki xil ko‘rinishidagi formulasidan shu sohadagi barcha parsial spektrlarni analitik yechimlari olingan. Bu spektrlar uchun olingan formulalar bir-biridan umuman farq qilmasligi ko‘rsatilgan. Kubo-Grinvud formulasidan o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlovchi yangi formula keltirib chiqarilgan. Amorf uglerodni zonalararo yutilish spektrini tajribadan aniqlangan qiymatlaridan shu materialni o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligining taqsimoti hisoblangan.

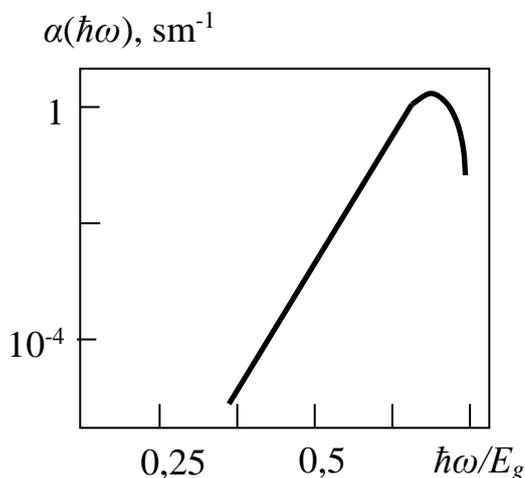
Ma’lumki, amorf yarimo‘tkazgichlarni optik yutilish koeffitsiyentining barcha sohalari, Kubo-Grinvud formulasi yordamida nazariy tadqiq qilinadi. Bu formulani amorf yarimo‘tkazgichga tushayotgan fotonlarni energiyasi harakatchanlik tirqishining energetik kengligidan katta bo‘lganda, optik yutilish spektrlari uchun quyidagi ko‘rinishlarda yoziladi:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int g_V(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (17)$$

yoki

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int g_V(\varepsilon - \hbar\omega)g(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \quad (18)$$

Agar optik yutilish koeffitsiyentini qiymatini aniqlashda asosiy rol ni optik o‘tishda ishtirok etuvchi elektron holatlari zichliklarini boshlang‘ich holati o‘ynasa (17) formuladan, agar oxirgi holati o‘ynasa (18) formuladan foydalaniladi. 2 bobda



2-rasm. n- tip gidrogenizatsiya langan amorf yarimo‘tkazgichlarda lokallash gan holatlararo elektron o‘tishlari (fotoo‘tkazuvchanlik hosil qilmaydigan) bilan aniqlanadigan yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikallari.

yutilish spektrlarining xususiy yechimlarini olish uchun Kubo-Grinvud formulasiidagi integralni aniq integral ko‘rinishida yozish kerakligi ko‘rsatilgan edi. Shuning uchun yuqoridagi formulalarni:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (19)$$

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} g_v(\varepsilon - \hbar\omega) g_c(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (20)$$

ko‘rinishlarda yozamiz. Amorf yarimo‘tkazgichlarda xarakatchanlik tirqishini energetik kengligidan katta energiyali fotonlar yutilganda bir vaqtni o‘zida elektronlarni uch xil optik o‘tishlari yuz berishini ko‘rib chiqdik. Shuni hisobga olib (20) formulani katta energiyali fotonlar yutilganda yuz beradigan elektronlarni optik o‘tishlariga moslashtiramiz:

$$\begin{aligned} \alpha(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} g_v(\varepsilon - \hbar\omega) g_c(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_v + \hbar\omega}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} g_v(\varepsilon - \hbar\omega) g_c(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \\ &+ A \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_v + \hbar\omega} g_v(\varepsilon - \hbar\omega) g_c(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_c} g_v(\varepsilon - \hbar\omega) g_c(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1(\hbar\omega) + \alpha_2(\hbar\omega) + \alpha_3(\hbar\omega) \end{aligned} \quad (21)$$

Bu formuladan zonalararo yutilish spektrlarini ajratamiz:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_v + \hbar\omega} g_v(\varepsilon - \hbar\omega) g_c(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (22)$$

Bu yerda  $A$  – yutilgan fotonlarni energiyasiga ( $\hbar\omega$ ) bog‘liq bo‘lmagan proporsianallik koeffitsiyenti,  $g_v(\varepsilon - \hbar\omega)$  – elektronlarni valent zonadagi,  $g_c(\varepsilon)$  – o‘tkazuvchanlik zonasidagi holatlari zichligini taqsimotlari.

(17) formuladan hisoblangan zonalararo yutilish spektrlari 2 bobda keltirilgan. Bu formuladan zonalararo yutilish spektrini hisoblash uchun valent va o‘tkauvchanlik zonalaridagi elektron holatlari zichligini taqsimotlarini yana 2 bobdagi kabi tanlaymiz:

$$g_v(\varepsilon) = N(\varepsilon_v) \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1}, \quad n_1 = 1/2, 1 \quad (23)$$

$$g_c(\varepsilon) = N(\varepsilon_c) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_v}{E_g} \right)^{n_2}, \quad n_2 = 1/2, 1 \quad (24)$$

Yuqorida (23) va (24) ifodalarni (22) qo‘yib zonalararo yutilish spektrlarini hisoblaymiz:

$n_1 = n_2 = 1/2$  ga teng bo‘lganda:

$$\begin{aligned} \alpha_2(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_v + \hbar\omega} N(\varepsilon_v) \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon + \hbar\omega}{E_g} \right)^{1/2} N(\varepsilon_c) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_v}{E_g} \right)^{1/2} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_v + \hbar\omega} \sqrt{\varepsilon_c - \varepsilon + \hbar\omega} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_v} d\varepsilon \end{aligned}$$

Bu formulaga integrallash formulasini qo‘llasak:

$$X = \sqrt{ax + b}; \quad Y = \sqrt{fx + g}; \quad a = -1; \quad b = \varepsilon_c + \hbar\omega; \quad f = 1; \quad g = -\varepsilon_v$$

$$\Delta = bf - ag.$$

$$\int \sqrt{XY} = \frac{\Delta + 2aY}{4af} \sqrt{XY} - \frac{\Delta^2}{8af} \left( \frac{2}{\sqrt{-af}} \arctg \sqrt{-\frac{fX}{aY}} \right)$$

$$\alpha_2(\hbar\omega) = \frac{B}{\hbar\omega E_g} \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} \sqrt{\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_V} d\varepsilon =$$

$$= \frac{B}{4\hbar\omega E_g} \left[ 2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega} - (E_g - \hbar\omega)^2 \operatorname{arctg} \left( \frac{E_g - \hbar\omega}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right) \right] \quad (25)$$

ifodani olamiz.  $n_1 = n_2 = 1$  bo'lganda:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} N(\varepsilon_V) \left( \frac{\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega}{E_g} \right)^1 N(\varepsilon_C) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g} \right)^1 \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} =$$

$$= \frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{\hbar\omega E_g^2} \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega)(\varepsilon - \varepsilon_V) d\varepsilon$$

Yuqoridagi integralni hisoblash uchun quyidagi belgilashni kiritamiz:

$$u = \varepsilon - \varepsilon_V \quad d\varepsilon = du$$

va bu ifodagi integralni hisoblab quyidagi natijani olamiz:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = \frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{\hbar\omega E_g^2} \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} (\hbar\omega - E_g + u) u du = \frac{B}{6\hbar\omega E_g^2} ((\hbar\omega - E_g)(E_g^2 + 4\hbar\omega E_g + \hbar\omega^2)) \quad (26)$$

(25)-(26) bu formulalar 2 bobda olingan zonalararo yutilish spektrlari bilan bir xil ekanligini ko'rish mumkin. Bu spektrlardan olingan hisoblash natijalari 1 - rasmda keltirilgan. Bundan quyidagi xulosani chiqarish mumkin. Agar Kubo-Grinvud formulasidagi aniq integral chegaralarini va elektron holatlari zichligi taqsimotlarini to'g'ri tanlansa Kubo-Grinvud formulasini (19) ko'rinishda ham (20) ko'rinishda ham yozish mokin bo'lar ekan.

Ikki o'zgaruvchili fuksiyani integralidan bitta o'zgaruvchi bo'yicha hosila olish formulasidan:

$$\frac{d}{dy} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \frac{\partial \beta(y)}{\partial y} f(\beta(y), y) - \frac{\partial \alpha(y)}{\partial y} f(\alpha(y), y) \quad (27)$$

Bu formulani (19) va (20) formulalarga qo'llaymiz:

$$\frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} \frac{\partial g_V(\varepsilon) g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} \frac{1}{\hbar\omega} d\varepsilon + \frac{A}{\hbar\omega} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial \hbar\omega} g_V(\varepsilon_V) g_C(\varepsilon_V + \hbar\omega) -$$

$$- \frac{A}{\hbar\omega} \frac{\partial(\varepsilon_C - \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} g_V(\varepsilon_C - \hbar\omega) g_C(\varepsilon_C)$$

$$\frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) = \frac{A}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g_V(\varepsilon) \left( \frac{\partial g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} \right) d\varepsilon - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{A}{\hbar\omega} g_V(\varepsilon_C - \hbar\omega) g_C(\varepsilon_C). \quad (28)$$

(28) formulada erkin o'zgaruvchi fotonni energiyasi bo'lganligi uchun bu formuladan faqat valent zonadagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlash mumkin.

$$g_V(\varepsilon_C - \hbar\omega) = \frac{1}{g_C(\varepsilon_C)} \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g_V(\varepsilon) \left( \frac{\partial g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} \right) d\varepsilon - \frac{\hbar\omega}{A g_C(\varepsilon_C)} \frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{A g_C(\varepsilon_C)}. \quad (29)$$

Endi (20) formulaga (28) formulani qo'llaymiz:

$$\frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} g_C(\varepsilon) \frac{\partial(g_V(\varepsilon - \hbar\omega))}{\partial \hbar\omega} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} -$$

$$- \frac{A}{\hbar\omega} g_V(\varepsilon_V) g_C(\varepsilon_V + \hbar\omega) \quad (30)$$

(30) formuladan ko‘rinadiki, undan o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligini aniqlash mumkin:

$$g_c(\varepsilon_V + \hbar\omega) = \frac{1}{g_V(\varepsilon_V)} \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} g_c(\varepsilon) \frac{\partial(g_V(\varepsilon - \hbar\omega))}{\partial \hbar\omega} d\varepsilon - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{Ag_V(\varepsilon_V)} - \frac{\hbar\omega}{Ag_V(\varepsilon_V)} \frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) \quad (31)$$

Yuqoridagilardan ko‘rinadiki, zonalararo yutilish spektridan o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligini aniqlash uchun Kubo-Grinvud formulasini (20) ko‘rinishda yozish kerak ekan.

Ma’lumki, elektronlarni optik o‘tishlarini fundamental sohasida yutilgan fotonlarni energiyasi amorf yarimo‘tkazgichlarni harakatchanlik tirqishining energetik kengligidan ( $E_g < \hbar\omega$ ) katta bo‘ladi. Amorf yarimo‘tkazgichlarda  $E_g$  dan katta energiyali fotonlar yutilganda, bir vaqtni o‘zida elektronlarni valent zona dumidan o‘tkazuvchanlik zonasiga, valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga va valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o‘tishlari kuzatilishi ko‘rsatilgan.

Odatda, optik yutilish spektrlarni nazariy tadqiq qilishda, amorf yarimo‘tkazgichlarning ruxsat etilgan zonalarini chegaralaridagi elektron holatlari zichliklari chiziqli yoki parabolik, ruxsat etilgan zonalarini dumlaridagi esa, eksponensial taqsimotlar bilan yoziladi.

Zonalararo yutilish spektri uchun  $n_1 = n_2 = 1/2$  ga teng bo‘lganda (31) formulaga tanlangan modeldagi taqsimot funksiyalarni qo‘ysak:

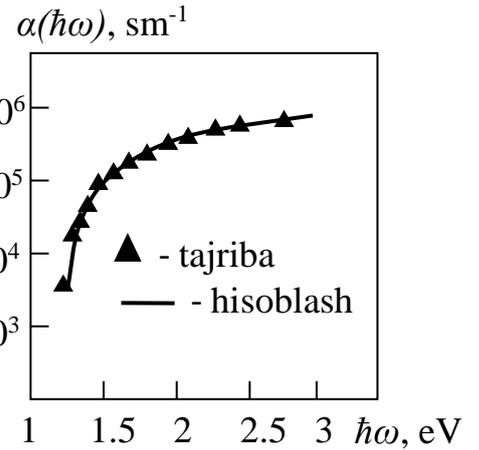
$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} N(\varepsilon_V) \left( \frac{\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} N(\varepsilon_C) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_C}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}$$

Bu ifodadan fotonlarni energiyasi bo‘yicha hosila olsak:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{B}{E_g} \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} (\varepsilon - \varepsilon_V)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} \left( \frac{\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega}{\hbar\omega} \right)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon + \\ &+ B \frac{\partial(\varepsilon_V + \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} \frac{(\varepsilon_C - \varepsilon_V - \hbar\omega + \hbar\omega)^{\frac{1}{2}} (\varepsilon_V + \hbar\omega - \varepsilon_V)^{\frac{1}{2}}}{E_g \hbar\omega} - B \frac{\partial \varepsilon_C}{\partial \hbar\omega} \frac{(\varepsilon_C - \varepsilon_C + \hbar\omega)^{\frac{1}{2}} (\varepsilon_C - \varepsilon_V)^{\frac{1}{2}}}{E_g \hbar\omega} = \\ &= \frac{B}{2E_g} (E_g + \hbar\omega) \arctg \frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{B}{N(\varepsilon_C)} \frac{1}{\hbar\omega} N(\varepsilon_C) \left( \frac{\hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (32)$$

Bu ifodadagi  $\hbar\omega/E_g$  qanday energetik holatni aniqlashini bilish uchun

$$g_c(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_C}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} = N(\varepsilon_C) \left( \frac{\hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$



3-rasm. Amorf uglerod (a-C) ni tajribada olingan va (25) formula-dan hisoblangan (tutash egri chiziq) zonalararo yutilish spektrlari.

belgilashni kiritamiz, bundan  $\hbar\omega/E_g$  qanday energetik holatni aniqlashini topamiz.  $\varepsilon = \varepsilon_c + \hbar\omega$  bo'lganligi uchun bu energetik holat o'tkazuvchanlik zonasida joylashgan bo'ladi. (33) belgilashdan foydalanib (32) ni quyidagicha yozamiz:

$$\frac{\partial\alpha_2(\hbar\omega)}{\partial\hbar\omega} = \frac{B}{2E_g}(E_g + \hbar\omega)\text{arctg}\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g\hbar\omega}} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{B}{N(\varepsilon_c)}\frac{1}{\hbar\omega}g_c(\varepsilon) \quad (34)$$

Bu ifodadan o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligining taqsimotini aniqlaymiz:

$$g_c(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_c)\hbar\omega}{B}\left(\frac{\partial\alpha_2(\hbar\omega)}{\partial\hbar\omega} - \frac{B}{2E_g}(E_g + \hbar\omega)\text{arctg}\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g\hbar\omega}} + \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega}\right) \quad (35)$$

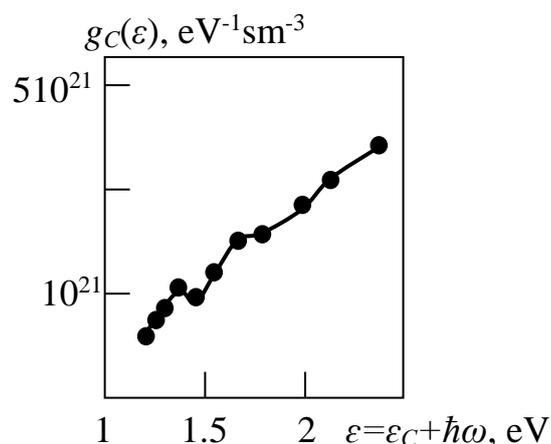
(35) ifodani yutilgan fotonlarni energiyasi va zonalararo yutilish koeffitsiyenti qiymatlarini o'rtachalashtirib quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$g_{c_i}(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_c)(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2B}\left(\frac{\alpha_2(\hbar\omega_{i+1}) - \alpha_2(\hbar\omega_i)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} - \frac{B}{2E_g}\left(E_g + \frac{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i}{2}\right) \times \right. \\ \left. \times \text{arctg}\frac{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i - 2E_g}{\sqrt{8E_g(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}} + \frac{\alpha_2(\hbar\omega_{i+1}) + \alpha_2(\hbar\omega_i)}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i}\right) \quad (36)$$

Bu yerda  $\alpha(\hbar\omega_i)$  va  $\hbar\omega_i$  lar mos ravishda tajribalardan aniqlangan zonalararo yutilish koeffitsiyentini va ularga mos keluvchi yutilgan fotonlarni energiyalari. (36) formuladan o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlash uchun undagi  $B$  va  $E_g$  larni aniqlash kerak. Ularni zonalararo yutilish spektrini tajribadan aniqlangan qiymatlaridan foydalanamiz. Tajribadan aniqlagan amorf uglerodni zonalararo yutilish spektrini keltirilgan (3-rasm). Rasmdagi tajriba natijalariga (26) formuladan olingan hisoblash natijalarini  $B$  va  $E_g$  moslashtiruvchi parametr sifatida qarab moslashtiramiz. Bu parametrlarni qiymatlari  $E_g = 1.252$  eV i  $B = 7.44$   $\text{sm}^{-5}$  ga teng bo'lganda (26) formuladan olingan hisoblash natijalari (3.2 – rasm, tutash egri chiziq) bilan mos kelishi aniqlandi.

Amorf uglerodni o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini (26) formulaga 3-rasmda keltirilgan tajribadan aniqlangan zonalararo yutilish koeffitsiyenti va ularga mos keluvchi yutilgan fotonlarni energiyalarini qo'yib bajarilgan hisoblash natijalari 4- rasmda keltirilgan.

Dissertatsiyaning “**Amorf yarimo'tkazgichlarning eksponensial yutilish spektridan o'tkazuvchanlik zonasining dumidagi elektron holatlari zichliklari taqsimotini hisoblash**” deb nomlangan to'rtinchi bobida amorf yarimo'tkazgichlarni optik yutilish spektrining eksponensial sohasi yutilish sohasi uchun yozilgan Kubo-Grinvudning (3) ko'rinishidagi formulasidan shu sohadagi barcha parsial spektrlarni analitik yechimlari olingan. Bu spektrlar Kubo-



4 – rasm. Amorf uglerodni tajribadan aniqlangan zona-lararo yutilish spektridan hisoblangan o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron

Grinvudning (2) ko‘rinishidagi formulalaridan olingan natijalardan umuman farq qilmasligi ko‘rsatilgan. Kubo - Grinvudning (3) ko‘rinishidagi formulasidan o‘tkazuvchanlik zonasi dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlovchi yangi formula keltirib chiqarilgan. Amorf selen oltingugurt ( $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$ ) qattiq qotishmasining eksponensial yutilish spektrini tajribadan aniqlangan qiymatlaridan shu materialni o‘tkazuvchanlik zonasi dumidagi elektron holatlari zichligining taqsimoti hisoblangan.

Amorf yarimo‘tkazgichlarni optik yutilish koeffitsiyenti spektral xarakteristikalarini  $\alpha(\hbar\omega)$  analitik ifodasini aniqlash uchun yana, Devis – Mott yaqinlashish usuliga ko‘ra Kubo-Grinvud formulasidan foydalanamiz.

Kubo-Grinvud formulasidan optik yutilish koeffitsiyenti spektrlarini xususiy yechimlarini olish uchun, undagi integralni aniq integral ko‘rinishda yozish kerakligini aytib o‘tildi:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (37)$$

Yuqorida ko‘rsatib o‘tildiki, optik yutilish koeffitsiyenti spektrini eksponensial sohasida (yutilgan fotonlarni energiyasi harakatchanlik tirqshining energetik kengligidan bir oz kichik bo‘lganda) elektronlarni bir vaqtini o‘zida valent zona dumidan o‘tkazuvchanlik zonasiga, valent zona dumidan o‘tkazuvchanlik zonasi dumiga va valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o‘tishlari sodir bo‘ladi. Shuning uchun (37) formulani elektronlarni yuqoridagi optik o‘tishlariga moslashtirish kerak.

$$\begin{aligned} \alpha(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \\ &+ A \int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \end{aligned} \quad (38)$$

Eksponensial yutilish spektri qiymatini asosan elektronlarni valent zona dumidan o‘tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o‘tishlarini parsial spektri o‘ynashi ko‘rsatilgan edi. Shuning uchun (38) formuladan shu spektrni hisoblashni qarab chiqamiz.

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (39)$$

(39) formulaga valent va o‘tkazuvchanlik zonalarini dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotlarini qo‘yamiz:

$$g_V(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)), \quad (40)$$

$$g_C(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)). \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \alpha_2(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \hbar\omega - \varepsilon_V)) N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1)} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g)) (1 - \exp((\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega - E_g))) \end{aligned} \quad (42)$$

Endi elektronlarni valent zona dumida o'tkazuvchanlik zonasiga va valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o'tishlari spektrlarini qarab chiqamiz.  $n_2=1$  bo'lganda

$$\begin{aligned}\alpha_1(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \hbar\omega - \varepsilon_V)) N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g}\right)^1 \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \exp(\beta_1 \hbar\omega) \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) (\varepsilon - \varepsilon_V) d\varepsilon\end{aligned}\quad (43)$$

$\int x \exp(ax) dx = \exp(ax) \left(\frac{x}{a} - \frac{1}{a^2}\right) + C$  formuladan foydalansak

$$\begin{aligned}\alpha_1(\hbar\omega) &= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \exp(\beta_1 \hbar\omega) \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) * (\varepsilon - \varepsilon_V) d\varepsilon = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega E_g \beta_1} \left( \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g)) * \left(\frac{1}{\beta_1} + E_g\right) + \exp(\beta_1(\varepsilon_V - \varepsilon_0)) * \left(\varepsilon_0 + \hbar\omega - \varepsilon_V + \frac{1}{\beta_1}\right) \right)\end{aligned}\quad (44)$$

$n_1=1$  bo'lganda:

$$\begin{aligned}\alpha_3(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \exp(-\beta_2 \hbar\omega) \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega) \exp(\beta_2(\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega)) d\varepsilon\end{aligned}$$

Yana:  $\int x \exp(ax) dx = \exp(ax) \left(\frac{x}{a} - \frac{1}{a^2}\right) + C$  formuladan foydalanamiz:

$$\begin{aligned}\alpha_3(\hbar\omega) &= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \exp(-\beta_2 \hbar\omega) \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega) \exp(\beta_2(\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega)) d\varepsilon = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega E_g \beta_2} \exp(\beta_2(E_g - \hbar\omega)) \left( E_g - \frac{1}{\beta_2} - \exp(\beta_2(\varepsilon_C - \varepsilon_0)) (\hbar\omega - \varepsilon_C - \varepsilon_0 - \frac{1}{\beta_2}) \right)\end{aligned}\quad (45)$$

$n_1 = n_2 = 1/2$  bo'lganda analitik yechimni olish mumkin bo'lmadi. Shuning uchun bu spektrlarni taqribiy hisoblash usullaridan foydalanib hisoblandi. Yuqorida olingan natijalar 2 bobda (2) va (3) formuladan olingan natijalar bilan bir xil bo'lganligi uchun quyidagi xulosani chiqarish mumkin. Agar Kubo-Griniud formulasidagi integralni chegaralari va bu formulani hisoblash uchun tanlangan model to'g'ri bo'lsa, bu formulani (4.3) va (37) ko'rinishlarda yozish mumkin bo'lar ekan. (42), (44) va (45) formulalardan olingan hisoblash natijalari 5– rasmda keltirilgan. Ma'lumki, amorf yarimo'tkazgichlardagi elektronlarni optik o'tishlarini ekponensial yutilish sohasida yutilgan fotonlarni energiyasi amorf yarimo'tkazgichlarni harakatchanlik tirqishi-ning energetik kengligidan ( $\hbar\omega < E_g$ ) kichik bo'ladi. Amorf yarimo'tkazgichlarda  $E_g$  dan kichik energiyali fotonlar yutilganda, bir vaqtni o'zida elektronlarni valent zona dumidan o'tkazuvchanlik zonasiga, valent zona dumidan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga va valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasi dumiga optik o'tishlari kuzatilishi ko'rsatilgan. Shuning uchun Kubo-Grinvud formulasini yuqoridagi optik o'tishlarga moslashtirish kerakligi oldingi paragrafda qarab chiqildi. Endi ekponensial yutilish spektrining tajribalardan aniqlangan qiymatlaridan foydalanib o'tkazuvchanlik zonasining dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlash usulini qarab chiqamiz.

Amorf selen oltinugurt qattiq qotishmasini optik yutilish koeffitsiyentining spektral xarakteristiaksi tajribadan aniqlangan qiymatlari keltirilgan (6-rasm). Opik yutilish koeffitsiyenti spektrining eksponensial sohasida asosiy rolni elektronlarni valent zona dumidan o'tkazuvchanlik zonasining dumiga optik o'tishlari bilan aniqlanuvchi parsial yutilish spektri o'ynashi 6-rasmdan ko'rinib turibdi. Bu spektrni analitik (42) formuladan hisoblash uchun undagi xarakatchanlik tirqishining energetik kengligi  $E_g$ , proporsianallik koeffitsiyenti  $B$ , valent va o'tkazuvchanlik zonalarini eksponensial dumlari egriligini aniqlovchi parametrlar  $\beta_1$  va  $\beta_2$  lar ma'lum bo'lishi kerak. Amorf selen oltinugurt qattiq qotishmasi zonalararo va eksponensial yutilish spektrlar tajribadan aniqlangan qiymatlari va analitik formuladan hisoblangan natijalarni solishtirish orqali bu parametrlarni barchasini aniqlash usuli keltirilgan va ularni qiymati  $A=7,5 \cdot 10^5 \text{ sm}^{-1}$ ,  $E_g=2.25 \text{ eV}$   $\beta_1=16,2 \text{ eV}^{-1}$  va  $\beta_2 = 19,8 \text{ eV}^{-1}$  larga teng bo'lganda tajriba va hisoblash natijalari bir – biriga mos kelishi aniqlandi.

Eksponensial yutilish spektri uchun Kubo-Grinvud fomulasini

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g_V(\varepsilon) g_C(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (46)$$

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (47)$$

ko'rinishlarda yozish mumkin ekanligini qarab chiqdik.

Ikki o'zgaruvchili funksiya integralidan bitta o'zgaruvchi bo'yicha hosila olish formulasini yuqoridagi formulalarga qo'llaymiz:

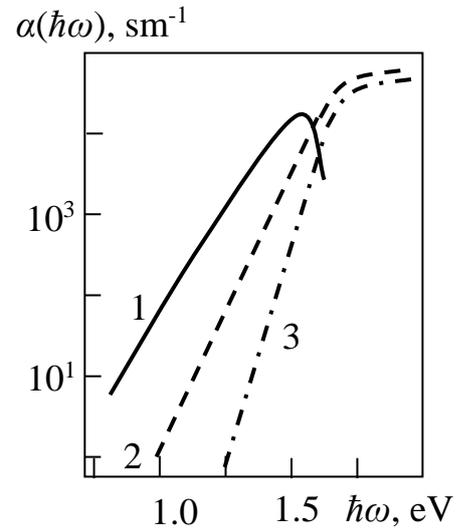
$$\frac{\partial}{\partial y} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \quad (48)$$

$$+ \frac{\partial \beta(y)}{\partial y} f(\beta(y), y) - \frac{\partial \alpha(y)}{\partial y} f(\alpha(y), y)$$

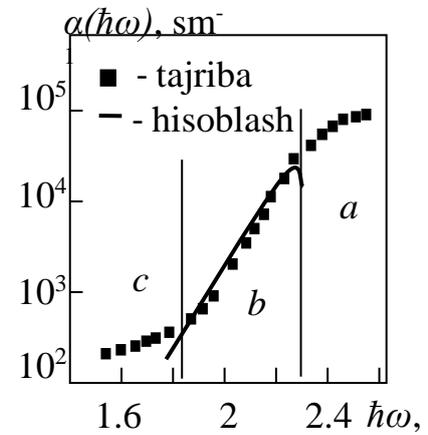
$$\frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} A \left( \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} \left( \frac{g_V(\varepsilon) g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} \right) d\varepsilon =$$

$$= A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g_V(\varepsilon) \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} \frac{g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \quad (49)$$

$$- \frac{A}{\hbar\omega} g_V(\varepsilon_C - \hbar\omega) g_C(\varepsilon_C)$$



5 - rasm. 1-(42), 2-(44) va 3-(45) formulalardan olingan parsial yutilish spektr-larining grafiklari. Hisoblashlarni  $\varepsilon_C - \varepsilon_0 = 0.7 \text{ eV}$ ;  $E_g = 1.8 \text{ eV}$ ;  $\beta_1 = 16 \text{ eV}^{-1}$  va  $\beta_2 = 25 \text{ eV}^{-1}$  qiymatlar uchun bajarilgan.



6-rasm. Amorf  $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$  uchun tajriba va (42) formulani hisoblashdan (tutash chiziq) olingan eksponensial yutilish spektrlari.

a – zonalararo yutilish sohasi,  
b – eksponensial yutilish sohasi,  
c – nuqsonlarda yutilish sohasi

Bu formulada o'zgaruvchi faqat yutilgan fotonlarni energiyasi bo'lganligi uchun, undan faqat valent zonadagi elektronlar taqsimoti zichliklarini aniqlash mumkin. Endi Kubo-Grinvud formulasini ikkinchisini hisoblaymiz:

$$\frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} A \left( \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \frac{g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon)}{\hbar\omega} d\varepsilon \right) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} g_C(\varepsilon) \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} \frac{g_V(\varepsilon - \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \frac{A}{\hbar\omega} g_V(\varepsilon_V) g_C(\varepsilon_V + \hbar\omega) \quad (50)$$

Bu formuladan ko'rinadiki, undan o'tkazuvchanlik zonasi dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini hisoblash mumkin. Endi o'tkazuvchanlik zonasi dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini hisoblashni qarab chiqamiz. Bu formulaga tanlangan modeldagi taqsimot funksiyalarini qo'ysak:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \hbar\omega - \varepsilon_V)) N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \quad (51)$$

$$= B \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \frac{\exp(\beta_1 \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon$$

$$\frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial (\hbar\omega)} = \frac{\partial}{\partial (\hbar\omega)} B \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \frac{\exp(\beta_1 \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon = \quad (52)$$

$$= -\frac{B}{\hbar\omega} \exp(\beta_2(\hbar\omega - E_g)) \left( \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} \right) + \frac{B}{\hbar\omega} \left( \frac{\beta_1}{\beta_2 - \beta_1} \right) \exp(-\beta_1(E_g - \hbar\omega)) - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega}$$

ifodani olamiz. Bu ifodada quyidagi belgilashni kiritamiz:

$$g_C(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\hbar\omega - E_g)) \quad (53)$$

va undan  $\hbar\omega - E_g$  qanday energetik holatni aniqlashini hisoblaymiz.

$\varepsilon - \varepsilon_C = \hbar\omega - E_g$ ,  $\varepsilon = \hbar\omega - E_g + \varepsilon_C$  eksponensial yutilish sohasida  $\hbar\omega < E_g$  bo'lganligi uchun  $\hbar\omega - E_g$  o'tkazuvchanlik zonasi dumidagi energetik holatni aniqlaydi.

(52) formulani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

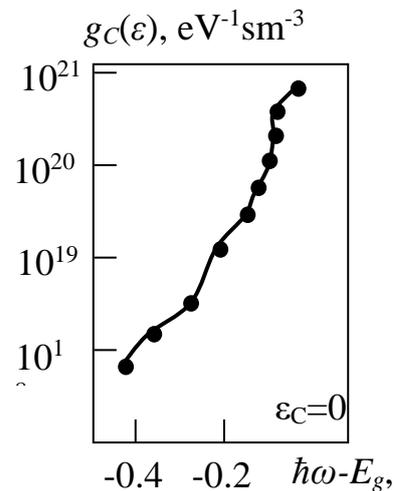
$$\frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial (\hbar\omega)} = -\frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_C)} N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\hbar\omega - E_g)) \left( \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} \right) + \frac{B}{\hbar\omega} \left( \frac{\beta_1}{\beta_2 - \beta_1} \right) \exp(-\beta_1(E_g - \hbar\omega)) - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \quad (54)$$

$$\frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial (\hbar\omega)} = -\frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_C)} g_C(\varepsilon) \left( \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} \right) + \frac{B}{\hbar\omega} \left( \frac{\beta_1}{\beta_2 - \beta_1} \right) \exp(-\beta_1(E_g - \hbar\omega)) - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega}$$

(54) dan  $g_C(\varepsilon)$  ni topamiz:

$$g_C(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_C) \hbar\omega}{B} \left( \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2} \right) \left( \frac{B}{\hbar\omega} \right) \exp(-\beta_1(E_g - \hbar\omega)) - \frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial (\hbar\omega)} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \quad (55)$$

Bu formula amorf yarimo'tkazgichlarni o'tkazuvchanlik zonasining dumidagi elektron holatlar zichligi taqsimotini aniqlash formulasi bo'ladi. (55) formulani tajribalardan aniqlangan yutilgan fotonlarni energiyasi va



7 - rasm. Amorf selen oltingugurtini tajribadan aniq langan eksponensial yutilish spektridan hisoblangan o'tkazuvchanlik zonasii dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimoti.

eksponensial yutilish koeffitsiyenti qiymatlarini o'rtachalashtirib quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$g_{ci}(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_c)(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2B} \left( \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2} \right) \left( \frac{2B}{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)} \exp(-\beta_1(E_g - \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2})) - \frac{\alpha_2(\hbar\omega_{i+1}) - \alpha_2(\hbar\omega_i)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega_{i+1}) + \alpha_2(\hbar\omega_i)}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i} \right) . \quad (56)$$

Bu yerda  $\hbar\omega_i$  va  $\alpha(\hbar\omega_i)$  lar mos ravishda tajribalardan aniqlangan yutilgan fotonlarni va eksponensial yutilish koeffitsiyentini qiymatlari.

(56) formula va eksponensial yutilish spektrining qiymatlaridan foydalanib hisoblangan amorf selen oltingugurt qattiq qotishmasini o'tkazuvchanlik zonasi dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimoti 7-rasmda keltirilgan.

## XULOSALAR

Ruxsat etilgan zonalardagi elektron holatlari zichligining taqsimoti darajali bo'lganda, bu darajalarni turli kombinatsiyalariga mos keluvchi zonalaro yutilish spektrlari keltirib chiqarildi.

Katta energiyali fotonlar yutilganda ruxsat etilgan zonalarning eksponensial dumlaridagi lokallashtirilgan holatlar ishtirok etuvchi elektron o'tishlar bilan aniqlanuvchi yutilish spektrlari keltirib chiqarildi.

Agar amorf yarimo'tkazgichlarni optik yutilish spektrlarini nazariy usulda tadqiq qilish uchun foydalaniladigan epririk modelni to'g'ri talansa va Kubo-Grinvud formulasidagi integralni elektronlarni optik o'tish turlariga to'g'ri moslashtirilsa, bu formulani ikki xil ko'rinishidan hisoblanadigan natijalar bir xil bo'lishi ko'rsatildi.

Kubo-Grinvud formulasini zonalaro yutilish spektri uchun yoziladigan formulasidan foydalanib amorf yarimo'tkazgichlarni o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichli taqsimotini aniqlovchi yangi formula keltirib chiqarildi.

Zonalaro yutilish spektrini tajribadan aniqlangan qiymatlaridan foydalanib o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligining taqsimoti aniqlandi.

Amorf yarimo'tkazgichlarning optik yutilish koeffitsiyentini eksponensial yutilish sohasi nazariy usulda tadqiq qilindi.

Amorf yarimo'tkazgichlarni optik yutilish koeffitsiyentining eksponensial yutilish sohasida sodir bo'ladigan elektronlarni optik o'tishlari uch xil bo'lishi ko'rsatildi.

Eksponensial yutilish spektri uchun yoziladigan Kubo – Grinvud formulasidan amorf yarimo'tkazgichlarni o'tkazuvchanlik zonasi dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini aniqlavchi yangi formula keltirib chiqarildi.

Amorf selen oltingugurt qattiq qotishmasini tajribalardan aniqlangan eksponensial yutilish spektrining qiymatlaridan foydalanib bu materialni o'tkazuvchanlik zonasining dumidagi elektron holatlari zichligi taqsimoti hisoblandi.

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

---

**НАМАНГАНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ**

**СУЛТОНОВ БОБУР КОБУЛЖОН УГЛИ**

**СПЕКТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И ПЛОТНОСТЬ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АМОΡФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

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

**Наманган – 2024**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2023.4.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](http://www.nammti.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

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

**Официальные оппоненты:** **Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабидинович**  
академик АН РУз, доктор физико – математических наук, профессор

**Расулов Рустам Явкачович**  
доктор физико – математических наук, профессор

**Ведущая организация:** **Бухарский государственный университет**

Защита диссертации состоится « 2 » \_\_ 10 \_\_ 2024 года в 10<sup>00</sup> 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](mailto:niei_info@edu.uz).

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

Автореферат диссертации разослан « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.  
(протокол рассылки № \_\_ от « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.)

**У.И. 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. Шарипбаев**  
Председатель научного  
семинара при Научном совете по  
присуждению ученых степеней,  
д.ф-м.н., профессор

## **Введение (аннотация докторской (PhD)диссертации)**

**Необходимость и актуальность темы диссертации.** Сегодня в мире при создании современной микроэлектроники и фотоэлектрических устройств из аморфного гидрированного кремния ( $a\text{-Si:H}$ ) 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 ( $\alpha\text{-SiN}$ ) очень велика. Поэтому широко изучаются спектральные характеристики коэффициента оптического поглощения, электрические и оптические свойства аморфных полупроводников, плотность электронных состояний в них. В настоящее время для теоретического расчета спектра коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников используются несколько эмпирические модели распределения плотности электронных состояний. В связи с этим важно проводить целевые научные исследования.

В мире проводятся научные исследования спектра коэффициента оптического поглощения и плотности электронных состояний, которые являются основными параметрами аморфных полупроводников. В этом направлении в том числе определение связи между коэффициентом межзонного поглощения спектра коэффициента оптического поглощения в аморфных полупроводниковых образцах и распределением плотности нелокализованных электронных состояний в зоне проводимости; Приоритет отдается исследованиям по определению связи распределения плотности локализованных электронных состояний в экспоненциальном хвосте зоны проводимости с областью экспоненциального поглощения. В то же время теоретическое исследование плотности электронных состояний аморфных полупроводников считается одной из актуальных задач физики полупроводников.

В нашей республике реализуются масштабные мероприятия по созданию новых технологий, способствующих повышению эффективности солнечных батарей и широкому использованию солнечной энергии. Принятая стратегия «Узбекистан - 2030» определяет важные задачи «перехода к зеленой экономике, резкого увеличения использования возобновляемых источников энергии, которые являются ее основой<sup>1</sup>». При реализации этих задач, в частности, важно теоретически определить плотность электронных состояний аморфного кремния, а также повысить эффективность солнечных элементов на основе аморфного кремния. Среди этих материалов основным считается аморфный кремний, а созданная современная планарная технология позволяет производить многие электронные устройства и устройства, плоские светодиодные экраны, солнечные панели при относительно невысокой стоимости. Очень важно углубить понимание связи оптических переходов со

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года №ПФ-158 «О Стратегии «Узбекистан – 2030»

всеми электронными состояниями, характерными для аморфных полупроводников, и спектром коэффициента поглощения.

Научно-исследовательская работа, выполненная в данной дипломной работе, основана на Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» № ПФ-60 от 10 января 2020 г. - ПЗ-4779 от 14 июля 2018 года «О дополнительных мерах по повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости отраслей экономики от продукции топливно-энергетического комплекса путем привлечения свободных ресурсов» «О мерах по повышению эффективности коммерциализации результаты научной и научно-технической деятельности» № ПҚ-3855 от 19 марта 2021 года «Меры по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» В определенной степени служит реализации поставленных задач определены в решениях ПҚ-5032 и других нормативных правовых документах, связанных с данной деятельностью.

**Связь научно-исследовательской работы с приоритетными направлениями развития науки и технологий.** Настоящее исследование выполнено в рамках приоритетной направления 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.** Фотоэлектрические и электрофизические свойства аморфных полупроводников исследуются в передовых научно-исследовательских центрах мира. В частности, В.Ю.Урбах, В.Чен, Дж.Л.Фельдман (США), Г.Д.Коди, Дж.Таус (Чехия), Дж.А.Герра (Германия), В.А.Наджафов (Азербайджан), А.А.Пронькин, Т.А.Голикова (Россия) провели практические и теоретические исследования по аморфным полупроводникам.

Научные школы известных академиков Узбекистана: Р.А.Муминова, М.К.Бахадирханова и С.Заинобидинова, профессора: К.Ф.Абдурахманов, Э.З.Имомов, Р.Я.Расулов, Ш.Отажонов, М.Турсунов провели множество научных исследований по спектральным характеристикам коэффициента оптического поглощения в полупроводниках. До сих пор зона проводимости и плотность электронных состояний в хвосте этой зоны не изучались теоретически по спектрам оптического поглощения аморфных полупроводников.

**Тема диссертации связана с планами научно-исследовательской работы высшего учебного заведения, в котором выполняется диссертация.** Исследование проведено на основе научно-исследовательского плана Наманганского инженерно-технологического института.

**Цель исследования** аморфные полупроводники состоят из экспериментальных значений междузонных экспоненциальных спектров поглощения и формулы Кубо-Гринвуда для определения распределения

плотности их электронного состояния в зоне проводимости и хвостовой части этой зоны.

**Задачи исследования:**

Запись аморфных полупроводников для междузонных и экспоненциальных спектров поглощения в определённом интегральном представлении неопределённого интеграла в формуле Кубо-Гринвуда, которая записывается в соответствии с методом аппроксимации Дэвиса-Мотта.

Определение аморфных полупроводников путем корректировки коэффициента пропорциональности и энергетической ширины сопротивления подвижности в аналитической форме спектра межзонного поглощения в соответствии со спектрами межзонного поглощения, определенными в результате экспериментов.

Для межзонного спектра поглощения формула Кубо-Гринвуда предназначена для получения аналитического выражения, определяющего распределение плотности электронных состояний в зоне проводимости, и для определения аморфного углерода по значениям межзонного спектра поглощения, определенным из экспериментов, по распределению плотности электронных состояний в зоне проводимости.

Определение аморфных полупроводников путем сравнения параметров, определяющих коэффициент пропорциональности в аналитической форме экспоненциального спектра поглощения, энергетическую ширину показателя преломления и кривизну экспоненциальных хвостов зон валентности и проницаемости, путем сравнения значений межзонного и экспоненциального спектров поглощения, определенных из экспериментов и рассчитанных из аналитических выражения.

Используя значения экспоненциального спектра поглощения, определенные в результате эксперимента для аморфной твердой смеси селен-сера, и формулу Кубо-Гринвуда, определите распределение плотности электронных состояний в хвостовой части зоны проводимости.

**Объект исследования** поскольку были получены межзонные спектры поглощения, определенные в экспериментах с аморфным углеродом ( $a-C$ ), а также межзонные и экспоненциальные спектры поглощения, определенные в экспериментах с аморфной твердой смесью селен-сера ( $a-Se_{0.5}S_{0.5}$ ).

**Предмет исследования** в аморфных полупроводниках он заключается в определении междузонных и экспоненциальных спектров поглощения света по значениям, определенным в экспериментах, и распределению плотности электронных состояний в зоне проводимости и ее хвосте.

**Методы исследования** Используя формулу Кубо-Гринвуда в соответствии с методом приближения Дэвиса-Мотта, методом приближенных вычислений и методом компьютерной графики (Maple7).

**Научная новизна исследования состоит в том, что:**

Было показано, что аморфные полупроводники следует определять путем корректировки коэффициента пропорциональности и энергетической ширины

деформации подвижности в аналитическом представлении межзонального спектра оптического поглощения в соответствии со спектрами межзонального поглощения, определенными в результате экспериментов.

Формула Кубо-Гринвуда, первоначально записанная в соответствии с методом аппроксимации Дэвиса-Мотта для межзонного спектра поглощения, показала, что распределение плотности электронного состояния в зоне проводимости было выражено аналитически и что аморфный углерод был получен в результате экспериментов из значений межзонного спектра поглощения в распределение плотности электронного состояния в зоне проводимости.

Было показано, что аморфные полупроводники следует определять путем сравнения значений, определенных в экспериментах по межзональному и экспоненциальному спектрам поглощения, для определения параметров, определяющих коэффициент пропорциональности в аналитическом выражении экспоненциального спектра поглощения, энергетическую ширину деформации сопротивления и кривизну экспоненциальных хвостов спектра поглощения. зоны валентности и проводимости.

Впервые формула Кубо-Гринвуда, записанная в соответствии с методом приближения Дэвиса-Мотта для экспоненциального спектра поглощения, привела к выражениям, определяющим распределение плотности электронных состояний в хвостовой части зоны проводимости.

Используя значения экспоненциального спектра поглощения, определенные в результате эксперимента, и формулу Кубо-Гринвуда, записанную для экспоненциального спектра поглощения для аморфной твердой смеси селен-сера, сначала было определено распределение плотности электронных состояний в хвостовой части зоны проводимости того же материала.

#### **Практические результаты исследования включают:**

из формулы Кубо-Гринвуда, записанной в соответствии с приближением Дэвиса-Мотта к межзональным и экспоненциальным спектрам поглощения аморфных полупроводников, были выведены аналитические выражения распределений плотности электронного состояния в зоне проводимости аморфного полупроводника и его хвостовой части.

**Достоверность результатов исследования** использование международно признанных методов и методически апробированных математических приемов при выполнении проведенных теоретических расчетов оправдано тем фактом, что результаты, рассчитанные теоретически, соответствуют результатам эксперимента, представленным в литературе.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они позволяют расширить представления о распределениях плотности электронного состояния и междузонных, а также экспоненциальных спектрах поглощения, которые характерны для аморфных полупроводников.

Практическая значимость результатов исследования позволяет создавать приборы оптоэлектроники с улучшенными оптическими свойствами результатов, которые получены в новом методе, предложенном для расчета распределения плотности электронных состояний, характерного для аморфных полупроводников.

**Внедрение результатов исследований.** На основе полученных результатов по спектральным характеристикам аморфных полупроводников и распределению плотности электронных состояний в аморфных полупроводниках использованы новые методы расчета распределения зоны проводимости и плотности электронных состояний в хвосте этой зоны в аморфных полупроводниках, производство аморфно-полупроводниковых оптоэлектронных приборов на АО «Фотон» (Справка 04-3/296-кон от 22 февраля 2024 года АО «Uzeltexsanoat»). Образцы разработаны на основе результатов научных исследований, проведенных в АО «Фотон», оптико-электрические параметры образцов соответствуют существующим нормативным технологическим процессам;

По результатам исследования спектральных характеристик и плотности распределения электронных состояний аморфных полупроводников установлено, что он может быть использован при расчете фотоэлектрических параметров органических солнечных элементов нового типа (DSSS) в научной лаборатории ИОННОГО Центра Путры. Университет, Малайзия. (Бюллетень Университета Путра Малайзия от 16 апреля 2024 г.) Было обнаружено, что расчеты согласуются с экспериментальными результатами.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований были представлены и обсуждены в общем на 9, в том числе 5 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По материалам диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 9 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, 3 статьи в зарубежных международных реферируемых Scopus журналах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем диссертации составляет 110 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

В введении к диссертации обосновывается актуальность и необходимость исследования, описываются цель и задачи, объект и предмет исследования, определяется взаимосвязь науки и методов исследования с темой диссертации в ВУЗ, где выполнялась диссертация, соответствие разработок с приоритетными направлениями, указывается научная новизна и практические результаты работы.

**Литературный анализ диссертации.** В главе 1, которая названа "Спектральные характеристики коэффициента оптического поглощения и распределение плотности электронных состояний аморфных полупроводников" приведена формула Кубо-Гринвуда, используемая для аналитического сравнения аморфных полупроводников с коэффициентом оптического поглощения различными способами. Эта формула предоставляет информацию о распределениях плотности электронных состояний, используемых для расчета спектров коэффициента поглощения. Фиксированные зоны и их электронные состояния в хвостах, приведены данные о методах расчета участвующих коэффициентов оптического поглощения и их недостатках. Исходя из вышеизложенного, ставиться вопрос о научном исследовании задач, которые будут выполняться в диссертационной работе.

Глава 2 диссертационной работы, называемая формула Кубо-Гринвуда, записанная в виде определённого интеграла, утверждает, что коэффициент оптического поглощения должен записывать интеграл в формуле Кубо-Гринвуда, записанной в приближении Дэвиса-Мотта, в виде определённого интеграла, чтобы определить спектральные характеристики как частные решения. Известно, что спектр коэффициента межзонального поглощения аморфных полупроводников может быть определен по формуле Кубо-Гринвуда в соответствии с приближением Дэвиса-Мотта, когда известно распределение плотности электронных состояний в разрешенных зонах. Эта формула записана в общих чертах следующим образом.

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 \Omega}{(m^*)^2 n_0 c} \int \frac{g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega)(f(\varepsilon) - f(\varepsilon + \hbar\omega))}{\hbar\omega} |D|^2 d\varepsilon \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $m^*$  – эффективная масса электронов,  $\Omega$  –  $\varepsilon$  объем, нормализованный для частной функции энергии электрона,  $\omega$  – частота поглощенного фотона,  $n_0$  – показатель преломления среды,  $c$  – скорость света,  $g(\varepsilon)$  – распределение плотностей перед поглощением и  $g(\varepsilon + \hbar\omega)$  – после поглощения фотонного состояния электронов, участвующих в оптическом переходе,  $|D|^2$  – дисперсия матричного элемента оптических переходов электронов,  $f(\varepsilon)$  и  $f(\varepsilon + \hbar\omega)$  – являются распределениями Ферми – Дирака, эквивалентными:

$$f(\varepsilon) = 1/(1 + \exp((\varepsilon - \varepsilon_F)/kT)),$$

$$f(\varepsilon + \hbar\omega) = 1/(1 + \exp((\varepsilon - \varepsilon_F + \hbar\omega)/kT)).$$

Поскольку в распределениях Ферми-Дирака составляет  $\varepsilon_F < 0$ ,  $\varepsilon < 0$ ,  $\varepsilon < \varepsilon_F$  и  $\hbar\omega > \varepsilon - \varepsilon_F$ , энергия поглощенных фотонов равна энергии фононов, когда энергия слишком велика, то есть  $\hbar\omega \gg kT$   $f(\varepsilon) \approx 1$  и  $f(\varepsilon + \hbar\omega) \approx 0$ . Формула Кубо-Гринвуда для этого случая выглядит следующим образом:

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

При вычислении формулы Кубо-Гринвуда по методу приближения Дэвиса-Мотта для однопольных оптических переходов электронов матричный

элемент оптических переходов  $|D|^2 = \lg(\alpha, \text{см}^{-1})$

электронов выписывается из-под интеграла, говоря, что дисперсия постоянна: Для междузонных переходов, когда  $\frac{m}{m^*} = 1$  и

$k = \frac{\pi}{a}$  ( $k$  - волновое число электронов, а  $a$  - среднее расстояние между атомами исследуемого образца), можно записать в  $D = \pi \left( \frac{a}{\Omega} \right)^{1/2}$  видах. Используя это, в

соответствии с приближением Дэвиса – Мотта для аморфных полупроводников, формула Кубо-Гринвуда для междузонного спектра поглощения фотонов записывается в виде

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^4 e^2 \hbar^2 a}{m^2 n_0 c} \int \frac{g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon \quad (3)$$

Ниже приведен способ вычисления этой формулы. (3) формула:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int \frac{g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon, \quad (4)$$

написана в общих чертах. Где  $A$  - коэффициент пропорциональности  $A = \frac{8\pi^4 e^2 \hbar^2 a}{m^2 n_0 c}$ , который не зависит от частоты поглощенных фотонов.

Поскольку интеграл в этой формуле неопределенный, от общего решения можно избавиться. Было показано, что, поскольку это общее решение не переоценивает результаты эксперимента, если интеграл в формуле Кубо-Гринвуда записать в определенном интегральном представлении, то его решение переопределяет результаты эксперимента.

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} \frac{g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon. \quad (5)$$

Рассматривая переход электронов из валентной зоны и ее хвостовой части в зону проводимости или ее хвостовой конец, когда фотоны с энергией, превышающей энергетическую ширину щели напряжения, поглощаются в аморфных полупроводниках, приведенная выше формула может быть адаптирована к оптическим переходам электронов:

$$\begin{aligned} \alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} \frac{g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon = A \int_{\varepsilon_v}^{\varepsilon_0} \frac{g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon + \\ + A \int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} \frac{g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon + A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_c - \hbar\omega} \frac{g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\alpha_1$ - частичный спектр электронов от хвоста валентной зоны до зоны проводимости,  $\alpha_2$  – зона проводимости от валентной зоны, а  $\alpha_3$  – оптические переходы от валентной зоны к хвосту зоны проводимости.

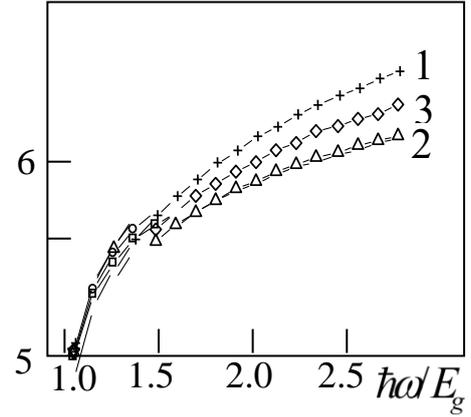


Рис.1. Зависимость спектральной характеристики межзонного коэффициента оптического поглощения от распределения электронных состояний в разрешенных зонах. Где 1 -  $n_1=1; n_2=1$ ; 2 -  $n_1=1/2; n_2=1/2$ , 3 -  $n_1=1; n_2=1/2$ .

Следующая модель была использована для распределения плотности электронного состояния в приведенных выше формулах:

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left( \frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1} \quad n_1 = 1/2, 1, \quad \text{где } \varepsilon \leq \varepsilon_V \quad (7)$$

$$g(\varepsilon + \hbar\omega) = N(\varepsilon_C) \left( \frac{\varepsilon + \hbar\omega - \varepsilon_V}{E_g} \right)^{n_2} \quad n_2 = 1/2, 1, \quad \text{где } \varepsilon_C \leq \varepsilon. \quad (8)$$

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)), \quad \text{где } \varepsilon_V < \varepsilon < \varepsilon_0. \quad (9)$$

$$g(\varepsilon + \hbar\omega) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon + \hbar\omega - \varepsilon_C)), \quad \text{где } \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_C \quad (10)$$

где  $n_1$  -,  $n_2$  – уровни распределения плотности электронных состояний в допустимых областях,  $N(\varepsilon_V)$  и  $N(\varepsilon_C)$  - эффективные значения распределения плотности электронных состояний в валентной зоне и зоне проводимости соответственно,  $\varepsilon_0$  – энергетическое положение точки пересечения концов валентной зоны и зоны проводимости.

Применяя приведенные выше распределения плотности электронного состояния к формуле Кубо-Гринвуда, были определены выражения для спектральной характеристики коэффициента частичного поглощения для оптических переходов трех различных электронов, показанных выше. Выполненные на них расчеты показали, что в области основного поглощения коэффициент поглощения основную роль играет межзонный спектр поглощения.

Для случаев, когда распределение электронных состояний в зонах, разрешенных одним и тем же методом, является параболическим и линейным соответственно:

$$\alpha_2 = \frac{B}{4E_g \hbar\omega} \left( 2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega} - (E_g + \hbar\omega)^2 \arctg \left( \frac{E_g - \hbar\omega}{\sqrt{4E_g \hbar\omega}} \right) \right), \quad (11)$$

$$\alpha_2 = \frac{B}{E_g^2 \hbar\omega} \frac{\hbar\omega - E_g}{6} (E_g^2 + 4\hbar\omega E_g + \hbar^2 \omega^2) \quad (12)$$

принимаются выражения. Коэффициент пропорциональности  $B = AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)$  в этом выражении является постоянной величиной. Расчеты спектров междузонных оптических переходов электронов показали, что при градуированном распределении электронных состояний в разрешенных зонах чередование уровней распределения электронных состояний в зонах валентности и проводимости не влияет на получаемый результат. Учитывая это, а также плотности нелокализованных состояний в разрешенных зонах являются спектральными характеристиками коэффициента межзонного поглощения для различных комбинаций случаев, в которых уровни энергетической связи отличаются друг от друга:

Одно из состояний электрона в фиксированных зонах является параболическим, в то время как другое - линейным:

$$\alpha_2 = \frac{2B}{15\sqrt{E_g^3 \hbar\omega}} \left( 5(E_g + \hbar\omega) \left( \sqrt{\hbar\omega^3} - \sqrt{E_g^3} \right) - 3 \left( \sqrt{\hbar\omega^5} - \sqrt{E_g^5} \right) \right). \quad (13)$$

получено визуальное выражение. На рисунке 1 представлены спектральные характеристики коэффициента поглощения электронов, определяемые по межзональным электронно-оптическим переходам с учетом распределения плотности электронных состояний в разрешенных зонах. Из рисунка видно, что эти спектры качественно не отличаются и соответствуют результатам, полученным в результате экспериментов.

Известно, что если энергия фотонов, поглощаемых в аморфных полупроводниках, меньше энергетической ширины щели подвижности, они, в то же время, могут переводить электроны из хвоста валентной зоны в зону проводимости, из хвоста валентной зоны в хвост зоны проводимости, и от валентной зоны к хвосту. Подробно рассмотрим коэффициент спектрального спектра. Как ранее, по приближению Дэвис-Мотта из формулы Кубо-Гринвуда для плотности распределения электронных состояний воспользуемся моделью:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1(\hbar\omega) + \alpha_2(\hbar\omega) + \alpha_3(\hbar\omega) \quad (14)$$

Здесь приведены основные спектры оптических переходов  $\alpha_1$  – электронов из хвоста валентной зоны в зону проводимости,  $\alpha_2$  – из хвоста валентной зоны в хвост зоны проводимости,  $\alpha_3$  – из валентной зоны в хвост зоны проводимости. Давайте снова начнем расчеты, рассмотрев спектральные характеристики коэффициента поглощения в аморфных полупроводниках, которые не являются легализованными, но имеют проводимость n-типа.

Выше упоминалось, что коэффициент поглощения в области  $\varepsilon_0 - \varepsilon_V < \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$  состоит из суммы трех составляющих. Расчеты основных спектров, полученных по формуле (14), показали, что основную роль в определении экспоненциального спектра поглощения играет парциальный спектр, который определяется оптическими переходами электронов из хвостовой части валентной зоны в хвостовую часть зоны проводимости. Исходя из этого, спектры коэффициентов поглощения, соответствующие локализованным межсостоятельным переходам, записываются в следующем виде:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = B \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (15)$$

Из вычислений выводится выражение

$$\alpha_2 = \frac{A}{(\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g)) [1 - \exp((\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega - E_g))], \quad (16)$$

Результаты этих расчетов спектра показаны на рис. 2. Поскольку этот спектр обнаруживает электроны посредством локализованных оптических переходов между состояниями, расположенных в щели подвижности аморфных полупроводников, они известны как электронные переходы без фототока, если электроны перемещаются из хвостовой части валентной зоны в зону проводимости электронным способом, в то время как при перемещении

из валентной зоны в хвостовую часть зоны проводимости генерируется ковалентный фототок.

В главе 3 диссертации, озаглавленной "Расчет распределения плотностей электронных состояний в зоне проводимости по междузонному спектру поглощения аморфных полупроводников", получены аналитические решения всех парциальных спектров в одной и той же области по формуле Кубо-Гринвуда, написанной для основной области поглощения спектра оптического поглощения. Было показано, что формулы, полученные для этих спектров, практически не отличаются друг от друга. Формула Кубо-Гринвуда приводит к новой формуле, определяющей распределение плотности электронных состояний в зоне проводимости. Междузонный спектр поглощения аморфного углерода был рассчитан по экспериментально определенным значениям распределения плотности электронных состояний в зоне проводимости того же материала.

Известно, что все области коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников теоретически изучены с использованием формулы Кубо-Гринвуда. Эта формула записана для оптических спектров поглощения, когда энергия фотонов, попадающих в аморфный полупроводник, превышает энергетическую ширину деформации подвижности в следующих представлениях:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int g_v(\varepsilon)g_c(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (17)$$

или

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int g_v(\varepsilon - \hbar\omega)g_c(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \quad (18)$$

При определении значения коэффициента оптического поглощения основную роль играет начальное состояние плотностей электронных состояний, участвующих в оптическом переходе (17), формула используется, если играет конечное состояние (18). В главе 2 указывалось, что для получения частных решений спектров поглощения интеграл в формуле Кубо-Гринвуда должен быть записан в терминах точного интеграла. Следовательно, приведенные выше формулы запишем в виде:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g_v(\varepsilon)g_c(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (19)$$

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} g_v(\varepsilon - \hbar\omega)g_c(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (20)$$

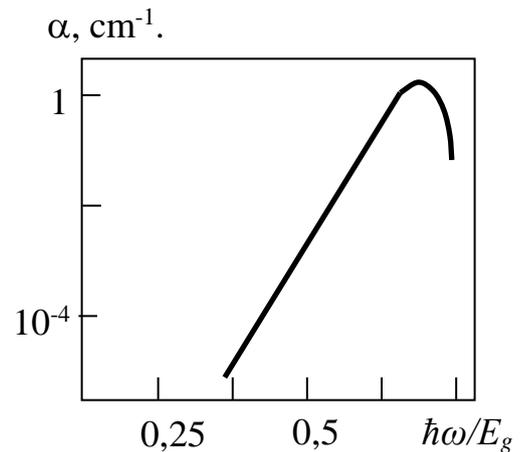


Рис..2. Спектральные характеристики коэффициента поглощения, определяемого локализованными электронными переходами между состояниями (которые не создают фототока) в аморфном полупроводнике n-типа, насыщенном водородом.

В аморфных полупроводниках мы рассмотрели, что три различных оптических переходах электронов происходят одновременно, когда поглощаются фотоны с энергией, превышающей их энергетическую ширину. Имея это в виду (20), мы можем адаптировать формулу к оптическим переходам электронов, которые происходят при поглощении фотонов большой энергии:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} +$$

$$+ A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_C} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1(\hbar\omega) + \alpha_2(\hbar\omega) + \alpha_3(\hbar\omega) \quad (21)$$

Из этой формулы мы выделяем межзональные спектры поглощения:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (22)$$

Где  $A$  – коэффициент пропорциональности, не зависящий от энергии ( $\hbar\omega$ ) поглощенных фотонов,  $g_V(\varepsilon - \hbar\omega)$  – распределение плотности электронов в валентной зоне,  $g_C(\varepsilon)$  – плотность их состояний в зоне проводимости.

Спектры межзонального поглощения, рассчитанные по формуле (17), приведены в главе 2. Исходя из этой формулы, чтобы рассчитать межзонный спектр поглощения, мы снова выбираем распределения плотности электронного состояния в зонах валентности и проводимости, как в главе 2:

$$g_V(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left( \frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1}, \quad n_1 = 1/2, 1 \quad (23)$$

$$g_C(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g} \right)^{n_2}, \quad n_2 = 1/2, 1 \quad (24)$$

Выше мы рассчитали спектры межзонного поглощения, используя выражения (23) и (24) (22):

Где  $n_1 = n_2 = 1/2$  :

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} N(\varepsilon_V) \left( \frac{\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega}{E_g} \right)^{1/2} N(\varepsilon_C) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g} \right)^{1/2} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} =$$

$$= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} \sqrt{\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_V} d\varepsilon$$

Если мы применим интегрируемую формулу к этой формуле:

$$X = \sqrt{ax+b}; \quad Y = \sqrt{fx+g}; \quad a = -1; \quad b = \varepsilon_C + \hbar\omega; \quad f = 1; \quad g = -\varepsilon_V$$

$$\Delta = bf - ag.$$

$$\int \sqrt{XY} = \frac{\Delta + 2aY}{4af} \sqrt{XY} - \frac{\Delta^2}{8af} \left( \frac{2}{\sqrt{-af}} \operatorname{arctg} \sqrt{-\frac{fX}{aY}} \right)$$

$$\alpha_2(\hbar\omega) = \frac{B}{\hbar\omega E_g} \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} \sqrt{\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_V} d\varepsilon =$$

$$= \frac{B}{4\hbar\omega E_g} \left[ 2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega} - (E_g - \hbar\omega)^2 \operatorname{arctg} \left( \frac{E_g - \hbar\omega}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right) \right] \quad (25)$$

мы получаем выражение. где  $n_1 = n_2 = 1$ :

$$\begin{aligned}\alpha_2(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} N(\varepsilon_V) \left( \frac{\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega}{E_g} \right)^1 N(\varepsilon_C) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g} \right)^1 \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{\hbar\omega E_g^2} \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega)(\varepsilon - \varepsilon_V) d\varepsilon\end{aligned}$$

Чтобы вычислить приведенный выше интеграл, мы введем следующие обозначения:

$$u = \varepsilon - \varepsilon_V \quad d\varepsilon = du$$

И, вычисляя интеграл в этом выражении, мы получаем следующий результат:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = \frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{\hbar\omega E_g^2} \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} (\hbar\omega - E_g + u)u du = \frac{B}{6\hbar\omega E_g^2} ((\hbar\omega - E_g)(E_g^2 + 4\hbar\omega E_g + \hbar\omega^2)) \quad (26)$$

(25) - (26) можно видеть, что эти формулы совпадают с межзональными спектрами поглощения, полученными в главе 2. Результаты расчетов по этим спектрам показаны на рис. 1. Из этого можно сделать следующий вывод. Если границы определённого интеграла и распределения плотности электронного состояния в формуле Кубо-Гринвуда выбраны правильно, было бы уместно записать формулу Кубо-Гринвуда (19) как в виде (20). Из формулы для получения производной от интеграла функции с двумя переменными по одной переменной:

$$\frac{d}{dy} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \frac{\partial \beta(y)}{\partial y} f(\beta(y), y) - \frac{\partial \alpha(y)}{\partial y} f(\alpha(y), y) \quad (27)$$

Мы применяем эту формулу к формулам (3.3) и (3.4):

$$\begin{aligned}\frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} \frac{\partial g_V(\varepsilon) g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} \frac{1}{\hbar\omega} d\varepsilon + \frac{A}{\hbar\omega} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial \hbar\omega} g_V(\varepsilon_V) g_C(\varepsilon_V + \hbar\omega) - \\ &- \frac{A}{\hbar\omega} \frac{\partial(\varepsilon_C - \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} g_V(\varepsilon_C - \hbar\omega) g_C(\varepsilon_C) \\ \frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) &= \frac{A}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g_V(\varepsilon) \left( \frac{\partial g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} \right) d\varepsilon - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{A}{\hbar\omega} g_V(\varepsilon_C - \hbar\omega) g_C(\varepsilon_C).\end{aligned} \quad (28)$$

Поскольку свободной переменной в формуле (28) является энергия фотона, по этой формуле можно определить только плотность распределения электронных состояний в валентной зоне.

$$g_V(\varepsilon_C - \hbar\omega) = \frac{1}{g_C(\varepsilon_C)} \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g_V(\varepsilon) \left( \frac{\partial g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} \right) d\varepsilon - \frac{\hbar\omega}{A g_C(\varepsilon_C)} \frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{A g_C(\varepsilon_C)}. \quad (29)$$

Теперь мы применяем формулу (28) к формуле (20):

$$\begin{aligned}\frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} g_C(\varepsilon) \frac{\partial(g_V(\varepsilon - \hbar\omega))}{\partial \hbar\omega} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \\ &- \frac{A}{\hbar\omega} g_V(\varepsilon_V) g_C(\varepsilon_V + \hbar\omega)\end{aligned} \quad (30)$$

Из формулы (30) следует, что из нее можно определить плотность электронных состояний в зоне проводимости:

$$g_c(\varepsilon_v + \hbar\omega) = \frac{1}{g_v(\varepsilon_v)} \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_v + \hbar\omega} g_c(\varepsilon) \frac{\partial(g_v(\varepsilon - \hbar\omega))}{\partial \hbar\omega} d\varepsilon - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{Ag_v(\varepsilon_v)} - \frac{\hbar\omega}{Ag_v(\varepsilon_v)} \frac{d}{d(\hbar\omega)} \alpha_2(\hbar\omega) \quad (31)$$

Из вышеизложенного следует, что для определения плотности электронных состояний в зоне проводимости из межзонального спектра поглощения требуется, чтобы формула Кубо-Гринвуда была записана в виде (20).

Известно, что энергия фотонов, поглощаемых в фундаментальной области электронно-оптических переходов, делает аморфные полупроводники большими, чем энергетическая ширина деформации подвижности ( $E_g < \hbar\omega$ ). В аморфных полупроводниках, когда поглощаются фотоны с энергией большей, чем  $E_g$ , одновременно наблюдались оптические переходы электронов из хвостовой части валентной зоны в зону проводимости, из валентной зоны в зону проводимости и из валентной зоны в хвостовую часть зоны проводимости.

Как правило, при теоретических исследованиях спектров оптического поглощения плотности электронных состояний аморфных полупроводников на границах разрешенных зон записываются линейно или параболически, а плотности разрешенных зон - в виде хвостов с экспоненциальным распределением.

Для межзонального спектра  $n_1 = n_2 = 1/2$  в формуле (31) приведены функции в выбранной модели:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_v + \hbar\omega} N(\varepsilon_v) \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon + \hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} N(\varepsilon_c) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}$$

Из этого выражения мы можем вывести фотоны по энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{B}{E_g} \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_v + \hbar\omega} (\varepsilon - \varepsilon_v)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon + \hbar\omega}{\hbar\omega} \right)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon + \\ &+ B \frac{\partial(\varepsilon_v + \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_v - \hbar\omega + \hbar\omega)^{\frac{1}{2}} (\varepsilon_v + \hbar\omega - \varepsilon_v)^{\frac{1}{2}}}{E_g \hbar\omega} - B \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial \hbar\omega} \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_c + \hbar\omega)^{\frac{1}{2}} (\varepsilon_c - \varepsilon_v)^{\frac{1}{2}}}{E_g \hbar\omega} = \\ &= \frac{B}{2E_g} (E_g + \hbar\omega) \arctg \frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{B}{N(\varepsilon_c)} \frac{1}{\hbar\omega} N(\varepsilon_c) \left( \frac{\hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (32)$$

Чтобы выяснить, какое энергетическое состояние определяет  $\hbar\omega/E_g$  в этом выражении

$$g_c(\varepsilon) = N(\varepsilon_c) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} = N(\varepsilon_c) \left( \frac{\hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

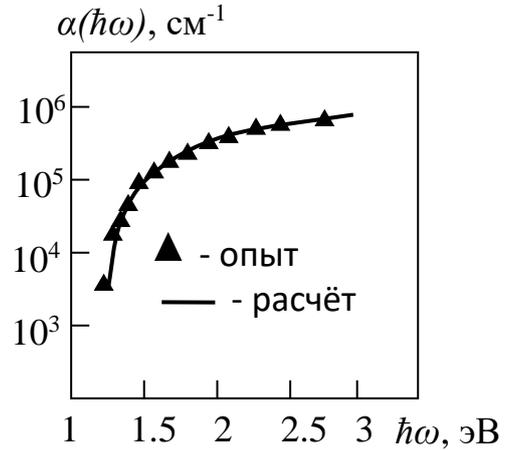


Рис. 3. Спектры межзонального поглощения аморфного углерода (a-C), полученные в эксперименте и рассчитанные по формуле (25).

введем обозначения, из которых найдем, какое энергетическое состояние определяет  $\hbar\omega/E_g$ . Поскольку  $\varepsilon = \varepsilon_c + \hbar\omega$ , это энергетическое состояние находится внутри зоны проводимости. Используя обозначения (33), запишем (32) следующим образом:

$$\frac{\partial\alpha_2(\hbar\omega)}{\partial\hbar\omega} = \frac{B}{2E_g}(E_g + \hbar\omega)\text{arctg}\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g\hbar\omega}} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{B}{N(\varepsilon_c)}\frac{1}{\hbar\omega}g_c(\varepsilon) \quad (34)$$

Из этого выражения определяем распределение плотности электронных состояний в зоне проводимости:

$$g_c(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_c)\hbar\omega}{B}\left(\frac{\partial\alpha_2(\hbar\omega)}{\partial\hbar\omega} - \frac{B}{2E_g}(E_g + \hbar\omega)\text{arctg}\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g\hbar\omega}} + \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega}\right) \quad (35)$$

Запишем выражение (35) в следующем виде, усреднив энергию поглощенных фотонов и значения коэффициента межзонного поглощения:

$$g_{ci}(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_c)(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2B}\left(\frac{\alpha_2(\hbar\omega_{i+1}) - \alpha_2(\hbar\omega_i)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} - \frac{B}{2E_g}\left(E_g + \frac{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i}{2}\right) \times \right. \\ \left. \times \text{arctg}\frac{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i - 2E_g}{\sqrt{8E_g(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}} + \frac{\alpha_2(\hbar\omega_{i+1}) + \alpha_2(\hbar\omega_i)}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i}\right) \quad (36)$$

где  $\alpha(\hbar\omega_i)$  и  $\hbar\omega_i$  — экспериментально определенные коэффициенты межзонного поглощения и соответствующие энергии поглощенных фотонов соответственно.

Чтобы определить распределение плотности электронных состояний в зоне проводимости по формуле (36), необходимо определить в ней  $B$  и  $E_g$ .

Уларни зоналараро ютилиш спектрини тажрибадан аниқланган кийматларидан фойдаланамиз. Представлен спектр межзонного поглощения аморфного углерода, определенный экспериментально (рис. 3). Подгоним результаты расчета, полученные по формуле (26), к экспериментальным результатам на рисунке, рассматривая  $B$  и  $E_g$  как параметры настройки.

При значениях этих параметров, равных  $E_g = 1.252$  эВ и  $B = 7.44$  см<sup>-5</sup>, оказалось, что это согласуется с результатами расчета, полученными по формуле (26) (рис. 3.2, связанная кривая).

Результаты расчетов, выполненных путем подстановки в формулу (26) распределения плотности электронных состояний в зоне проводимости аморфного углерода, экспериментально определенного коэффициента межзонного поглощения и соответствующей им энергии поглощенных фотонов, представлены на рис. 4.

В главе 4 диссертации под названием «Расчет распределения плотностей электронных состояний в хвосте зоны проводимости из экспоненциального спектра поглощения аморфных полупроводников» аналитические решения всех парциальных спектров в этой области были получены из формулы Кубо - Гринвуда (3) записана для области поглощения экспоненциальной области спектра оптического поглощения аморфных полупроводников. Показано, что эти спектры совершенно не отличаются от результатов, полученных по формулам Кубо-Гринвуда вида (2). Новая

формула, определяющая распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости, была выведена из формулы Кубо-Гринвуда (3). Распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости этого материала рассчитано на основе экспериментально определенных значений экспоненциального спектра поглощения аморфного твердого сплава селен-сера ( $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$ ). Для определения аналитического выражения  $\alpha(\hbar\omega)$  спектральных характеристик коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников воспользуемся формулой Кубо-Гринвуда по методу аппроксимации Дэвиса-Мотта.

Было отмечено, что для получения конкретных решений спектров коэффициентов оптического поглощения из формулы Кубо-Гринвуда интеграл в ней необходимо записать в точной интегральной форме.:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (37)$$

Выше было показано, что в экспоненциальной области спектра коэффициента оптического поглощения (когда энергия поглощенных фотонов немного меньше энергетической ширины запрещенной зоны подвижности) происходят оптические переходы электронов из хвоста валентной зоны в зоны проводимости, от хвоста валентной зоны к хвосту зоны проводимости и от валентной зоны к хвосту зоны проводимости происходят одновременно. Поэтому формулу (37) следует адаптировать к указанным выше оптическим переходам электронов.

$$\begin{aligned} \alpha(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \\ &+ A \int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \end{aligned} \quad (38)$$

Показано, что значение экспоненциального спектра поглощения в основном играет парциальный спектр оптических переходов электронов из хвоста валентной зоны в хвост зоны проводимости. Поэтому рассчитаем этот спектр по формуле (38).

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (39)$$

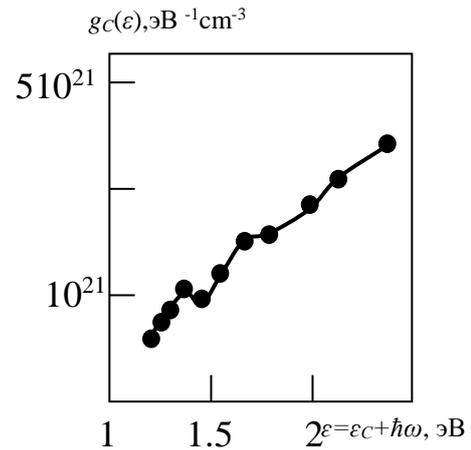


Рис. 4 Распределение электронной плотности состояний в зоне проводимости рассчитано на основе экспериментально определенного спектра межзонного поглощения аморфного углерода.

Подставим в формулу (39) распределения плотности электронных состояний в хвосте валентной зоны и зоны проводимости:

$$g_V(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)), \quad (40)$$

$$g_C(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)). \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \alpha_2(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \hbar\omega - \varepsilon_V)) N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1)} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g)) (1 - \exp((\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega - E_g))) \end{aligned} \quad (42)$$

Теперь посмотрим на спектры оптических переходов электронов из хвоста валентной зоны в зону проводимости и из валентной зоны в хвост зоны проводимости. При  $n_2=1$

$$\begin{aligned} \alpha_1(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= A \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \hbar\omega - \varepsilon_V)) N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g}\right)^1 \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \exp(\beta_1 \hbar\omega) \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) (\varepsilon - \varepsilon_V) d\varepsilon \end{aligned} \quad (43)$$

$\int x \exp(ax) dx = \exp(ax) \left(\frac{x}{a} - \frac{1}{a^2}\right) + C$  если мы воспользуемся формулой

$$\begin{aligned} \alpha_1(\hbar\omega) &= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \exp(\beta_1 \hbar\omega) \int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) * (\varepsilon - \varepsilon_V) d\varepsilon = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega E_g \beta_1} (\exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g))) * \left(\frac{1}{\beta_1} + E_g\right) + \exp(\beta_1(\varepsilon_V - \varepsilon_0)) * \left(\varepsilon_0 + \hbar\omega - \varepsilon_V + \frac{1}{\beta_1}\right) \end{aligned} \quad (44)$$

Когда  $n_1=1$ :

$$\begin{aligned} \alpha_3(\hbar\omega) &= A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \exp(-\beta_2 \hbar\omega) \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega) \exp(\beta_2(\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega)) d\varepsilon \end{aligned}$$

Еще:  $\int x \exp(ax) dx = \exp(ax) \left(\frac{x}{a} - \frac{1}{a^2}\right) + C$  мы используем формулу:

$$\begin{aligned} \alpha_3(\hbar\omega) &= \frac{B}{\hbar\omega E_g} \exp(-\beta_2 \hbar\omega) \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V + \hbar\omega} (\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega) \exp(\beta_2(\varepsilon_C - \varepsilon + \hbar\omega)) d\varepsilon = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega E_g \beta_2} \exp(\beta_2(E_g - \hbar\omega)) \left(E_g - \frac{1}{\beta_2}\right) - \exp(\beta_2(\varepsilon_C - \varepsilon_0)) \left(\hbar\omega - \varepsilon_C - \varepsilon_0 - \frac{1}{\beta_2}\right) \end{aligned} \quad (45)$$

Аналитическое решение невозможно получить, если  $n_1 = n_2 = 1/2$ . Поэтому эти спектры были рассчитаны приближенными методами.

Поскольку полученные выше результаты совпадают с результатами, полученными по формулам (2) и (3) главы 2, можно сделать следующий вывод. Если пределы интеграла в формуле Кубо-Гринхуда и выбранная для расчета этой формулы модель верны, то эту формулу можно записать в формах (4.3) и (37). Результаты расчета, полученные по формулам (42), (44) и (45), представлены на рисунке 5. Известно, что энергия фотонов, поглощаемых в поле экспоненциального поглощения оптических переходов электронов в аморфных полупроводниках, меньше энергетической ширины запрещенной зоны подвижности аморфных полупроводников ( $\hbar\omega < E_g$ ). Показано, что при поглощении фотонов с энергией меньше  $E_g$  в аморфных полупроводниках происходят оптические переходы электронов из хвоста валентной зоны в зону проводимости, из хвоста валентной зоны в хвост зоны проводимости и из хвоста валентной зоны в зону проводимости. одновременно наблюдаются хвост валентной зоны и хвост зоны проводимости. Поэтому в предыдущем параграфе считалось, что формулу Кубо-Гринхуда следует адаптировать к указанным выше оптическим переходам. Поэтому в предыдущем параграфе считалось, что формулу Кубо-Гринхуда следует адаптировать к указанным выше оптическим переходам. Теперь мы рассмотрим метод определения

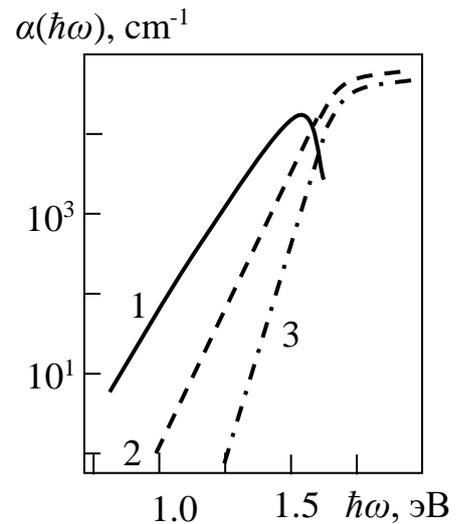


Рис. 5. Графики парциальных спектров поглощения получены по формулам 1-(42), 2-(44) и 3-(45). Расчеты  $\epsilon_c - \epsilon_0 = 0.7$  эВ;  $E_g = 1.8$  эВ; Это было сделано для значений  $\beta_1 = 16$  эВ<sup>-1</sup> и  $\beta_2 = 25$  эВ<sup>-1</sup>.

распределения плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости с использованием экспериментально определенных значений экспоненциального спектра поглощения. Представлены экспериментально определенные значения коэффициента оптического поглощения аморфного твердого сплава селен-сера (рис. 6). Как видно из рис. 6, основную роль в экспоненциальном поле спектра коэффициента оптического поглощения играет спектр парциального поглощения, определяемый оптическими переходами электронов из хвоста валентной зоны в хвост зоны проводимости. Для расчета этого спектра по аналитической формуле

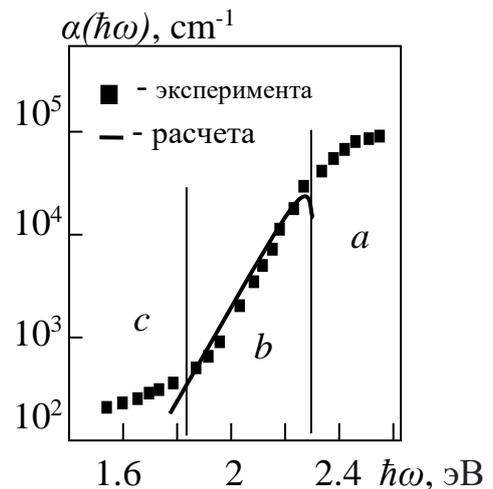


Рис.6. Экспоненциальные спектры поглощения, полученные из эксперимента и расчета по формуле (42) для аморфного  $\text{Se}_{0.5}\text{S}_{0.5}$  (сплошная линия). *a*-область межзонного поглощения, *b* область экспоненциального поглощения, *c*-область дефектного поглощения

(42) необходимо использовать энергетическую ширину запрещенной зоны подвижности  $E_g$ , коэффициент пропорциональности  $B$  и параметры  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , определяющие кривизну экспоненциальных хвостов валентной зоны и зоны проводимости: должно быть известно. Путем сравнения экспериментально определенных значений межзонных и экспоненциальных спектров поглощения аморфного твердого сплава селен-сера и результатов, рассчитанных по аналитической формуле, дан метод определения всех этих параметров, а их значение составляет  $A=7,5*10^5 \text{ см}^{-1}$ ,  $E_g=2.25 \text{ эВ}$   $\beta_1=16,2 \text{ эВ}^{-1}$  и  $\beta_2 = 19,8 \text{ эВ}^{-1}$  установлено, что результаты эксперимента и расчета согласуются друг с другом.

Формула Кубо-Гринвуда для экспоненциального спектра поглощения мы проверили, что можно писать в виде: 
$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g_V(\varepsilon) g_C(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (46)$$

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (47)$$

К приведенным выше формулам применим формулу вывода производной интеграла от функции двух переменных по одной переменной:

$$\frac{\partial}{\partial y} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \frac{\partial \beta(y)}{\partial y} f(\beta(y), y) - \frac{\partial \alpha(y)}{\partial y} f(\alpha(y), y) \quad (48)$$

$$\frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} A \left( \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} \left( \frac{g_V(\varepsilon) g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} \right) d\varepsilon \right) = A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g_V(\varepsilon) \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} \frac{g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \frac{A}{\hbar\omega} g_V(\varepsilon_C - \hbar\omega) g_C(\varepsilon_C) \quad (49)$$

Поскольку переменной в этой формуле является только энергия поглощенных фотонов, можно определить только плотности распределения электронов в валентной зоне. Теперь рассчитаем вторую формулу Кубо-Гринвуда:

$$\frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} A \left( \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \left( \frac{g_V(\varepsilon - \hbar\omega) g_C(\varepsilon)}{\hbar\omega} \right) d\varepsilon \right) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} g_C(\varepsilon) \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} \frac{g_V(\varepsilon - \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \frac{A}{\hbar\omega} g_V(\varepsilon_V) g_C(\varepsilon_V + \hbar\omega) \quad (50)$$

Из этой формулы видно, что по ней можно рассчитать распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости. Теперь рассмотрим расчет распределения плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости. Если подставить в эту формулу функции распределения выбранной модели мы получаем выражение:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \hbar\omega - \varepsilon_V)) N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \quad (51)$$

$$= B \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \frac{\exp(\beta_1 \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial(\hbar\omega)} &= \frac{\partial}{\partial(\hbar\omega)} B \int_{\varepsilon_V + \hbar\omega}^{\varepsilon_C} \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) \frac{\exp(\beta_1 \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon = \\ &= -\frac{B}{\hbar\omega} \exp(\beta_2(\hbar\omega - E_g)) \left(\frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1}\right) + \frac{B}{\hbar\omega} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2 - \beta_1}\right) \exp(-\beta_1(E_g - \hbar\omega)) - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \end{aligned} \quad (52)$$

В этом выражении введем следующие обозначения:

$$g_C(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\hbar\omega - E_g)) \quad (53)$$

и на основе него мы вычисляем, какое энергетическое состояние  $\hbar\omega - E_g$  определяет.  $\varepsilon - \varepsilon_C = \hbar\omega - E_g$ ,  $\varepsilon = \hbar\omega - E_g + \varepsilon_C$  определяет энергетическое состояние в хвосте зоны проводимости  $\hbar\omega < E_g$ , поскольку  $\hbar\omega - E_g$  в области экспоненциального поглощения.

Запишем формулу (52) в следующем

виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial(\hbar\omega)} &= -\frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_C)} N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\hbar\omega - E_g)) \\ &\left(\frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1}\right) + \frac{B}{\hbar\omega} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2 - \beta_1}\right) \exp(-\beta_1(E_g - \hbar\omega)) - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \quad (54) \\ \frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial(\hbar\omega)} &= -\frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_C)} g_C(\varepsilon) \left(\frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1}\right) + \\ &+ \frac{B}{\hbar\omega} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2 - \beta_1}\right) \exp(-\beta_1(E_g - \hbar\omega)) - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \end{aligned}$$

Из (54) находим  $g_C(\varepsilon)$ :

$$g_C(\varepsilon) = \frac{N(\varepsilon_C) \hbar\omega}{B} \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2}\right) \left(\frac{B}{\hbar\omega} \exp(-\beta_1(E_g - \hbar\omega)) - \frac{\partial \alpha_2(\hbar\omega)}{\partial(\hbar\omega)} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega)}{\hbar\omega}\right) \quad (55)$$

Эта формула представляет собой формулу для определения плотности распределения электронных состояний в хвосте зоны проводимости аморфных полупроводников. Запишем формулу (55) в следующем виде, усреднив энергию поглощенных фотонов, определенную из экспериментов, и значения коэффициента экспоненциального поглощения:

$$\begin{aligned} g_C(\varepsilon) &= \frac{N(\varepsilon_C)(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2B} \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2}\right) \left(\frac{2B}{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)} \exp(-\beta_1(E_g - \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2})) - \right. \\ &\left. - \frac{\alpha_2(\hbar\omega_{i+1}) - \alpha_2(\hbar\omega_i)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} - \frac{\alpha_2(\hbar\omega_{i+1}) + \alpha_2(\hbar\omega_i)}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i}\right) \quad (56) \end{aligned}$$

где  $\hbar\omega_i$  и  $\alpha_2(\hbar\omega_i)$  — экспериментально определенные значения поглощенных фотонов и коэффициента экспоненциального поглощения соответственно. На рис. 7 показано распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости аморфного твердого сплава селен-сера, рассчитанное по формуле (56) и значениям экспоненциального спектра поглощения.

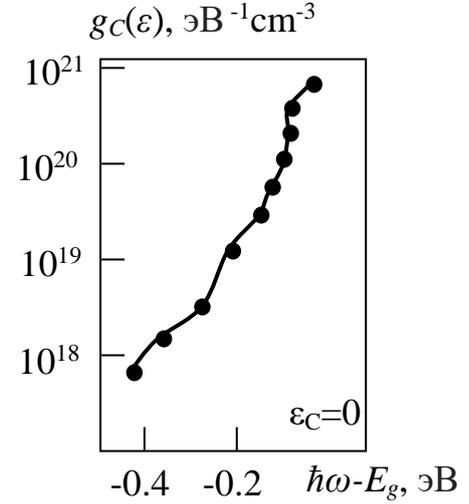


Рис. 7. Распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости, рассчитанное по экспериментально определенному спектру экспоненциального поглощения аморфной селен-сера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При степенной распределении плотности электронных состояний в разрешённых зонах генерировались спектры межзонного поглощения, соответствующие различным сочетаниям этих градаций.

Поглощение фотонов высоких энергий приводит к появлению спектров поглощения, характеризующихся электронными переходами с участием локализованных состояний в экспоненциальных хвостах разрешенной зоны.

Показано, что если правильно проанализировать эмпирическую модель, используемую для теоретического исследования спектров оптического поглощения аморфных полупроводников, и правильно подобрать интеграл в формуле Кубо-Гринвуда к типам оптических переходов электронов, результаты, рассчитанные по двум различным взгляды на эту формулу одинаковы.

С использованием формулы Кубо-Гринвуда для спектра межзонного поглощения получена новая формула, определяющая плотность распределения электронных состояний в зоне проводимости аморфных полупроводников.

Используя экспериментально определенные значения спектра межзонного поглощения, было определено распределение плотности электронных состояний в зоне проводимости.

Теоретически исследовано поле экспоненциального поглощения коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников.

Показано, что в области экспоненциального поглощения коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников происходят три типа электронно-оптических переходов.

Из формулы Кубо-Гринвуда, записанной для экспоненциального спектра поглощения, была выведена новая формула, определяющая распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости аморфных полупроводников.

Распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости этого материала рассчитано с использованием значений экспоненциального спектра поглощения, определенного из экспериментов аморфного твердого сплава селен-сера.

**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**

**SULTONOV BOBUR QOBULJON UGLI**

**OPTICAL ABSORPTION SPECTRA AND DENSITY OF  
ELECTRONIC STATES OF AMORPHOUS SEMICONDUCTORS**

**01.04.10 – Physics of semiconductors**

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

**Namangan – 2024**

**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](http://www.nammti.uz)) and on the Information and Educational portal "ZiyoNet" ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Scientific supervisor:**

**Ikramov Rustamjon Gulomjonovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official opponents:**

**Zainabiddinov Sirojiddin Zainabidinovich**

Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Rasulov Rustam Yavkachovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Leading organization:**

**Bukhara State University**

The defense of the dissertation will be held at 10<sup>00</sup> on “\_2\_” \_\_10\_\_ 2024 at the meeting of Scientific Council PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan institute of Engineering and Technology. (Address: 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](mailto: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. \_\_\_\_). Address: 160115, Namangan city, Kasansay Str.7, tel. (+99869) 228-76-68; Fax: (+99869) 228-76-75, e-mail: [niei\\_info@edu.uz](mailto:niei_info@edu.uz)

The abstract of the dissertation was sent on “\_” \_\_\_\_\_, 2024.  
(mailing protocol No. \_\_\_ on “\_” \_\_\_\_\_ 2024)

**U. Erkaboev**

Chairman of Scientific Council  
on award of Scientific Degrees,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**A. Abdukarimov**

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

## NTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of research work** is consist of experimental values of interband and exponential absorption spectra and, using the Kubo-Greenwood formula, determination of the distribution of the density of electronic states in the conduction band and the tail of this band of amorphous semiconductors.

**The object of research work** is interband absorption spectra determined in experiments for amorphous carbon (*a-C*), as well as interband and exponential absorption spectra determined in experiments for an amorphous solid mixture of selenium-sulfur (*a-Se<sub>0.5</sub>S<sub>0.5</sub>*).

**The scientific novelty of the research work** are as follows:

It has been shown that amorphous semiconductors should be determined by fitting the proportionality coefficient and energy mobility gap width in the analytical form of the interband absorption spectrum in accordance with the interband absorption spectra determined from experiment.

First, from the Kubo-Greenwood formula, written in accordance with the Davis-Mott approximation method for the interband absorption spectrum, an expression was obtained that determined the distribution of the density of electronic states in the conduction band of amorphous carbon from the values of the interband absorption spectrum obtained from experiment.

It was shown that amorphous semiconductors should be determined by comparing the values determined in experiments on the interband and exponential absorption spectra to determine the parameters that determine the proportionality coefficient in the analytical expression of the exponential absorption spectrum, the energy width of the mobility gap, and the curvature of the exponential tails of the valence band and band conductivity.

For the first time, the Kubo-Greenwood formula, written in accordance with the Davis-Mott approximation method for the exponential absorption spectrum, led to expressions that determine the distribution of the density of electronic states in the tail of the conduction band.

Using the values of the exponential absorption spectrum determined from the experiment and the Kubo-Greenwood formula written for the exponential absorption spectrum for an amorphous solid selenium-sulfur mixture, the distribution of the density of electronic states in the tail of the conduction band was determined for this.

**Implementation of the research results.** Based on the results obtained for the spectral characteristics of amorphous semiconductors and the distribution of the density of electronic states: New methods for calculating the distribution of the density of electronic states in the conduction band and the tail of this band in amorphous semiconductors were used in the production of amorphous semiconductor optoelectronic devices at JSC Foton. (Certificate of Uzeltehsanoat JSC dated February 22, 2024 No. 04-3/296). The samples were developed based on the results of scientific research conducted at Foton JSC; the optoelectric parameters of the samples correspond to existing regulatory technological processes; From the spectral characteristics of amorphous semiconductors and the distribution results of

the density of electronic states University Putra Malaysia In the scientific laboratory of the Center for Fundamental Research, it was found that it can be used in calculating the photovoltaic parameters of a new type of organic solar cells (DSSC). It was observed that the calculation books were consistent with the experimental results.

**Approbation of the results of the study.** This is the research results were presented and discussed at a total of 9, including 5 international and 4 national scientific-practical conferences.

**Publication of the research results.** A total of 18 scientific works on the subject of the dissertation, including 9 scientific articles in scientific publications recommended for publication of the main scientific results of doctoral dissertations of the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, including 3 published in foreign international journals included in the Scopus database.

**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 110 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, Mamaxanov A.A, Nuriddinova M.A, Jalolov R.M, Mo'minov H.A, **Sultonov B.Q.** Calculation of the interband absorption spectra of amorphous semiconductors using Kubo-Greenwood Formula // *Journal of Applied Science and Engineering*. 2021 Vol. 25, Iss.5, pp.767-772 (№3, **Scopus**. IF:1.3, Q2; <https://www.scopus.com/sourceid/21101034114>)
2. R.G. Ikramov, M.A. Nuriddinova, Kh.A. Muminov, B.Q. Sultonov, O.T. Holmirzaev. Kubo-greenwood formula for the exponential absorption region of amorphous semiconductors and distribution of the density of electronic states in the tail of the conduction band // *Journal of Applied Science and Engineering*. 2022 Vol.26, Iss.5, pp.1169-1173 (№3, **Scopus**. IF: 1.3, Q2; <https://www.scopus.com/sourceid/21101034114>).
3. Rustamjon G. Ikramov, Khurshidbek A. Muminov, Mashkhura A. Nuritdinova, **Bobur Q. Sultonov**, Oybek T. Kholmirezayev. Calculation of the density of the distribution of electronic states in the conduction band from the fundamental absorption spectra of amorphous semiconductors // *East European Journal of Physics*. 2023. Vol.4, pp.153-158 (№ 3, **Scopus**. IF: 0.8, Q4; <https://www.scopus.com/sourceid/21101018929>)
4. **Sultonov B.Q** Amorf yarimo'tkazgichlar nuqsonlarida yutilish koeffisienti va energetik holati // *Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi*. 2020. Vol.2. №11. 27-36 betlar (01.00.00. №14).
5. Б.Т.Абдулазизов, Р.Г. Икрамов, **Султонов Б.К**, Холмирзаев О.Т. Область экспоненциального поглощения аморфных полупроводников // *Узбекский физический журнал*. 2022. Vol. 24, №2, pp.96-99, (01.00.00 №5)
6. Ikramov R.G, Nuriddinova M.A, Muminov Kh.A, **Sultonov B.Q**, Kholmirezayev O.T, Khasankhanov H.A. Kubo-greenwood formula for the exponential absorption region of amorphous semiconductors and distribution of the density of electronic states in the tails of the conduction band // *Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi*. 2022. №.1, pp. 239-245, (01.00.00 №14)
7. Ikramov R.G., Jalalov R.M., Nuriddinova M.A., Mo'minov X.A. **Sultonov B.Q.** Amorf yarimo'tkazgichlarda zonalararo yutilish koeffitsientini aniqlovchi parametrlar // *Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi*. 2022. №.6, 73-78 betlar (01.00.00 №14)
8. Ikramov R.G', Nuriddinova M.A, Muminov X.A, **Sultonov B.Q**, Xolmirzaev O.T. Amorf yarimo'tkazgichlarning zonalararo yutilish spektridan o'tkazuvchanlik zonasidagi elektron holatlari zichligi taqsimotini hisoblash // *Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi*. 2022. №.1, 229-237 betlar. (01.00.00 №14)

**II bo'lim (II часть, II part)**

9. Ikramov R.G, Nuriddinova M.A, Mo'minov X.A, **Sultonov B.Q.** Amorf selen-oltingugurtning zonalararo yutilish spektrini aniqlovchi parametrlar //

- “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi mikro va nanoelektronikaning fundamental va amaliy muammolari”. 1-xalqaro anjuman. Toshkent 2021 yil 28-29 oktabr, 45-46 betlar.
10. X.A.Муминов, **Султонов Б.К**, Холмирзаев О.Т, Каландаров Ж.Т., Урайимжонов И.М. Формула Кубо-Гринвуда и распределения плотности электронных состояний на хвосте зоны проводимости аморфных полупроводников // “Yarimo‘tkazgichlar va polimerlar fizikasining dolzarb muammolari” mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani Toshkent, 2022 yil, 1-fevral 119-122 betlar.
  11. Ikramov R.G, Xolmirzayev O.T, Abdullayeva G.U, **Sultonov B.Q.** Amorf yarimo‘tkazgishlarning fundamental yutilish sohasi spektrlari // “Yosh olimlar va fizik talabalarning II Respublika ilmiy anjumani”(YOFTRIA-II). 2022 y. 21-22 may, 17-13 betlar.
  12. P.G.Икрамов, M.A.Нуриддинова, X.A.Муминов, C.П.Самсонов, M.B.Ломоносова, **Султонов Б.К.** Спектр дефектного поглощения и энергетическое положение дефектов аморфных полипроводников // «Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirishgaqaratilgan avtomatlashtirish va energetika muammolarni yechishda ilg‘or innovatsion texnologiyalar va ta‘limning o‘rni». Xalqaro ilmiy konferensiya. Namangan, 24-25 iyun 2021 y. 45-49 betlar.
  13. R.G.Ikramov, M.A.Nuriddinova, Kh.A.Muminov, **B.Q.Sultonov**, O.T.Holmirzaev. Amorf yarimo‘tkazgichlarning fundamental yutilish sohasi spektrlari // “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari”. I respublika ilmiy-amaliy anjumani. 2023 13-aprel 26-28 betlar
  14. R.G‘.Ikramov, M.A.Nuriddinova, **B.Q.Sultonov**, O.T.Xolmirzayev. Amorf yarimo‘tkazgichlarni eksponensial yutilish sohasi spektrlari // “Полупроводниковая опто-и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы”. Международная конференция. Андижан. 12-13 октябрь, 2023. стр.19-21.
  15. Икрамов P.Ф., Нуриддинова M.A., Муминов X.A., Холмирзаев O.T, **Султонов Б.К.** Парциальные спектры поглощения аморфных полупроводников // Международный форум “Физика-2022”. 4-5 октября 2022 года, Наманган, стр.100-101.
  16. X.A.Муминов, **Султонов Б.К**, Холмирзаев О.Т. Расчет распределение плотности электронных состояний в валентной зоне из спектра межзонного поглощения аморфных полупроводников // Experimental and theoretical research in modern science. International Scientific and Practical Conference. Kishinev, Moldova. 2021. 26-28 March. pp.383-390.
  17. P.Ф.Икрамов, X.A.Мўминов, M.A.Нуриддинова, **Б.К.Султонов.** Распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости аморфных полупроводников // “Яримўтказгичлар физикаси, микро ва наноэлектроника: фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси истикболлари”. Республика илмий анжумани. 2021 йил, 21-22 май. 31-34 бетлар.

Avtoreferat Namangan shahar “Rahimbobo Mashrab” nashriyotida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi (15.10.2024).

Bosishga ruxsat etildi 15.10.2024 y.

Bichimi 60X84 1/16, Times New Roman”

Garniturada raqamli bosma usulda bosildi.

Shartli bosma tabog‘i 3,5 Adadi: 100. Buyurtma: №     

---

“FAZILAT ORGTEX SERVIS”

Hususiyl korxonasi bosmoxonasida chop etildi.

Manzil: Namangan sh. Amir Temur ko‘chasi 97 uy.

Tel: (+998) 91-346-44-43, (+998) 99-608-69-44

