

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ

МЎМИНОВ ХУРШИДБЕК АДҲАМЖОН ЎҒЛИ

**ГИДРОГЕНИЗАЦИЯЛАНГАН АМОРФ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРНИ
СПЕКТРАЛ ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИ ВА ЭЛЕКТРОН ҲОЛАТЛАРИ
ЗИЧЛИГИНИНГ ТАҚСИМОТИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори(PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

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

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

Мўминов Хуршидбек Адхамжон ўғли Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларни спектрал характеристика- лари ва электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимооти.....	3
Муминов Хуршидбек Адхамжон угли Спектральные характеристики и распределения плотности электронных состояний в гидрогенизированных аморфных полупроводников.....	23
Muminov Khurshidbek Adhamjon ugli Spectral characteristics and distributions of the density of electronic states in hydrogennated amorphous semiconductors.....	43
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works.....	47

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ

МЎМИНОВ ХУРШИДБЕК АДҲАМЖОН ЎҒЛИ

**ГИДРОГЕНИЗАЦИЯЛАНГАН АМОРФ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРНИ
СПЕКТРАЛ ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИ ВА ЭЛЕКТРОН ҲОЛАТЛАРИ
ЗИЧЛИГИНИНГ ТАҚСИМОТИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

Физика-математика фанлари бўйича Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.2.PhD/FM 418 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Наманган муҳандислик технология институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (ispm.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Икрамов Рустамжон Гуломжонович
физика-математика фанлари доктори, доцент

Расмий оппонентлар:

Расулов Рустам Явқачович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Эгамбердиев Баҳром Эгамбердиевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Андижон давлат университети

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.08.2019FM/T.01.12 рақамли илмий кенгашнинг 2022 йил «04» 03 соат 12-00 даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (+99871) 248-79-94; факс: (+99871) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz), ЎЗМУ қошидаги ЯФМ ИТИ мажлислар зали).

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (3 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz,

Диссертация автореферати 2022 йил «22» 02 да тарқатилди.
(2022 йил «22» 02 даги 35 рақамли реестр баённомаси)



Ш.Б. Утамурадова
Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

Ж.Ж. Хамдамов
Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш котиби, PhD

Х.К. Арипов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш
қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор

Кириш (докторлик (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги. Ҳозирги пайтда аморф яримўтказгичлардан бир қатор оптоэлектроника қурилмалари ишлаб чиқарилади. Масалан, аморф гидрогенизацияланган кремний ($a\text{-Si:H}$) дан дисплейлар учун актив матрицалар, юпка плёнкали транзисторлар, фотодиодлар ва гетеро ўтишли қуёш элементлари ишлаб чиқарилмоқда. Юпка плёнкали аморф нитрид кремнийдан ($a\text{-SiN}$) гетеро ўтишли қуёш элементлари, фотодиодлар ва транзисторларни ишлаб чиқариш учун фойдаланилади. Маълумки, аморф яримўтказгичларни электр ва оптик хоссалари, улардаги панжаранинг параметрларига ва атомларнинг тури билан аниқланадиган электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимотига кучли боғлиқ бўлади. Аморф яримўтказгичларнинг фотоэлектрик хоссаларини аниқлаш учун Пуассон тенгламаси, узлуксизлик ва кўчиш тенгламалари системаларининг аналитик ечими асосида намунадаги электрон ҳолатлар зичлиги тақсимоти маълум бўлиши керак. Маълумки, Урбах энергиясининг оптик ютилиш коэффициенти спектрининг экспоненциал ютилиш соҳасидан аниқланади. Урбах энергиясини қиймати билан аморф яримўтказгичларни структурасидаги тартибсизликни баҳоланади. Бу тартибсизлик аморф яримўтказгичларни руҳсат этилган зоналарининг думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини аниқлайди. Урбах қоидасини фақат экспоненциал ютилиш спектри учун аниқланган тажриба натижалари орқали тушунтирилади. Шунинг учун, Урбах қоидасини тушунтирувчи формулани келтириб чиқариш ҳозирги пайтдаги муҳим масалалардан бири ҳисобланади. Чунки, аморф яримўтказгичларнинг электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимотларини аниқлаш учун жуда мурракаб ва қимматбаҳо қурилмалар талаб қилинади. Ҳозирги пайтда аморф яримўтказгичларни оптик ютилиш коэффициенти спектрини назарий усулда ҳисоблаш учун бир нечта электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини эмпирик моделларидан фойдаланилади. Аммо, аниқ бир аморф яримўтказгич намунаси учун ўтказилган тажриба натижаларидан фойдаланиб, бу намунадаги электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимотини аниқлаш аморф яримўтказгичлар физикасининг мурракаб масалаларидан бири ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда аморф яримўтказгичларнинг асосий оптик параметрларидан бири бўлган оптик ютилиш коэффициенти спектрини тадқиқ этишга алоҳида эътибор берилмоқда. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни жумладан, қуйидаги йўналишларда изланишлар олиб бориш муҳим вазифалардан ҳисобланади: аморф яримўтказгич намуналарида оптик ютилиш коэффициенти спектрининг зоналараро ютилиш соҳасидан зоналараро ютилиш коэффициенти билан руҳсат этилган зоналардаги локаллашмаган электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти орасидаги боғланишларни аниқлаш; экспоненциал ютилиш соҳасидан руҳсат этилган зоналарни экспоненциал думларидаги локаллашган электрон ҳолатлари зичлигини тақсимоти орасидаги муносабатларни аниқлаш долзарб

муаммолардан бири ҳисобланади. Шу билан бирга аморф яримўтказгичларнинг оптик хусусиятларини комплекс тадқиқ қилиш поли-ва микрокристалл ҳамда полимер яримўтказгичлар учун ҳам аҳамиятлидир.

Мамлакатимизда фундаментал тадқиқотларнинг долзарб илмий йўналишларига эътибор сезиларли даражада кучайтирилди. Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясига кўра илмий-тадқиқот ютуқларини рағбатлантириш ва жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратиш, шу жиҳатдан яримўтказгичли асбобларда кечаётган физик жараёнларни амалиётга татбиқ этиш натижасида аморф яримўтказгичларга хос бўлган барча электрон ҳолатлар иштирокидаги оптик ўтишлар билан ютилиш коэффициенти спектри орасидаги боғланишлар ҳақидаги тасавурларни чуқурлаштириш жуда муҳим ҳисобланади. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси¹да илмий тадқиқот ва инновацион фаолиятни рағбатлантириш масалалари, ишлаб чиқаришга энергия тежамкор технологияларни жорий қилиш, қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни кенгайтириш вазифалари белгилаб берилган. Бу борада арзон яримўтказгич материаллари асосидаги эффектив куёш элементларини ишлаб чиқиш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон «2017–2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида» ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисидаги»ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергия, энергия ресурсларини тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик; замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Урбах биринчи бўлиб АҚШ нинг Eastman Kodak Company илмий тадқиқот лабораториясида аморф яримўтказгичларнинг спектрал характеристикаларини ўрганди. АҚШ нинг Миссурий штатидаги физика институти олимлари Wei-Chung Chen ва J.Feldman томонидан аморф яримўтказгичларни электрон ҳолатлари зичлиги

¹Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ-4947-сон Фармони.

таксимотини янги эмпирик моделларидан зоналараро ва экспоненциал ютилиш спектрлари аналитик ифодалари аниқланган, АҚШнинг Corporate Research-Science илмий лабораториясида G.D.Codi томонидан тажрибалар орқали Урбах энергиясининг температурага боғланиши тадқиқ қилинган. Чехославакия Фанлар Академиясининг Қаттиқ жисмлар физикаси институти олими J.Таус томонидан тажрибалар асосида аморф германийнинг валент зонасидаги электрон ҳолатлари зичлигини тақсимоти тадқиқ қилинган. Россия Фанлар Академиясининг Бирлашган юқори температуралар институти олими А.А. Пронкин томондан аморф углородни зоналараро ютилиш коэффиценти спектрлари тажрибалар асосида ўрганилган. Германиянинг Материаллар институти илмий ходими J.A. Guerra ва Озарбайжон Фанлар Академиясига олими Б.А. Наджафов томонидан Дэвис-Мотт яқинлашиш усулига ёзилган Кубо-Гринвуд формуласини зоналараро ютилиш спектри учун ҳисоблаган.

Аммо, бу барча тадқиқотларда энергияси ҳаракатчанлик тирқишидан катта энергияли фотонлар ютилганда рухсат этилган зоналараро оптик ўтишлар билан бир вақтнинг ўзида, рухсат этилган зоналар ва уларни «дум»ларидаги электрон ҳолатлари орасидаги оптик ўтишлар ҳосил қиладиган парциал ютилиш спектрлари инобатга олинмаган. Шунингдек бу электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотлари аниқ кўринишга эга бўлмаганлиги учун спектрлардаги баъзи параметрларнинг қиймати қандай аниқланиши ҳақида аниқ маълумот берилмаган. Урбах қондаси бажариладиган локаллашган ҳолатлар иштирокидаги оптик ўтишларнинг спектрларини ҳисоблашда ҳаракатчанлик тирқиши кенглигидан кичик энергияли фотонлар учун локаллашган ҳолатлар орасидаги оптик ўтишлар билан бирга, локаллашган ва локаллашмаган ҳолатлараро ўтишларнинг мавжуд бўлиши ҳисобга олинмаган.

Недерландиянинг Делфт технология университетиинг илмий ходими W.Den Boer томонидан таклиф қилинган усулга кўра, аморф гидроганизацияланган кремнийнинг ўтказувчанлик зонаси думидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти аниқланган. РФА қошидаги А.Ф. Иоффе номли Физика–Техника институтининг катта илмий ходими О.А. Голикова томонидан видикон усулига кўра, аморф гидроганизацияланган кремнийнинг валент зонаси думидаги электрон ҳолатлари зичлигини тақсимоти аниқланган, аммо бу усулда аниқланган электрон ҳолатлари зичлигини тақсимоти жуда кичик энергетик интерваллар учун бажарилган. АҚШнинг Королина штатидаги Стенфорд университетининг илмий ходими T.M.Donovan томонидан ультрабинафша фотоэмиссион спектроскопия (УФЭС) усулида, шимолий Королина университетининг аналитик асбоблар маркази ходими Fred A. Stevie томонидан рентген фотоэмиссион спектроскопия (РФЭС) усулида аморф германийнинг рухсат этилган зоналаридаги электрон ҳолатлари зичлигини тақсимотлари тадқиқ қилинган. Аммо бу икки усулларда олинган натижалар бир-бири билан мос келмаган.

Ўзбекистонлик машҳур академиклар: Р.А.Муминов, М.К.Бахадирханов ва С.Зайнобиддинов илмий мактабларида ҳамда профессорлар: Қ.П.Абдурахманов, Э.З.Имомов, Р.Я. Расулов, Ш. Отажонов, М. Турсуновлар томонидан яримўтказгичларда оптик ютилиш коэффиценти спектрал характеристикалари борасида кўплаб илмий изланишлар амалга оширилган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Наманган муҳандислик технология институти ва Малайзиянинг “Malaya” университети ўртасидаги ҳамкорлик шартномасига асосан Малайзиянинг “Malaya” университети “Физика” факультети Ион маркази илмий-тадқиқот режасининг (No. FG029-17AFR) ва (FRGS 054-2014A) рақамли илмий тадқиқот лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади аморф яримўтказгичларнинг зоналараро ва экспоненциал ютилиш спектрларининг аналитик ифодаси ва тажрибадан аниқланган қийматларидан фойдаланиб, уларни валент зонаси ва рухсат этилган зоналарни думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоатларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

экспоненциал ютилиш спектрини аналитик ифодасидан Урбах энергияси ифодасини келтириб чиқариш ва Урбах энергияси температурага боғлиқлиги тадқиқ қилиш;

аморф яримўтказгичларнинг тажрибалардан аниқланган зоналараро ютилиш спектри қийматлари вааналитик ифодасидаги пропорционаллик коэффиценти ҳамда ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигини таққослаш, валент зонадаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоати ифодасини келтириб чиқариш;

аморф углеродни тажрибалардан аниқланган зоналараро ютилиш спектрининг қийматларидан фойдаланиб, бу материални валент зонасидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоатини аниқлаш;

аморф яримўтказгичларнинг экспоненциал ютилиш спектрининг ифодасидаги пропорционаллик коэффиценти, ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглиги, ҳамда валент ва ўтказувчанлик зоналари экспоненциал думлари эгрилигини тажрибалардан аниқланган ва назарий формуладан ҳисобланган қийматларини таққослаш, валент ва ўтказувчанлик зоналари думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоатини аниқловчи янги формулаларни келтириб чиқариш;

аморф селен-олтингургурт қаттиқ қоришмаси учун тажрибадан аниқланган экспоненциал ютилиш спектрининг қийматларидан фойдаланиб, валент ва ўтказувчанлик зоналарининг думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоатини аниқлаш.

Тадқиқот объекти сифатида $a\text{-CuIn}_3\text{Te}_5$ учун Урбах энергиясини тажрибалардан аниқланган температурага боғлашиши ва аморф углеродни ($a\text{-C}$) тажрибалардан аниқланган зоналараро ютилиш спектри ҳамда аморф

селен-олтингугурт қаттиқ қоришмасини ($a-Se_{0.5}S_{0.5}$) тажрибалардан аниқланган зоналараро ва экспоненциал ютилиш спектрлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети аморф яримўтказгичлар учун Урбах энергиясини температурага боғланишини аниқловчи аналитик ифодасини келтириб чиқариш, аморф яримўтказгичларда ёруғликни зоналараро ва экспоненциал ютилиш спектрларини тажрибалардан аниқланган қийматларидан валент зонадаги ва рухсат этилган зоналарни думларидаги электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимотиларини аниқланишдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Дэвис-Мотт яқинлашиш усулида Кубо-Гринвуд формуласидан фойдаланиш, тақрибий ҳисоблаш усули ва компьютер графикаси усули (Maple7).

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

тажриба натижаларини тушунтирувчи Урбах энергиясини температурага боғланишининг янги аналитик ифодаси келтириб чиқарилган;

илк бор аморф яримўтказгичларнинг зоналараро ютилиш коэффициенти спектри учун ёзилган Кубо-Гринвуд формуласидан валент зонадаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотининг аналитик ифодаси аниқланган;

аморф углероднинг ($a-C$) тажрибалардан аниқланган зоналараро ютилиш спектри қийматларидан, бу материални валент зонасидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти аниқланган;

илк бор аморф яримўтказгичларнинг экспоненциал ютилиш коэффициенти спектри учун ёзилган Кубо-Гринвуд формуласидан бу материални валент ва ўтказувчанлик зоналари думларидаги электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимотини аниқловчи ифодалар келтириб чиқарилган;

илк бор аморф селен-олтингугурт қаттиқ қоришмаси ($a-Se_{0.5}S_{0.5}$) учун тажрибадан аниқланган экспоненциал ютилиш спектрининг қийматларидан фойдаланиб, бу материални валент ва ўтказувчанлик зоналарининг думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Урбах энергияси учун янги ифода келтириб чиқарилган ва бу ифодани тажрибадан аниқланган температурага боғланиши тушунтирилган;

аморф яримўтказгичларни зоналараро ва экспоненциал ютилиш спектрларини Дэвис-Мотт яқинлашиш усулига кўра ёзилган Кубо-Гринвуд формуласидан аморф яримўтказгичларни валент зонаси ва рухсат этилган зоналарни думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотларини аналитик ифодалари келтириб чиқарилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги олиб борилган назарий ҳисоблашларни бажаришда халқаро тан олинган методлардан ва услубий жиҳатдан синалган математик усуллардан фойдаланилгани, назарий ҳисобланган натижалар адабиётларда келтирилган тажриба натижаларига мос келиши билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти аморф яримўтказгичларга хос бўлган

электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотлари ва зоналараро ҳамда экспоненциал ютилиш спектрлари орасидаги боғланишлар ҳақидаги илмий тасаввурларни кенгайтириш имконини беришдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти аморф яримўтказгичларга хос бўлган электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини ҳисоблаш учун таклиф қилинган янги усулда олинадиган натижалар оптик хоссалари яхшиланган аморф яримўтказгичлар асосида тайёрланадиган оптоэлектроника асбобларини яратиш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларни спектрал характеристикалари ва электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимоти учун олинган натижалар асосида:

аморф яримўтказгичлар ҳос бўлган Урбах энергиясини температурага боғланиши ва валент зона, рухсат этилган зоналарни думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотларини ҳисоблашни янги усулларида «Фотон» акциядорлик жамиятида аморф яримўтказгичли оптоэлектрон қурилмалар ишлаб чиқаришда фойдаланилди («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2021 йил 23 ноябрдаги 04-3/2484-сон маълумотномаси). «Фотон» акционерлик жамиятида олиб борилган илмий изланишларда кўрсатилган натижалар асосида намуналар ишлаб чиқилди, намуналарнинг оптоэлектрик параметрлари мавжуд норматив технологик жараёнларга мос келади;

гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларни спектрал характеристикалари ва электрон ҳолатлари зичлигини тақсимоти натижалари 2019-2021 йилларга мўлжалланган АҲР (F)-20/516-рақамли «The investigation of photoelectrical properties of the Photodiodes for 1-4 pm infrared region» лойиҳасида яримўтказгичли фотодиодларнинг паст инерцияли хоссаларини тадқиқ қилишда фойдаланилган (Улудағ университети (Туркия) 2021/20/516-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш Дэвис-Мотт яқинлашиш усулида Кубо-Гринвуд формуласидан зоналараро ва экспоненциал ютилиш спектрлари, ҳамда валент зона думидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишини бажаришда олинган натижалар 5 та халқаро ва 4 та республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 18 та илмий иш, шулардан 9 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 38 та расми ўз ичига олган ҳолда, 118 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг уствор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи ва муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган. Тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий ахамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг **“Аморф яримўтказгичларнинг электрон ҳолатлари зичлигини тақсимоти ва Урбах қондаси”** деб номланган биринчи бобда адабиётларда келтирилган натижалар таҳлил қилинган. Ушбу бобда аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти учун таклиф қилинган моделлар, аморф яримўтказгичларнинг оптик ютилиш коэффициенти спектрларини ҳисоблаш учун ишлатиладиган Кубо-Гринвуд формуласи ўрганилган. Аморф яримўтказгичларнинг рухсат этилган зоналари думидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти билан аниқланувчи Урбах энергияси учун адабиётларда келтирилган натижалар қараб чиқилган. Ҳозирги пайтда, аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини аниқлаш учун қўлланиладиган тажрибалар таҳлил қилинган. Булардан келиб чиққан ҳолда диссертация ишининг мақсад ва вазифалари белгиланган.

Диссертациянинг **“Урбах қондасининг аналитик ифодаси ва Урбах энергиясини температурага боғланиши”** деб номлаган иккинчи бобининг 2.1 параграфида аморф яримўтказгичларнинг электрон ҳолатлари зичлигини тақсимоти учун янги эмпирик модел таклиф қилинган (1-расм).

$$g_v(\varepsilon) = N(\varepsilon_v) \begin{cases} \left[\frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{E_g} \right]^{1/2} & \varepsilon \leq \varepsilon_v \\ \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_v)) & \varepsilon_v < \varepsilon < \varepsilon_0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$g_c(\varepsilon) = N(\varepsilon_c) \begin{cases} \left[\frac{\varepsilon - \varepsilon_v}{E_g} \right]^{1/2} & \varepsilon_c \leq \varepsilon \\ \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_c)) & \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_c \end{cases}, \quad (2)$$

бу ерда $N(\varepsilon_v)$ -ва $N(\varepsilon_c)$ -лар мос равишда валент ва ўтказувчанлик зоналаридаги электрон ҳолатлари зичлигининг эффектив қийматлари, ε_v -валент зонанинг юқори чегараси, ε_c -ўтказувчанли зонасининг қуйи чегараси, β_1 -ва β_2 -мос равишда валент зона думини ва ўтказувчанлик зонаси думини эгрилигини анқловчи параметрлар, E_g -ҳарактчанлик тикишини энергетик кенглиги, ε_0 – валент ва ўтказувчанлик зоналарининг экспоненциал думларни кесишиш нуқтасининг энергетик ўрни.

Бу эмпирик модел аморф яримўтказгичларнинг электрон ҳолатлари зичлигини тақсимооти учун таклиф қилинган назарий қарашлар ва тажрибадан олинган натижаларга мос келиши кўрсатилган.

2.2 параграфда Тауснинг рухсат этилган зоналардаги электрон ҳолатлари тақсимоотини аниқловчи эмпирик моделидан зоналараро ютилиш коэффицентини ҳисоблаш учун Дэвис - Мотт яқинлашиш усулига кўра ёзиладиган Кубо-Гринвуд формуласидаги аниқмас интегрални аниқ интеграл кўринишига келтиришни янги усули келтирилган ва зоналараро ютилиш спектрини ҳисоблаган. Худди шу усулда Редфилднинг эмпирик моделидан фойдаланиб экспоненциал ютилиш спектри ҳисобланган.

2.3 параграфда Урбах қоидаси учун янги формула келтириб чиқарилган ва бу формула тажрибалардан аниқланадиган Урбах қоидасини тушунтира олиши кўрсатилган.

Маълумки, Урбах қоидаси ҳам фақат электронларни валент зонани думидан ўтказувчанлик зонасининг думига оптик ўтишлари учун бажарилади. (1) ва (2) дан фойдаланиб, экспоненциал ютилиш спектри учун қуйидаги ифода олинган:

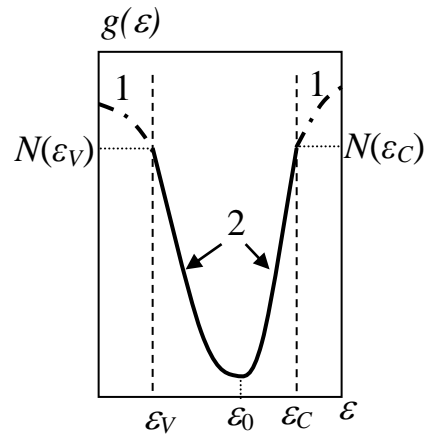
$$\alpha_2(\hbar\omega) = AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C) \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C + \hbar\omega)) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{B}{(\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g)) [1 - \exp((\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega - E_g))] \quad (3)$$

Бу ерда $B=AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)$.

Маълумки, Урбах қоидасини қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$\alpha(\hbar\omega) = \alpha_0 \exp\left(\frac{\hbar\omega - E_g}{E_U}\right) \quad (4)$$

Бу ерда α_0 , $\hbar\omega=E_g$ бўлганда ютилиш коэффицентини қийматига тенг бўлган пропорцианаллик коэффицентини, E_U – Урбах энергияси. (4) формуладан фойдаланиб E_U ни аниқлаш учун бу формулани:



1-расм. Аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимооти учун танланган янги модел: рухсат этилган зоналар (1) ва уларнинг экспоненциал думларидаги (2) электрон ҳолатлари.

$$\alpha(\hbar\omega) = \alpha_0 \exp\left(-\frac{E_g}{E_U}\right) \exp\left(\frac{\hbar\omega}{E_U}\right) = \text{const} \cdot \exp\left(\frac{\hbar\omega}{E_U}\right)$$

кўринишда ёзиб, ундан, ютилган фотонларни энергияси $\hbar\omega$ бўйича ҳосила оламиз:

$$\frac{d(\alpha(\hbar\omega))}{d(\hbar\omega)} = \frac{1}{E_U} \text{const} \cdot \exp\left(\frac{\hbar\omega}{E_U}\right),$$

бундан, Урбах энергияси учун қуйидаги:

$$E_U = \alpha(\hbar\omega) / \frac{d(\alpha(\hbar\omega))}{d(\hbar\omega)}, \quad (5)$$

ифода оламиз.

(3) ифодани (5) га қўйиб Урбах энергияси учун қуйидаги ифода олинган:

$$E_U = \frac{B}{(\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g))(1 - \exp((\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega - E_g))) \times \left[\frac{B}{(\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega)^2} ((\beta_1\hbar\omega - 1) \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g))) - (\beta_2\hbar\omega - 1) \exp(\beta_2(\hbar\omega - E_g)) \right]^{-1}. \quad (6)$$

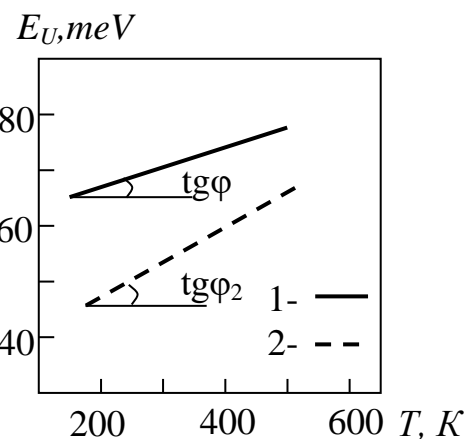
Кўриниб турибдики, бу формуладан Урбах энергиясини β_1 , β_2 ва E_g параметрларни қийматларига боғланишларини аниқлаш мумкин.

2.4 параграфда Урбах қонидаси учун келтириб чиқарилган янги формуладан Урбах энергияси аниқланган ва у Урбах энергиясини температурага боғланишини кўрсатувчи тажриба натижаларини тушунтира олиши кўрсатилган. Рухсат этилган зоналарнинг экспоненциал думлари эгрилигини аниқловчи параметрларни қиймати $T < 550$ К температура интервалида деярли ўзгармайди. Буни ҳисобга олсак, (6) ифодада фақат битта температурага боғлиқ бўлган параметр ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглиги (E_g) қолади.

Маълумки, бу катталикни температурага боғланиши

$$E_g(T) = E_g(0) - \gamma T \quad (7)$$

кўринишда ёзилади.



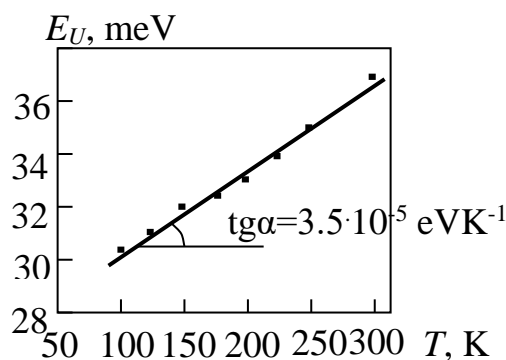
2-расм. Гидрогенизацияланган аморф кремний (*a-Si:H*) $E_g=1,8$ эВ учун (6) формуладан ҳисобланган Урбах энергиясининг температурага боғланиши.

Аморф яримўтказгич пардаларида Урбах энергиясини температурага боғланишини аниқловчи тажриба натижалари адабиётларда келтирилган. Улардан бу боғланишлар чизикли эканлигини ва уларни бурчак коэффиценти ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигини температура коэффицентига яқин бўлиши кўрсатилган. Аморф яримўтказгичлар учун ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигини температура коэффиценти $\gamma \approx (4 \cdot 10^{-5} - 10^{-4})$ эВ К⁻¹ эканлигини ҳисобга олиб ва (7) ни (6) ифодага қўйиб бажарилган ҳисоблашдан олинган натижалар 2 - расмда келтирилган. Ҳисоблашларни гидрогенизацияланган аморф кремний (*a-Si:H*) учун бажарилган ($E_g = 1,8$ эВ). Бу материалда ўтказувчанлик зонаси думидан валент зонанинг думи каттароқ бўлади. Шунинг учун ҳисоблашларни бажаришда валент ва ўтказувчанлик зоналарининг экспоненциал думларининг эгрилигини аниқловчи параметрлар учун $\beta_1 = 14$ эВ⁻¹ ва $\beta_2 = 25$ эВ⁻¹ (1-чизик), $\beta_1 = 19$ эВ⁻¹ ва $\beta_2 = 25$ эВ⁻¹ (2-чизик) катталиклар танланди. Расмдан кўринадик (6) формуладан ҳисобланган Урбах энергиясининг температурага боғланиши чизикли бўлиб температура ортиб борган сари ортиб борар экан. Биринчи чизикни бурчак коэффиценти $tg\varphi_1 = 4 \cdot 10^{-5}$ эВ·К⁻¹, иккинчи тўғри чизикни бурчак коэффиценти $tg\varphi_2 = 6,5 \cdot 10^{-5}$ эВ·К⁻¹ га тенг. Бу қийматлар аморф яримўтказгичларни ҳаракатчанлик тирқишининг температурага боғланиши бурчак коэффиценти (γ) қийматларига яқин эканлигини кўрсатади.

3 – расмда $CuIn_3Te_5$ аморф яримўтказгичини Урбах энергиясини температурага боғланишни тажрибадан аниқланган натижалари келтирилган. Бу боғланиш чизикли бўлиши ва бу чизикни бурчак коэффиценти $tg\alpha = 3,5 \cdot 10^{-5}$ эВК⁻¹ га тенг эканлиги кўриниб турибди.

Диссертациянинг “Аморф яримўтказгичларни зоналараро ютилиш спектри ва валент зонадаги электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимоти” деб номланган учинчи бобида аморф яримўтказгичларни тажрибалардан аниқланган зоналараро ютилиш спектрини қийматларидан фойдаланиб, уларни валент зонасидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини аниқлашни янги усули келтирилган. 3.1 праграфда аморф яримўтказгичлар электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти учун 2.1 параграфда келтирилган эмпирик моделдан фойдаланиб назарий ҳисобланган зоналараро ютилиш спектрлари таҳлил қилинган.

Маълумки, ютилган фотонларни энергияси ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигидан катта бўлганда умумий ютилиш коэффицентининг қийматини аниқлашда асосан рухсат этилган зоналараро оптик ўтишлар



3–расм. $CuIn_3Te_5$ аморф яримўтказгичи учун Урбах энергиясини температурага боғланишни тажрибадан аниқланган натижалари.

ўйнайди. Шунинг учун зоналараро ютилиш коэффициентини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (8)$$

бу ерда $g_v(\varepsilon)$ – ва $g_c(\varepsilon + \hbar\omega)$ – лар мос равишда валент ва ўтказувчанлик зоналаридаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотлари. (1) ва (2) даги рухсат этилган зоналардаги электрон ҳолатлари тақсимотларини (8) га қўйиб зоналараро ютилиш спектри учун қуйидаги ифода олинди:

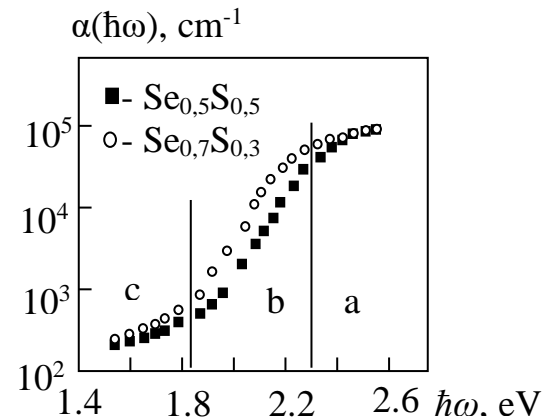
$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{B}{4E_g \hbar\omega} \left(2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega} - (E_g + \hbar\omega)^2 \operatorname{arctg} \left(\frac{E_g - \hbar\omega}{\sqrt{4E_g \hbar\omega}} \right) \right). \quad (9)$$

Бу ердаги B ва E_g ларни қийматлари бир хил аморф яримўтказгичлар учун ҳам, уларни тайёрлаш технологиясига боғлиқ ҳолда турлича бўлиши мумкин.

(9) формуладан кўринадикки, зоналараро ютилиш спектрини ҳисоблаш учун B ва E_g ларни қийматларини аниқлаш керак. Бу параметрларини топиш учун тажрибалардан аниқланган зоналараро ютилиш спектрдан фойдаланамиз.

4–расмда аморф селен-олтингугуртнинг $Se_{0,7}S_{0,3}$ ва $Se_{0,5}S_{0,5}$ бирикмаларининг оптик ютилиш коэффициентларини тажрибадан аниқланган спектрлари келтирилган. Маълумки, оптик ютилиш коэффициентини спектрларида экспоненциалликдан четланиш бошланадиган энергетик нуқтадан зоналараро ютилиш спектрлари бошланади. Буни ҳисобга олиб юқоридаги спектрлардан зоналараро ютилиш спектрларини ажратамиз (5- а ва b расмлар).

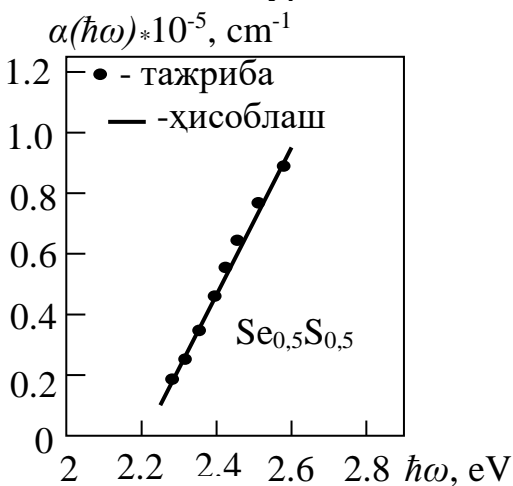
Бу тажриба натижаларига (9) формуладан олинган ҳисоблашларни мослаштирамиз. Бунинг учун (9) формуладаги B ва E_g ўзармасларни мослаштирувчи параметрлар сифатида қараймиз. Шу усулда бажарилган ҳисоблашлардан олинган натижалар ҳам 5 – а ва b расмларда келтирилган. Тажриба ва (9) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари аморф $Se_{0,7}S_{0,3}$ учун, $B=7,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ ва $E_g=2,2 \text{ эВ}$, аморф $Se_{0,5}S_{0,5}$ учун эса, $B=7,1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ ва $E_g=2,25 \text{ эВ}$ ларга тенг бўлганда бир-бирига мос келиши аниқланди. 3.2 параграфда аморф углород учун тажрибадан аниқланган ва аморф яримўтказгичларнинг зоналараро ютилиш



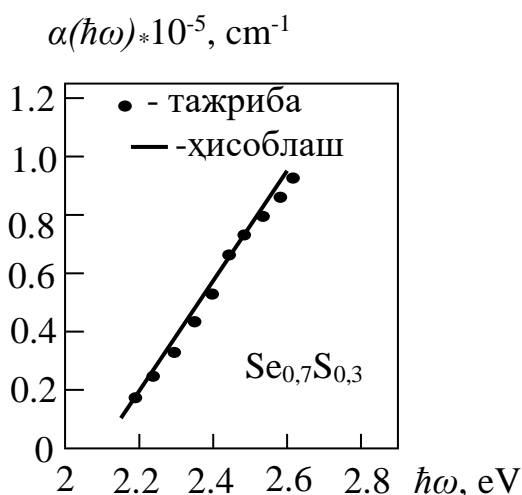
4-расм. Аморф селен-олтингугуртнинг $Se_{0,7}S_{0,3}$ ва $Se_{0,5}S_{0,5}$ бирикмалари учун тажрибадан аниқланган оптик ютилиш коэффициенти спектрлари. а- зоналараро ютилиш соҳаси, b – экспоненциал ютилиш соҳаси, с- нуқсонларда ютилиш соҳаси.

спектрларини аналитик ҳисобланган қийматларини мослаштириш орқали бу спектрдаги пропорционаллик коэффициентини ва ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигини аниқлаш мумкин эканлиги кўрсатилган.

Юқоридаги усулда аморф углоруд (*a-C*) учун тажрибадан аниқланган ва (9) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари 6-расмда келтирилган (туташ эгри чизик). *a-C* учун тажриба ва (9) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари, $B = 6,19 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ ва $E_g = 1,235 \text{ эВ}$ ларга тенг бўлганда бир-бирига мос келишини кўрсатди.

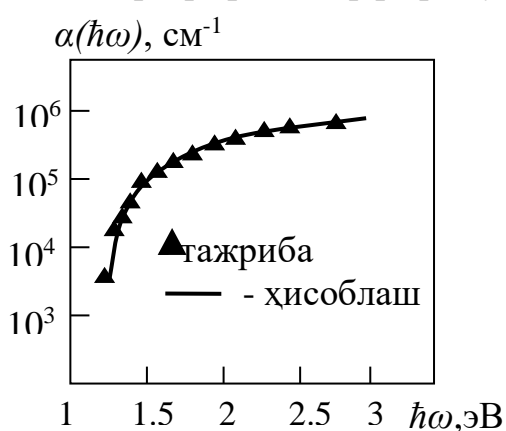


5-а расм. Аморф $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$ селен-олтингугурт бирикмасининг зоналараро ютилиш спектри учун тажрибадан ва (9) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари.



5-б расм. Аморф $\text{Se}_{0,7}\text{S}_{0,3}$ селен-олтингугурт бирикмасининг зоналараро ютилиш спектри учун тажрибадан ва (9) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари.

3.3 параграфда аморф яримўтказгичларнинг зоналараро ютилиш спектри



6-расм. Аморф углерод (*a-C*) ни тажрибада олинган ва (9) формуладан ҳисобланган (туташ эгри чизик) зоналараро ютилиш спектрлари.

учун Дэвис–Мотт яқинлашиш усулига кўра ёзилган Кубо–Гринвуд формуласидан фойдаланиб, уларни валент зонасидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини аниқлайдиган янги аналитик ифода келтириб чиқарилган. Маълумки, икки ўзгарувчилик функциядан олинган интегралдан битта ўзгарувчи бўйича олинадиган ҳосила қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$\frac{d}{dy} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \frac{\partial \beta(y)}{\partial y} f(\beta(y), y) - \frac{\partial \alpha(y)}{\partial y} f(\alpha(y), y) \quad (10)$$

Бу формулани (8) га қўллаб қуйидаги ифодани оламиз:

$$\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} A \left(\int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} \frac{g_V(\varepsilon) g_C(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon \right) = \frac{A}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g_V(\varepsilon) \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} g_C(\varepsilon + \hbar\omega) d\varepsilon - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{A}{\hbar\omega} g_V(\varepsilon_C - \hbar\omega) g_C(\varepsilon_C). \quad (11)$$

Бу формулага (1) ва (2) даги рухсат этилган зоналардаги электрон ҳолатлари тақсимотларини қўйиб қуйидаги боғланишни оламиз:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{A}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V + \hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \\ &+ \frac{A}{\hbar\omega} N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_C + \hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon_C - \hbar\omega - \varepsilon_V + \hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} = \\ &= \frac{B(\hbar\omega - E_g)}{2E_g \hbar\omega} \arctg \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_V)} N(\varepsilon_V) \left(\frac{\hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (12)$$

(12) ифодадаги охири хаддан фойдаланиб қуйидаги ифодани ёзамиз:

$$g_V(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left(\frac{\hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} = N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

(13) дан фойдаланиб, $\hbar\omega$ қандай энергетик ҳолатни аниқлашини ҳисоблаймиз.

$$\hbar\omega = \varepsilon_C - \varepsilon; \quad \varepsilon = \varepsilon_C - \hbar\omega = \varepsilon_C - \varepsilon_V + \varepsilon_V - \hbar\omega = \varepsilon_V + (E_g - \hbar\omega).$$

Бу ифодадаги $E_g - \hbar\omega < 0$ ва $\varepsilon \leq \varepsilon_V$ бўлганлиги учун ε валент зона ичидаги энергетик ҳолатни аниқлайди. Шунинг учун (13) тенгламани қуйидаги:

$$\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{B(\hbar\omega - E_g)}{2E_g \hbar\omega} \arctg \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_V)} g_V(\varepsilon)$$

кўринишда ёзамиз ва ундан:

$$g_V(\varepsilon) = \frac{\hbar\omega N(\varepsilon_V) \left(\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} + \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \frac{A(\hbar\omega - E_g)}{2\hbar\omega E_g} \arctg \frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right)}{B} \quad (14)$$

ифодани оламиз. Бу ифодадаги тажрибадан аниқланган зоналараро ютилиш коэффициентининг қийматлари ва уларга мос келувчи ютилган фотонларни энергияларини ўртачалаштириб (14) ни қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$\begin{aligned} g_{vi}(\varepsilon) &= \frac{1}{B} \left(N(\varepsilon_V) \left(\frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}}{2} \right) \left(\frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) - \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} + \frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) + \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}} - \right. \right. \\ &\left. \left. - \frac{B \left(E_g + \frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}}{2} \right)}{E_g (\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1})} \arctg \frac{E_g - \frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}}{2}}{2\sqrt{E_g \frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}}{2}}} \right) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Бу ерда $\alpha_i(\hbar\omega)$ -, $\hbar\omega_i$ -, $\alpha_{i+1}(\hbar\omega)$ -, ва $\hbar\omega_{i+1}$ - лар мос равишда тажрибадан аниқланган қўшни зоналараро ютилиш коэффициенти ва ютилган фотонларни энергияларини қийматлари.

(15) формуладан агар, тажрибадан аниқланган зоналараро ютилиш коэффициентни спектри ва уларга мос келувчи ютилган фотонларни энергияларини қийматлари маълум бўлса, бу натижалардан фойдаланиб валент зонадаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини аниқлаш мумкин эканли келиб чиқади.

6- расмда келтирилган тажрибадан аниқланган зоналараро ютилиш коэффициентини спектрал характеристикасидан фойдаланиб аниқланган валент зонадаги электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимоти 7 - расмда келтирилган.

Зоналараро ютилиш барча яримўтказгичларга хос бўлганлиги учун бу параграфда олинган натижалардан кристалл, поликристалл ва микрокристалл яримўтазгичлар учун ҳам фойдаланиш мумкин.

Диссертациянинг “Аморф яримўтказгичларни экспоненциал ютилиш спектри ва рухсат этилган зоналарнинг думларидаги электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимотлари” деб номланган тўртинчи бобда аморф яримўтказгичларнинг экспоненциал

ютилиш спектридан фойдаланиб рухсат этилган зоналарни думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотни аниқлашни янги усули келтирилган. Бобнинг 4.1 параграфидан экспоненциал ютилиш спектри учун Дэвис-Мотт яқинлашиш усулига кўра ёзилган Кубо-Гринвуд формуласидан фойдаланиб:

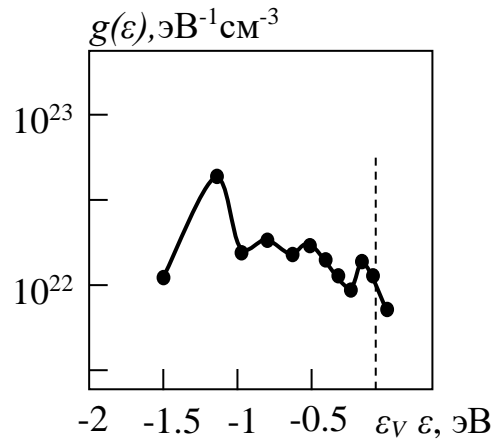
$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \quad (16)$$

Бу ерда $g_v(\varepsilon)$ – валент зона думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти, $g_c(\varepsilon + \hbar\omega)$ – эса, ўтказувчанлик зонаси думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти.

(16) формуладаги электрон ҳолатлари тақсимотлари ўрнига иккинчи бобнинг 2.1 параграфидан келтирилган аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари тақсимотини аниқловчи эмпирик моделидаги (1) ва (2) ифодаларни қўйиб қуйидаги натижа олинди:

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

(17) формуладан экспоненциал ютилиш спектрини ҳисоблаш учун ундаги B , E_g , β_1 , ва β_2 ўзгармасларни аниқлаш керак. Бунинг учун биз оптик ютилиш коэффициентни спектрал характеристикасини тажрибадан аниқланган натижаларидан фойдаланамиз. Юқоридаги ўзгармасларни аниқлаш учун тажрибадан аниқланган оптик ютилиш коэффициентни спектрал характеристикасини зоналараро, экспоненциал ва нуқсонларда



7-расм. Аморф углоруд (*a-C*) учун (15) формуладан ҳисобланган валент зонадаги электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимоти.

ютилиш коэффициентини аниқловчи соҳаларга ажратиш кераклигини айтиб ўтилди.

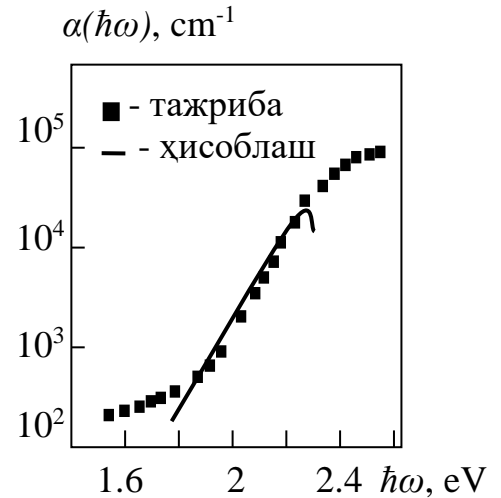
4.2 параграфда аморф селен-олтингугурт қаттиқ қоришмасини экспоненциал ютилиш спектрининг тажрибадан аниқланган ва аналитик ечимдан ҳисобланган қийматларини солиштириш орқали, бу спектрдаги пропорционаллик коэффициентини, ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглиги ҳамда, бу материални валент ва ўтказувчанлик зоналари думларини эгрилигини аниқловчи параметрлар аниқланди (8 - расм).

Бу формуладаги B ва E_g ларни аниқлаш усули 3.2 параграфда келтирилган. Бу усулга кўра, уларни мослаштирувчи параметрлар сифатида танлаб, параболик зоналар учун келтириб чиқарилган зоналараро ютилиш спектрдан олинган ҳисоблаш ва тажриба натижаларига мослаштирилади. Тажриба ва зоналараро ютилиш спектрининг аналитик ифодасини ҳисоблашлардан олинган натижаларни солиштириш туфайли бу параметрлар учун $B=7,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ ва $E_g=2,25 \text{ эВ}$ натижалар олинган. Бу қийматларни (17) формулага қўйиб, β_1 ва β_2 ларни аниқлаймиз. Бунинг учун уларни мослаштирувчи параметрлар сифатида қараб, оптик ютилиш коэффициентини экспоненциалютилиш соҳаси учунолинган тажриба натижаларини, экспоненциал ютилиш спектрдан олинган назарий ҳисоблаш натижаларига мослаштирамиз (8-расм, туташ эгри чизик). Бу натижалар $\beta_1=16,2 \text{ эВ}^{-1}$ ва $\beta_2=19,8 \text{ эВ}^{-1}$ га тенг бўлганда бир-бирига мос келди.

4.3 параграфда аморф яримўтказгичларни экспоненциал ютилиш спектри учун Дэвис-Мотт яқинлашиши усулига кўра ёзилган Кубо-Гринвуд формуласидан фойдаланиб, уларни валент ва ўтказувчанлик зоналарини думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотларини аниқловчи аниқловчи янги аналитик ифодалар келтириб чиқарилди.

Аморф яримўтказгичларнинг рухсат этилган зоналарининг думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотларини ҳисоблаш учун, яна 3.3 парагафда келтирилган, икки ўзгарувчи функция интегралидан битта ўзгарувчи бўйича олинган ҳосиланинг (10) формуласидан фойдаланамиз.

Бу формулага, яна биз танлаган моделдаги рухсат этилган зоналарнинг думидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотларини аниқловчи (1) ва (2) формулаларни қўйиб, қуйидаги ифодани оламиз:



8-расм. Аморф $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$ учун тажриба ва (17) формулани ҳисоблашдан олинган экспоненциалютилиш спектрлари.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{A}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_v}^{\varepsilon_c - \hbar\omega} N(\varepsilon_v) N(\varepsilon_c) \exp(\beta_1 \varepsilon_v) \exp(-\beta_1 \varepsilon) \beta_2 \exp(\beta_2 (\varepsilon - \varepsilon_c + \hbar\omega)) d\varepsilon - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \\ &- \frac{A}{\hbar\omega} N(\varepsilon_v) N(\varepsilon_c) \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)) = \\ &= \frac{B\beta_2}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1)} \exp(\beta_2 (\hbar\omega - E_g)) - \frac{B}{\hbar\omega} \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)) \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \end{aligned} \quad (18)$$

(18) ифодада қуйидаги белгилашларни киритамиз:

$$g_v(\varepsilon) = N(\varepsilon_v) \exp(-\beta_1 (\varepsilon - \varepsilon_v)) = N(\varepsilon_v) \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)) \quad (19)$$

$$g_c(\varepsilon) = N(\varepsilon_c) \exp(\beta_2 (\varepsilon - \varepsilon_c)) = N(\varepsilon_c) \exp(\beta_2 (\hbar\omega - E_g)) \quad (20)$$

(19) ва (20) дан фойдаланиб, (18) тенгламани қуйидаги:

$$\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{B\beta_2}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1)} \exp(\beta_2 (\hbar\omega - E_g)) - \frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_v)} g_v(\varepsilon) \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \quad (21)$$

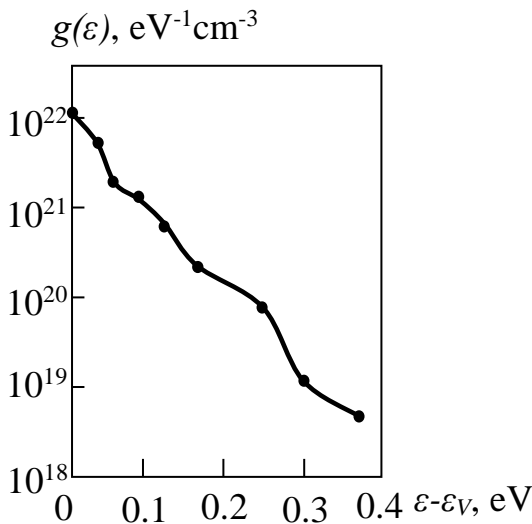
$$\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{B\beta_2}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1) N(\varepsilon_c)} g_c(\varepsilon) - \frac{B}{\hbar\omega} \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)) \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \quad (22)$$

кўринишларда ёзамиз. Булардан

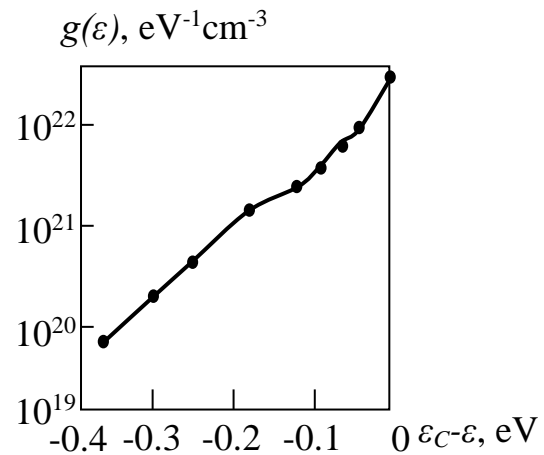
$$g_v(\varepsilon) = \frac{\hbar\omega N(\varepsilon_v) \left(\frac{B\beta_2}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1)} \exp(\beta_2 (\hbar\omega - E_g)) - \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \right)}{B \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right)} \quad (23)$$

$$g_c(\varepsilon) = \frac{\hbar\omega N(\varepsilon_c) (\beta_2 - \beta_1) \left(\frac{B}{\hbar\omega} \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)) \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right) + \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} + \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \right)}{A\beta_2} \quad (24)$$

ифодаларни оламиз.



9 - расм. Аморф $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$ учун валент зонанинг думидаги электрон ҳолатлари тақсимотини (27) формулани ҳисоблашдан олинган натижалар.



10 - расм. Аморф $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$ учун ўтказувчанлик зонанинг думидаги электрон ҳолатлари тақсимотини (28) формулани ҳисоблашдан олинган натижалар.

(19) дан фойдаланиб, $E_g - \hbar\omega$ қандай энергетик ҳолатни аниқлашини ҳисоблаймиз.

$$\varepsilon - \varepsilon_v = E_g - \hbar\omega; \quad \varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_v - \hbar\omega + \varepsilon_v = \varepsilon_c - \hbar\omega \quad (25)$$

Бу ифодадаги $E_g > \hbar\omega > \varepsilon_0 - \varepsilon_v$, $\varepsilon_v < 0$ $\varepsilon_c < 0$ бўлганлиги учун (19) формуладаги ε валент зона думидаги энергетик ҳолатни аниқлайди.

(20) формуладаги $\hbar\omega - E_g$ энергетик ҳолатни жойлашиш ўринини аниқлаймиз.

$$\varepsilon - \varepsilon_c = \hbar\omega - E_g; \quad \varepsilon = \hbar\omega - \varepsilon_c + \varepsilon_v + \varepsilon_c = \hbar\omega + \varepsilon_v \quad (26)$$

Бу ифодадаги $E_g > \hbar\omega > \varepsilon_0 - \varepsilon_v$ ва $\varepsilon_v < 0$ $\varepsilon_c < 0$ бўлганлиги учун (20) формуладаги ε ўтказувчанлик зонаси думидаги энергетик ҳолатларни аниқлайди. Булардан кўринадики, (23) формула валент зона думидаги, (24) формула эса, ўтказувчанлик зонаси думидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотларини аниқлайди.

4.4 ва 4.5 параграфларда аморф яримўтказгичларнинг валент ва ўтказувчанлик зоналарининг думларидаги электрон ҳолатлари зичлигини аниқловчи аналитик ифода ва аморф селен-олтингугурт қаттиқ қоришмаси учун тажрибадан аниқланган экспоненциал ютилиш спектрининг қийматларидан (10 –расм) фойдаланиб, бу материални валент ва ўтказувчанлик зоналарининг думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини аниқланган.

Бунинг учун (23) ифодани ютилиш коэффициенти ва ютилган фотонларни энергияларини ўртачалаштириб қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$g_{vi}(\varepsilon) = \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)N(\varepsilon_v) \left(\frac{2B\beta_2}{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)(\beta_2 - \beta_1)} \exp\left(\beta_2 \left(\frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2} - E_g \right)\right) \right)}{2A \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right)} - \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)N(\varepsilon_v) \left(\frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) - \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} + \frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) + \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i} \right)}{2B \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right)} \quad (27)$$

Бу ерда $\alpha_i(\hbar\omega)$ –ва $\hbar\omega_i$ - лар мос равишда тажрибадан аниқланган ютилиш коэффициенти ва ютилган фотонларни энергиялари. (27) га тажрибадан олинган экспоненциал ютилиш коэффициенти спектри ва ютилган фотонларни энергиялари қийматларини қўйиб, валент зонанинг думидаги электрон ҳолатлари зичликлари тақсимотларини ҳисоблаймиз. Ҳисоблашлардан олинган натижалар 9–расмда келтирилган.

Ўтказувчанлик зонасининг думидаги электрон ҳолатлари зичликлари тақсимотларини ҳисоблаш учун (24) тенгламани тажрибадан аниқланган экспоненциал ютилиш спектри ва ютилган фотонларни энергияларининг қийматларини ўртачалаштириб қуйидаги кўринишларда ёзамиз:

$$g_{c_i}(\varepsilon) = \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)N(\varepsilon_c)(\beta_2 - \beta_1)\left(\frac{2B}{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)} \exp\left(-\beta_1\left(Eg - \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2}\right)\right)\left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1\right)\right)}{2B\beta_2} \quad (28)$$

$$+ \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)N(\varepsilon_c)(\beta_2 - \beta_1)\left(\frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) - \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} + \frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) + \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i}\right)}{2B\beta_2}$$

(28) формулага тажрибадан олинган экспоненциал ютилиш коэффиценти спектри ва ютилган фотонларни энергиялари қийматларини қўйиб, ўтказувчанлик зонасининг думидаги электрон ҳолатлари зичликлари тақсимотларини ҳисоблаймиз. Ҳисоблашлардан олинган натижалар 10 – расмда келтирилган.

ХУЛОСА

Диссертация ишида Урбах энергиясини температурага боғланишини кўрсатувчи тажриба натижаларини тушунтирувчи аналитик ифодаси келтириб чиқарилган ва бу боғланиш чизиқли бўлиши кўрсатилган. Тажрибалардан аниқланган зоналараро ва экспоненциал ютилиш спектрларини қийматларидан фойдаланиб валент зонадаги ва рухсат этилган зоналарни думларидаги электрон ҳолатлари зичликлари тақсимотларини аниқлашни янги усуллари таклиф қилинган.

Тадқиқот ишининг асосий натижалари сифатида қуйидагиларни кўрсатиб ўтиш мумкин.

1. Аморф яримўтказгичларни оптик ютилиш коэффиценти спектрининг экспоненциал ютилиш соҳаси учун Урбах энергиясини температурага боғланишини тушунтирувчи янги ифода келтириб чиқарилди ва бу боғланиш чизиқли бўлиши кўрсатилди.

2. Зоналараро ютилиш спектри учун Дэвис-Мотт яқинлашиш усулига кўра ёзилган Кубо-Гринвуд формуласидан фойдаланиб назарий усулда валент зонадаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотини аниқлайдиган янги аналитик ифода келтириб чиқарилди.

3. Аморф углеродни (*a-C*) тажрибалардан аниқланган зоналараро ютилиш спектрларидан фойдаланиб, шу материалнинг валент зонасидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти аниқланди.

4. Экспоненциал ютилиш спектри учун Дэвис-Мотт яқинлашиш усулига кўра ёзилган Кубо-Гринвуд формуласидан фойдаланиб, валент ва ўтказувчанлик зоналари думларидаги электрон ҳолатлари зичлигини тақсимотини аниқловчи янги ифодалар келтириб чиқарилди.

5. Аморф селен-олтингурут (*a-Se_{0.5}S_{0.5}*) қаттиқ қоришмаси учун тажрибадан аниқланган экспоненциал ютилиш спектрининг қийматларидан фойдаланиб, шу материални валент ва ўтказувчанлик зоналарининг думларидаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотлари аниқланди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/Т.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
УЗБЕКИСТАНА**

**НАМАНГАНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**

МУМИНОВ ХУРШИДБЕК АДХАМЖОН УГЛИ

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В
ГИДРОГЕНИЗИРОВАННЫХ АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент–2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2019.2.PhD/FM418.

Диссертация выполнена в Наманганском инженерно технологическом институте.

Автореферат диссертации размещен на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) на веб-странице Научного совета (ispm.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: Икрамов Рустамжон Гуломжонович,
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: Расулов Рустам Явкачович
доктор физико-математических наук, профессор

Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич,
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Андижанский государственный университет

Защита диссертации состоится «04» 03 2022 года в 12-00 часов на заседании Научного совета DSc.03/30.08.2019FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета. (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № 35). Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59.

Автореферат диссертации разослан «22» 02 2022 года
(реестр протокола рассылки № 31 от «22» 02 2022 г.)



Ш.Б. Утамурадова,
председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней,
д.ф-м.н., профессор

Ж.Ж. Хамдамов,
учетный секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, PhD

Х.К. Арипов,
председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению ученых степеней,
д.ф-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время ряд оптоэлектронных устройств изготавливается из аморфных полупроводников. Например, аморфный гидрогенизированный кремний ($a\text{-Si:H}$) используется для производства активных матриц для дисплеев, тонкопленочных транзисторов, фотодиодов и гетероструктурных солнечных элементов. Тонкопленочный аморфный нитрид кремния ($a\text{-SiN}$) используется для изготовления гетероструктурных солнечных элементов, фотодиодов и транзисторов. Известно, что электрические и оптические свойства аморфных полупроводников сильно зависят от параметров структурной решетки определяемого типом атомов и распределение плотности электронных состояний. Для определения фотоэлектрических свойств аморфных полупроводников необходимо знать распределение плотности электронных состояний в образце, чтобы найти аналитическое решение уравнения Пуассона, системы уравнений неразрывности и смещения. Известно, что коэффициент оптического поглощения энергии Урбаха определяется из области спектра экспоненциального поглощения. Величина энергии Урбаха оценивает беспорядок в структурной сетке аморфных полупроводников. Этот беспорядок определяет плотность распределения электронных состояний в хвостах разрешенных зон аморфных полупроводников. Правило Урбаха объясняется только экспериментальными результатами, определенными для экспоненциального спектра поглощения. Поэтому в настоящее время вывод аналитического вида формулы, объясняющей правило Урбаха, является одним из важнейших вопросов. Это связано с тем, что для определения распределения плотности электронных состояний аморфных полупроводников требуются очень сложные и дорогие устройства. На данный момент для теоретического расчета спектра коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников используют несколько эмпирических моделей распределения плотности электронных состояний. Однако, используя экспериментальные результаты для одного конкретного образца, определение распределения плотности электронных состояний является одной из самых сложных проблем в физике аморфных полупроводников.

На сегодняшний день в мире особое внимание уделяется исследованию спектра коэффициента оптического поглощения, являющей одной из основных оптических параметров аморфных полупроводников. В этой связи одной из важных задач является проведение исследований, по следующим направлениям: определение связи между коэффициентом межзонного поглощения и распределением плотности не локализованных электронных состояний в разрешенных зонах; определить взаимосвязь между распределением плотности локализованных электронных состояний в хвостах разрешенных зон и спектра экспоненциального поглощения. В месте с этим комплексное изучение оптических свойств аморфных

полупроводников актуально и для поли- и микрокристаллических, а также полимерных полупроводников.

В нашей стране значительно усилилось внимание к актуальным научным направлениям фундаментальных исследований. Согласно Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан особое внимание следует уделить созданию эффективных механизмов продвижения и внедрения научных достижений, в связи с этим важно углубить понимание связи между оптическими переходами с участием всех электронных состояний, присущих аморфным полупроводникам, и спектром коэффициента поглощения в результате практического применения физических процессов в полупроводниковых приборах. В Стратегии² действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены вопросы стимулирования исследований и инноваций, внедрения энергосберегающих технологий в производство, расширения использования возобновляемых источников энергии. В данном направлении актуальна разработка эффективных солнечных элементов на основе недорогих полупроводниковых материалов.

Данное диссертационное исследование соответствует задачам, обозначенным в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-2772 «О приоритетах развития электротехнической отрасли в 2017-2021 гг.» от 13 февраля 2017 года, № УП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: III. «Энергия, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Урбах был первым, кто изучал спектральные характеристики аморфных полупроводников в исследовательской лаборатории компании Eastman Kodak. Сотрудники Физического института штата Миссури США Wei-Chung Chen и J. Feldman из эмпирической модели распределения плотности электронных состояний аморфных, получили аналитические виды спектра межзонного и экспоненциального поглощения. Научным сотрудником G. D. Codi в научной лаборатории CorporateResearch-Science США экспериментально исследована

²Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № Р-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан»

температурная корреляция энергии Урбаха. Распределение плотности электронных состояний в валентной зоне аморфного германия экспериментально исследовал ученый Я. Тауциз Института физики твердого тела Академии наук Чехословакии. Ученый из Объединенного института высоких температур Академии наук Российской Федерации А.А. Пронкин экспериментально исследовал спектра межзонного поглощения аморфного углерода. Научным сотрудником института материаловедения Германии J.A.Gerra и ученым Азербайджанской Академии наук Б.А. Наджафовым рассчитана формула Кубо-Гринвуда для спектра межзонного поглощения, написанная по методу приближения Дэвиса-Мотта.

Однако во всех этих исследованиях не учитывались спектры парциального поглощения, формируемые оптическими переходами между разрешенными зонами и электронными состояниями в их «хвостах», одновременно с разрешенными межзональными оптическими переходами при поглощении фотонов, с энергиями большей энергии щели подвижности. Также не приведены точные данные об определении значений некоторых параметров в спектрах в связи с отсутствием определенного вида распределения плотности этих электронных состояний. Правило Урбаха наряду с оптическими переходами между локализованными состояниями для фотонов, у которых энергия меньше от энергетической ширины щели подвижности не учитывает наличие локализованных и нелокализованных оптических переходов электронов при расчете спектров с участием локализованных состояний.

Согласно методу, предложенному исследователем из Делфтского технологического университета в Нидерландах W. Den Boer, определена распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости аморфного гидрогенизированного кремния. Старшим научным сотрудником Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН О.А. Голиковой методом видикона определены распределение плотности электронных состояний в хвосте валентной зоны аморфного гидрогенизированного кремния, однако распределение плотности электронных состояний, определенное этим методом, было выполнено для малых интервалов энергии. Научный сотрудник Стэнфордского университета Каролины, США Т.М. Donovan методом ультрафиолетовая фотоэмиссионная спектроскопия (УФЭС), а Fred A. Stevie из Центра аналитических приборов Университета Северной Каролины методом рентгеновская фотоэмиссионная спектроскопия (РФЭС) исследовали распределение плотности электронных состояний в разрешенных зонах аморфного германия. Однако результаты, полученные этими двумя методами, не соответствовали друг с другом.

В научных школах известных узбекских академиков: Р.А. Муминова, М.К.Бахадирханова и С.Зайнобиддинова и профессорами: К.П. Абдурахманова, Э.З. Имомова, Р.Я. Расулова, Ш. Отажонова и М. Турсунова

проведены многие исследования по спектральным характеристикам коэффициента оптического поглощения в полупроводниках.

Связь диссертационной работы с тематическими планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве между Наманганским инженерно-технологическим институтом и университета «MALAYA» (Малайзия) по плану исследований ионного центра (№ FG029-17AFR) и научных проектов (FRGS 054-2014A) физического факультета Университета Малайзии.

Целью исследования является определение распределения плотности электронных состояний валентной зоны и в хвостах разрешенных зон, используя аналитическое выражение и экспериментально определенные значения межзонного и экспоненциального спектров поглощения аморфных полупроводников.

Задачи исследования:

вывести выражения энергии Урбаха из аналитического выражения экспоненциального спектра поглощения и исследовать зависимости энергии Урбаха от температуры;

сравнение значений спектров межзонного поглощения аморфных полупроводников, определенных экспериментально и коэффициента пропорциональности в аналитическом выражении, а также энергетической ширины щели подвижности, получить выражения распределения плотности электронных состояний в валентной зоне;

используя значение спектра межзонного поглощения аморфного углерода, полученные экспериментально, определить плотности электронных состояний в валентной зоне этого материала;

сравнение значений коэффициента пропорциональности в выражении экспоненциального спектра поглощения аморфных полупроводников, энергетической ширины щели подвижности, а также кривизны экспоненциальных хвостов валентной зоны и зоны проводимости, определенных экспериментально и рассчитанных из теоретических формул, вывести новые формулы, определяющие плотность распределения электронных состояний в хвостах валентной зоны и зоны проводимости;

используя значения спектров экспоненциального поглощения, полученные экспериментально для аморфной твердой смеси селен-сера определить распределение плотности электронных состояний в хвостах валентной зоны и зоны проводимости.

Объектом исследования является экспериментально определенная температурная зависимость энергии Урбаха для $\alpha\text{-CuIn}_3\text{Te}_5$ и экспериментально определенный спектр межзонного поглощения аморфного углерода ($\alpha\text{-C}$), а также экспериментально определенный спектр оптического поглощения твердого раствора аморфного селен-сера ($\alpha\text{-Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$).

Предметом исследования получение аналитического выражения, определяющего температурную зависимость энергии Урбаха для аморфных

полупроводников, определение распределений плотности электронных состояний в валентной зоне и хвостах разрешенных зон из экспериментально определенных значений межзонных и экспоненциальных спектров поглощения света в аморфных полупроводниках.

Методы исследований. Использование формулы Кубо-Гринвуда по методу приближения Дэвиса-Мотта, численные методы вычисления и метод компьютерной графики (Maple7).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

получено новое аналитическое выражение температурной зависимости энергии Урбаха, объясняющее экспериментальные результаты;

впервые из формулы Кубо-Гринвуда, записанной для спектра коэффициента межзонного поглощения аморфных полупроводников, определено аналитическое выражение для распределения плотности электронных состояний в валентной зоне;

по значениям спектров межзонного поглощения аморфного углерода (*a-C*), определенным из экспериментов, было определено распределение плотности электронных состояний в валентной зоне этого материала;

впервые из формулы Кубо-Гринвуда, записанной для спектра коэффициента экспоненциального поглощения аморфных полупроводников получены выражения, определяющие распределение плотности электронных состояний в хвостах валентной зоны и зоны проводимости этого материала;

впервые используя значения экспоненциального спектра поглощения, определенные экспериментально для аморфной твердой смеси селен-сера (*a- $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$*), определено распределение плотности электронных состояний на хвостах валентной зоны и зоны проводимости этого материала.

Практические результаты исследования:

получено новое выражение для энергии Урбаха и объяснено, температурная зависимость данного выражения, определенное экспериментально;

получены аналитические выражения распределений плотности электронных состояний в валентной зоне и в хвостах разрешенных зон получены из формулы Кубо-Гринвуда, записанной методом приближения Дэвиса-Мотта для межзонного и экспоненциального спектра поглощения аморфных полупроводников.

Надежность результатов исследования основана на использовании международно-признанных методов и методологически апробированных математических методов при выполнении теоретических расчетов и соответствием, теоретических результатов с экспериментальными данными, представленными в литературе.

Достоверность результатов исследования обосновывается применением международно-признанных методов и методологически апробированных математических методов при выполнении теоретических расчетов, соответствием теоретических результатов с экспериментальными данными, представленными в литературе.

Научная и практическая значимость результатов исследований.

Научное значение результатов исследования заключается в расширении понимания распределений плотности электронных состояний, присущих аморфным полупроводникам и их взаимосвязь с межзонными, а также экспоненциальными спектрами поглощения;

Практическая значимость результатов исследования заключается в предложении нового метода расчета плотности распределения электронных состояний, характерный для аморфных полупроводников, позволяет создавать оптоэлектронные устройства на основе аморфных полупроводников с улучшенными оптическими свойствами.

Внедрение результатов исследований. На основании полученных результатов для спектральных характеристик гидрогенизированных аморфных полупроводников и распределения плотности электронных состояний:

новые методы определения температурной зависимости энергии Урбаха и расчеты распределений плотности электронных состояний в валентной зоне и в хвостах разрешенных зон аморфных полупроводников были использованы при производстве оптоэлектронных устройств на АО «Фотон» (Справка от акционерного общества «Узэлтехсаноат» № 04-3/2484 23 ноября 2021 года.). По результатам научных исследований, проведенных в ООО «Фотон», были разработаны образцы, оптоэлектрические параметры которых соответствуют действующим нормативным технологическим процессам;

использованы результаты спектральных характеристик и распределения плотности электронных состояний гидрогенизированных аморфных полупроводников при выполнении гранта АҲР (F)-20/516 «The investigation of photoelectrical properties of the Photodiodes for 1-4 μm infrared region» (Улудагский университет (Турция), номер справки 2021/20/516) в 2019-2021 гг. Использование научных результатов позволило определить межзональные и экспоненциальные спектры поглощения по формуле Кубо-Гринвуда, методом приближения Дэвиса-Мотта а также плотность распределения электронных состояний в хвосте валентной зоны.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 18 научных трудах, из них 9 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 118 страницах, включая 38 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении основана на актуальности и востребованность темы диссертационной работы, показаны согласованность с приоритетными направлениями исследование науки и технологий республики, приведены обзор зарубежных исследований и степени изученности проблемы по теме. Сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов приведены сведения о внедрении результатов исследования, информация о структуре диссертации и опубликование работы.

В первой главе диссертационной работы **«Распределение плотности электронных состояний аморфных полупроводников и закон Урбаха»** приведен обзор литературных данных по состоянию проблемы. В этой главе рассматриваются предложенные модели распределения плотности электронных состояний в аморфных полупроводниках, формула Кубо-Гринвуда, используемая для расчета коэффициентов оптического поглощения аморфных полупроводников.

Рассматриваются представленные в литературе результаты для энергии Урбаха, которая определяется распределением плотности электронных состояний в хвосте разрешенных зон аморфных полупроводников. Проанализированы эксперименты, которые используется для определения распределения плотности электронных состояний аморфных полупроводников. Исходя из этого, определяются цели и задачи диссертации.

В параграфе 2.1 второй главы диссертации, наименований **«Аналитическое выражение правила Урбаха и температурная зависимость энергии Урбаха»**, предлагается новая эмпирическая модель распределения плотности электронных состояний аморфных полупроводников (рис. 1).

$$g_v(\varepsilon) = N(\varepsilon_v) \begin{cases} \left[\frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{E_g} \right]^{1/2} & \varepsilon \leq \varepsilon_v \\ \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_v)) & \varepsilon_v < \varepsilon < \varepsilon_0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$g_c(\varepsilon) = N(\varepsilon_c) \begin{cases} \left[\frac{\varepsilon - \varepsilon_v}{E_g} \right]^{1/2} & \varepsilon_c \leq \varepsilon \\ \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_c)) & \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_c \end{cases}, \quad (2)$$

где $N(\varepsilon_v)$ и $N(\varepsilon_c)$ - эффективные значения электронных состояний в валентной зоне и зоне проводимости соответственно, ε_v -верхняя граница валентной зоны, ε_c -нижняя граница зоны проводимости, β_1 и β_2 -параметры, определяющие кривизну экспоненциальных хвостов валентной зоны и зоны проводимости, соответственно, E_g -энергетическая ширина щели подвижности, ε_0 -энергетическое положение точки пересечения

экспоненциальных хвостов разрешенных зоны. Было показано, что эта эмпирическая модель согласуется с теоретическими представлениями и экспериментальными результатами для распределения плотности электронных состояний аморфных полупроводников.

В параграфе 2.2 представлен новый метод преобразования неопределенного интеграла на определений интеграл в формуле Кубо-Гринвуда, записанной по методу приближения Дэвиса-Мотта, из эмпирической модели Тауса, электронных состояний в разрешенных зонах. Точно, таким образом, был рассчитан экспоненциальный спектр поглощения с использованием эмпирической модели Редфилда.

В разделе 2.3 представлена новая формула, объясняющая правило Урбаха определенная из эксперимента. Известно, что правило Урбаха выполняется только для оптического перехода электронов из хвоста валентной зоны в хвост зоны проводимости. Используя распределения плотности электронных состояний для хвостов разрешенных зон в (1) и (2), было получено следующее выражение для экспоненциального спектра поглощения:

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

$$= \frac{B}{(\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g)) [1 - \exp((\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega - E_g))]$$
(3)

где $B = AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)$.

Известно, что в общем виде правило Урбаха записывается так:

$$\alpha(\hbar\omega) = \alpha_0 \exp\left(\frac{\hbar\omega - E_g}{E_U}\right). \quad (4)$$

Здесь α_0 - коэффициент пропорциональности, равный значению коэффициента поглощения, когда $\hbar\omega = E_g$, E_U - энергия Урбаха. Чтобы определить E_U по формуле (4), его напишем следующим образом:

$$\alpha(\hbar\omega) = \alpha_0 \exp\left(-\frac{E_g}{E_U}\right) \exp\left(\frac{\hbar\omega}{E_U}\right) = const \cdot \exp\left(\frac{\hbar\omega}{E_U}\right)$$

из этой формулы получим производную по $\hbar\omega$:

$$\frac{d(\alpha(\hbar\omega))}{d(\hbar\omega)} = \frac{1}{E_U} const \cdot \exp\left(\frac{\hbar\omega}{E_U}\right)$$

и определяем энергию Урбаха:

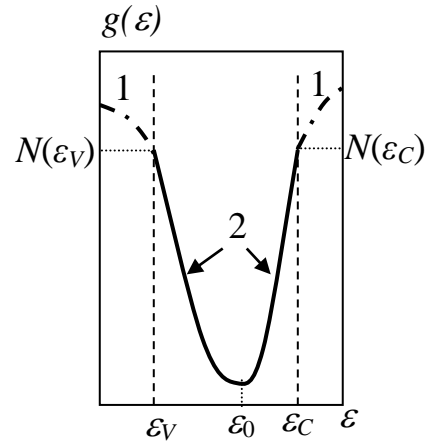


Рис. 1. Новая эмпирическая модель распределения плотности электронных состояний в аморфных полупроводниках: электронные состояния в разрешенных зонах (1) и их экспоненциальных хвостах (2).

$$E_U = \alpha(\hbar\omega) / \frac{d(\alpha(\hbar\omega))}{d(\hbar\omega)}. \quad (5)$$

Подставляя выражение (3) в (5), получаем следующее выражение для энергии Урбаха:

$$E_U = \frac{B}{(\beta_2 - \beta_1)\hbar\omega} \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g))(1 - \exp((\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega - E_g))) \times \left[\frac{B}{(\beta_2 - \beta_1)(\hbar\omega)^2} ((\beta_1\hbar\omega - 1) \exp(\beta_1(\hbar\omega - E_g))) - (\beta_2\hbar\omega - 1) \exp(\beta_2(\hbar\omega - E_g)) \right]^{-1}. \quad (6)$$

Как видно, из этой формулы можно определить, зависимость энергии Урбаха от значения параметров β_1 , β_2 и E_g .

В параграфе 2.4 определена температурная зависимость энергии Урбаха по формуле (6) и показано она может объяснить экспериментальные результаты. Как известно, значение параметров, определяющих кривизну экспоненциальных хвостов разрешенных зон, практически не меняется в интервале температур $T < 550$ К. Поэтому, в выражении (6) остается только один параметр, энергетическая ширина щели подвижности зависящий от температуры. Известно, что эта зависимость пишется следующим образом:

$$E_g(T) = E_g(0) - \gamma T. \quad (7)$$

В литературе приведены результаты экспериментов по определению температурной зависимости энергии Урбаха аморфных полупроводников. Они показывают, что эти зависимости являются линейными и их угловой коэффициент близок к температурному коэффициенту энергетической ширины щели подвижности. Результаты расчетов, выполненных поставляя (7) на (6) с учетом того, что температурный коэффициент энергетической ширины щели подвижности лежит в интервале $\gamma \approx (4 \cdot 10^{-5} - 10^{-4})$ эВ К⁻¹, показаны на рисунке 2.

Расчеты выполнены для гидрогенизированного аморфного кремния (*a-Si:H*) ($E_g(0) = 1,8$ эВ). В этом материале хвост валентной зоны является больше, чем хвост зоны проводимости. Следовательно, для параметров, определяющих кривизну экспоненциальных хвостов валентной зоны и зоны проводимости при проведении расчетов, $\beta_1 = 14$ эВ⁻¹ и $\beta_2 = 25$ эВ⁻¹ (линия 1), $\beta_1 = 19$ эВ⁻¹ и $\beta_2 = 25$ эВ⁻¹ (линия 2).

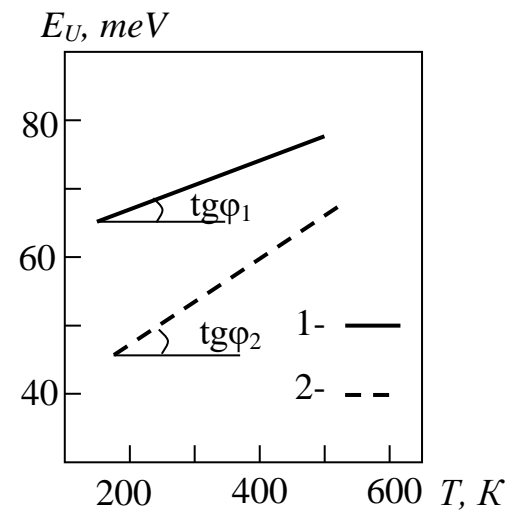


Рис. 2. Температурная зависимость энергии Урбаха гидрогенизированного аморфного кремния (*a-Si:H*), рассчитанная по формуле (6), когда $E_g(0) = 1,8$ эВ. 1- $\beta_1 = 14$ эВ⁻¹ и $\beta_2 = 25$ эВ⁻¹, 2- $\beta_1 = 19$ эВ⁻¹ и $\beta_2 = 25$ эВ⁻¹

Как видно из рисунка (6), температурная зависимость энергии Урбаха, рассчитанная по формуле (6), имеет линейный характер и увеличивается с ростом температуры. Угловым коэффициентом первой прямой $tg\varphi_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$, угловым коэффициентом второй прямой $tg\varphi_2 = 6.5 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$. Эти значения показывают, что угловым коэффициентом (γ) температурной зависимости энергии Урбаха близок к значениям температурного коэффициента ширины щели подвижности.

На рис. 3 представлены экспериментальные результаты температурной зависимости энергии Урбаха аморфного полупроводника CuIn_3Te_5 . Видно, что эта связь линейна и угловым коэффициентом этой линии равен $tg\alpha = 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$.

Третья глава диссертации, «Спектр межзонного поглощения аморфных полупроводников и распределение плотности электронных состояний в валентной зоне», представляет новый метод определения распределения плотности электронных состояний в валентной зоне с использованием экспериментально определенных значения спектра межзонного поглощения.

В параграфе 3.1 анализируются теоретически рассчитанные спектры межзонного поглощения с использованием эмпирической модели, представленной в разделе 2.1 для распределения плотности электронных состояний аморфных полупроводников.

Известно, что при определении значения общего коэффициента поглощения, когда энергия поглощенных фотонов больше энергетической ширины подвижной щели, в основном играют роль разрешенные межзонные оптические переходы.

Поэтому коэффициент межзонного поглощения можно записать в виде:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (8)$$

где $g_v(\varepsilon)$ - и $g_c(\varepsilon + \hbar\omega)$ - распределения плотности электронных состояний в валентной зоне и в зоне проводимости, соответственно. Подставляя распределения плотности электронных состояний в разрешенных зонах в (1) и (2) в (8), для спектра межзонного поглощения было получено следующее выражение:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{B}{4E_g \hbar\omega} \left(2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega} - (E_g + \hbar\omega)^2 \arctg \left(\frac{E_g - \hbar\omega}{\sqrt{4E_g \hbar\omega}} \right) \right). \quad (9)$$

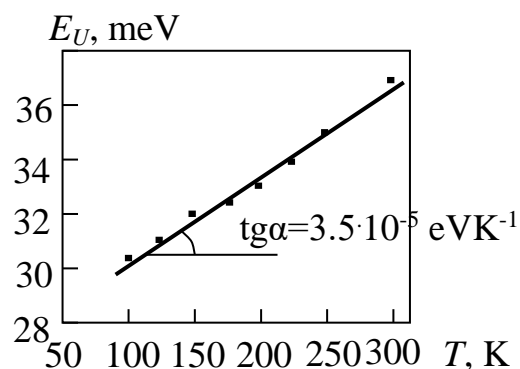


Рис. 3. Экспериментальные результаты температурной зависимости энергии Урбаха для аморфного CuIn_3Te_5 полупроводника.

Значения B и E_g здесь также могут быть разными для одних и тех же аморфных полупроводников в зависимости от технологии их получения.

Как видно из уравнения (9), необходимо определить значения B и E_g для расчета спектра межзонного поглощения. Для нахождения этих параметров воспользуемся спектром межзонного поглощения, определенным экспериментально.

На рис. 4 представлены экспериментально определенные спектры коэффициента оптического поглощения аморфных селен-серных твердых растворов $Se_{0,7}S_{0,3}$ и $Se_{0,5}S_{0,5}$. Известно, что в спектрах коэффициента оптического поглощения спектры межзонного поглощения начинаются от энергетической точки, в которой начинается отклонение от экспоненциальности. Имея это в виду, мы отделяем спектры межзонного поглощения от приведенных выше спектров (рисунки 5-а и б).

Подгоняем расчеты, полученные по формуле (9), к результатам этого эксперимента. Для этого мы рассматриваем переменные B и E_g в формуле (9) как подгоночные параметры. Результаты расчетов, выполненных этим методом, также показаны на рисунках 5 а и б (сплошные линии).

Результаты эксперимента и расчеты, полученные по формуле (9), для $Se_{0,7}S_{0,3}$, $B = 7,5 * 10^5 \text{ см}^{-1}$ и $E_g = 2,2 \text{ эВ}$, а для $Se_{0,5}S_{0,5}$, $B = 7,1 * 10^5 \text{ см}^{-1}$ и $E_g = 2,25 \text{ эВ}$ соответствовали друг с другом.

В параграфе 3.2 спектр межзонного поглощения аморфного углерода (а-С) определенные из эксперимента и рассчитанные вышеуказанным методом по формуле (9) (кривая линия) представлены на рисунке 6. Результаты расчета, полученные по формуле (9) и эксперимента показали, что при $B = 6,19 * 10^5 \text{ см}^{-1}$ и $E_g = 1,235 \text{ эВ}$ соответствует друг с другом.

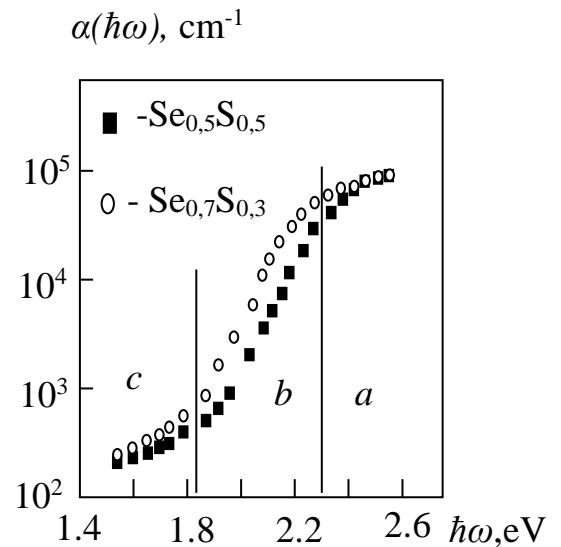


Рис.4. Экспериментальные спектры коэффициентов оптического поглощения аморфных селен-серных соединений $Se_{0,7}S_{0,3}$ и $Se_{0,5}S_{0,5}$. а–область межзонного поглощения, б– область экспоненциального поглощения, с –область дефектного поглощения.

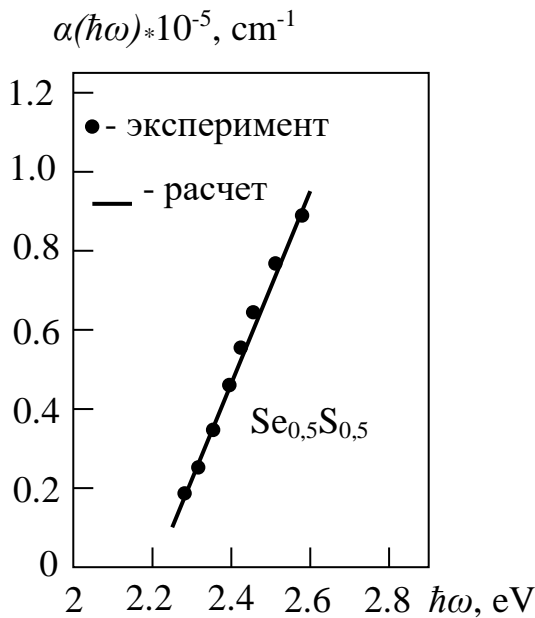


Рис. 5 –а. Спектры межзонного поглощения, полученные из эксперимента и из расчета формулы (9) для аморфного селен-серного соединения $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$.

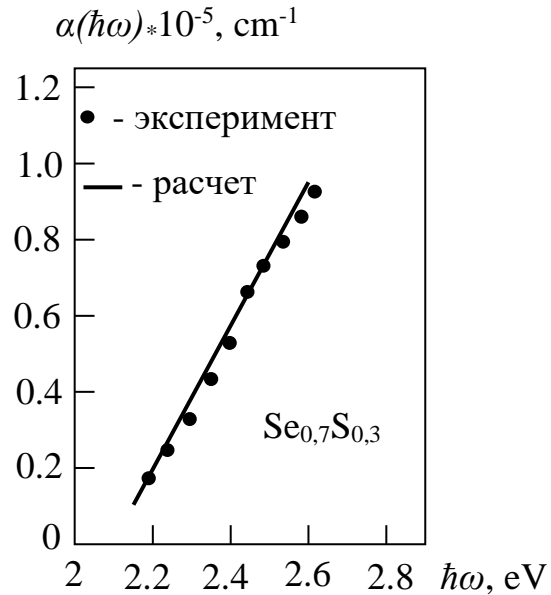


Рис. 5 – б. Спектры межзонного поглощения, полученные из эксперимента и из расчета формулы (9) для аморфного селен-серного соединения $\text{Se}_{0,7}\text{S}_{0,3}$.

В параграфе 3.3 используя формулы Кубо-Гринвуда написанное методом приближения Дэвиса-Мотта для спектров межзонного поглощения, получено новое аналитическое выражение для определения распределения плотности электронных состояний в валентной зоне аморфных полупроводников.

Известно, что произведение интеграла функции двух переменных от одной переменной записывается следующим образом:

$$\frac{d}{dy} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \frac{\partial \beta(y)}{\partial y} f(\beta(y), y) - \frac{\partial \alpha(y)}{\partial y} f(\alpha(y), y) \quad (10)$$

Применяя эту формулу на (8), получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} A \left(\int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} \frac{g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon \right) = \\ &= \frac{A}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} g_v(\varepsilon) \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} g_c(\varepsilon + \hbar\omega) d\varepsilon - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{A}{\hbar\omega} g_v(\varepsilon_c - \hbar\omega) g_v(\varepsilon_c). \end{aligned} \quad (11)$$

Подставив в эту формулу распределения плотности электронных состояний в разрешенных зонах в (1) и (2), мы получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{A}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} N(\varepsilon_v) \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{E_g}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} N(\varepsilon_c) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_v + \hbar\omega}{E_g}\right)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \\
&+ \frac{A}{\hbar\omega} N(\varepsilon_v) \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_c + \hbar\omega}{E_g}\right)^{\frac{1}{2}} N(\varepsilon_c) \left(\frac{\varepsilon - \hbar\omega - \varepsilon_v + \hbar\omega}{E_g}\right)^{\frac{1}{2}} = \\
&= \frac{B(\hbar\omega - E_g)}{2E_g \hbar\omega} \operatorname{arctg} \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}}\right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_v)} N(\varepsilon_v) \left(\frac{\hbar\omega}{E_g}\right)^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{12}$$

Используя последний член выражения (12), запишем следующее:

$$g_v(\varepsilon) = N(\varepsilon_v) \left(\frac{\hbar\omega}{E_g}\right)^{\frac{1}{2}} = N(\varepsilon_v) \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{E_g}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{13}$$

Используя (13), вычисляем, какое энергетическое состояние соответствует на $\hbar\omega$.

$$\hbar\omega = \varepsilon_c - \varepsilon; \quad \varepsilon = \varepsilon_c - \hbar\omega = \varepsilon_c - \varepsilon_v + \varepsilon_v - \hbar\omega = \varepsilon_v + (E_g - \hbar\omega).$$

Поскольку в этом выражении $E_g - \hbar\omega < 0$ и $\varepsilon < \varepsilon_v$, ε определяет энергетическое состояние в валентной зоне. Следовательно, уравнение (13) напомним следующим образом:

$$\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{B(\hbar\omega - E_g)}{2E_g \hbar\omega} \operatorname{arctg} \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}}\right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_v)} g_v(\varepsilon)$$

с него получаем следующее выражение:

$$g_v(\varepsilon) = \frac{\hbar\omega N(\varepsilon_v) \left(\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} + \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \frac{A}{2} \frac{(\hbar\omega - E_g)}{\hbar\omega E_g} \operatorname{arctg} \frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}}\right)}{B}. \tag{14}$$

Усредняя экспериментально определенные значения коэффициента межзонного поглощения и энергии поглощенных фотонов выражению (14) напомним следующим образом:

$$\begin{aligned}
g_{vi}(\varepsilon) &= \frac{1}{B} \left(N(\varepsilon_v) \left(\frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}}{2}\right) \left(\frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) - \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} + \frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) + \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}} - \right. \right. \\
&\left. \left. - \frac{B(E_g + \frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}}{2})}{E_g(\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1})} \operatorname{arctg} \left(\frac{E_g - \frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}}{2}}{2\sqrt{E_g \frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{i+1}}{2}}}\right) \right) \right). \tag{15}
\end{aligned}$$

Здесь $\alpha_i(\hbar\omega)$ -, $\hbar\omega_i$ -, $\alpha_i(\hbar\omega)_{i+1}$ - и $\hbar\omega_{i+1}$ - значения коэффициента поглощения и энергии поглощенных фотонов определенные экспериментально, соответственно.

Из формулы (15) следует, что если экспериментально определены спектр межзонного поглощения, то эти результаты можно использовать для определения распределения плотности электронных состояний в валентной зоне.

На рисунке 7 показано распределение электронных состояний в валентной зоне аморфного углерода, определенное с использованием спектра межзонного поглощения, определенного из эксперимента, показанного на рисунке 6.

Поскольку межзонное поглощение характерно для всех полупроводников, результаты, полученные в этом параграфе, также могут быть применены к кристаллическим, поликристаллическим и микрокристаллическим полупроводникам.

Четвертая глава диссертации, озаглавленная «Экспоненциальный спектр поглощения аморфных полупроводников и распределения плотности электронных состояний в хвостах разрешенных зон», представляет новый метод определения распределения плотности электронных состояний в хвостах разрешенных зон аморфных полупроводников с использованием экспоненциальный спектр поглощения.

Для экспоненциального спектра поглощения в параграфе 4.1 главы с использованием формулы Кубо-Гринвуда, записанной в соответствии с методом приближения Дэвиса-Мотта:

$$\alpha(\hbar\omega) = A \int_{\varepsilon_v}^{\varepsilon_c - \hbar\omega} g_v(\varepsilon) g_c(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \quad (16)$$

Здесь $g_v(\varepsilon)$ - распределение плотности электронных состояний в хвосте валентной зоны, а $g_c(\varepsilon + \hbar\omega)$ - распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости.

Из формулы (16) путем подстановки выражений распределения электронных состояний в хвостах разрешенных зон (1) и (2) в эмпирической модели аморфных полупроводников был получен следующий результат:

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

Для расчета спектра экспоненциального поглощения по формуле (17) необходимо определить в нем переменные B , E_g , β_1 , β_2 . Для этого воспользуемся экспериментально определенными результатами спектральной характеристики коэффициента оптического поглощения. Для определения выше указанных переменных воспользуемся экспериментально определенными, спектральными характеристиками коэффициента оптического поглощения. Этого спектра разделим на межзонную, экспоненциальную и дефектную области.

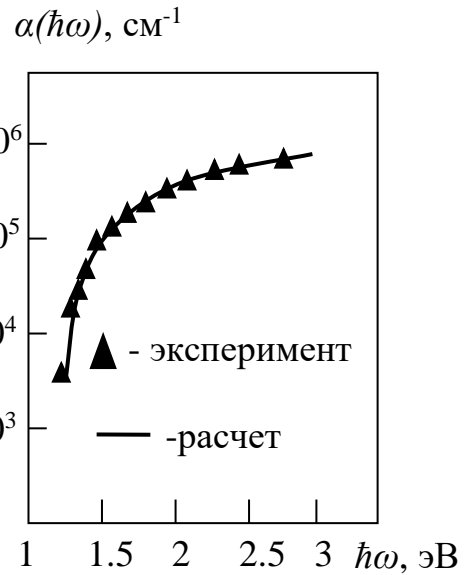


Рис. 6. Спектры межзонного поглощения аморфного углерода (а-С), полученные из эксперимента и рассчитанные по формуле (9) (непрерывная кривая).

В параграфе 4.2, сравнивая значения определенные экспериментально и рассчитанные из аналитического решения спектра экспоненциального поглощения аморфного твердого раствора селен-сера, определены коэффициент пропорциональности, энергетической ширины щели подвижности и параметров определяющие кривизна хвостов валентной зоны и зоны проводимости.

Метод определения B и E_g в этой формуле приведен в параграфе 3.2. Согласно этому методу они выбираются в качестве подгоночных параметров и адаптируются к расчетным и экспериментальным результатам, полученным для спектра межзонного поглощения.

В результате эксперимента и сравнения результатов, полученных при расчетах аналитического выражения спектра межзонного поглощения, для этих параметров были получены результаты $B = 7,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ и $E_g = 2,25 \text{ эВ}$. Подставляя эти значения в формулу (17), определяем β_1 и β_2 . Для этого, рассматривая их как подгоночные параметры, адаптируем расчетные данные полученные из формулы (17) на экспериментальным результатам, полученным для спектра экспоненциального поглощения (рис. 8, сплошная кривая). Эти результаты соответствовали, когда $\beta_1 = 16,2 \text{ эВ}^{-1}$ и $\beta_2 = 19,8 \text{ эВ}^{-1}$.

В параграфе 4.3 используя формулу Кубо-Гринвуда, записанную методом приближения Дэвиса-Мотта, для аналитического выражения спектра экспоненциального поглощения аморфных полупроводников, получена новая формула для распределения плотности электронных состояний в хвостах разрешенных зон.

Для расчета распределений плотности электронных состояний в хвостах разрешенных зон аморфных полупроводников мы снова используем формулу (10), приведенной в параграфе 3.3. И получаем следующее выражение, подставляя формулы

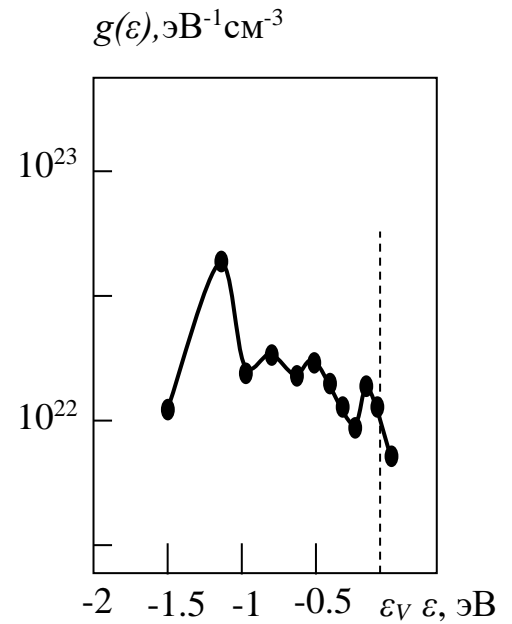


Рис. 7. Распределение электронных состояний в валентной зоне аморфного углерода (*a-C*) рассчитанные по формуле (15).

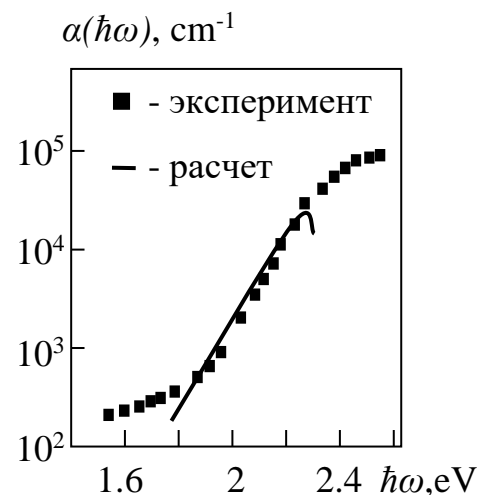


Рис. 8. Экспоненциальные спектры поглощения, полученные из эксперимента и расчета формулы (17) для аморфного $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$.

(1) и (2), которые определяют распределения плотности электронных состояний в хвостах разрешенных зон:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{A}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_v}^{\varepsilon_c - \hbar\omega} N(\varepsilon_v) N(\varepsilon_c) \exp(\beta_1 \varepsilon_v) \exp(-\beta_1 \varepsilon) \beta_2 \exp(\beta_2 (\varepsilon - \varepsilon_c + \hbar\omega)) d\varepsilon - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \\ &- \frac{A}{\hbar\omega} N(\varepsilon_v) N(\varepsilon_c) \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)) = \quad . \quad (18) \\ &= \frac{B\beta_2}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1)} \exp(\beta_2 (\hbar\omega - E_g)) - \frac{B}{\hbar\omega} \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)) \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \end{aligned}$$

В выражении (18) используем следующие определения:

$$g_v(\varepsilon) = N(\varepsilon_v) \exp(-\beta_1 (\varepsilon - \varepsilon_v)) = N(\varepsilon_v) \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)), \quad (19)$$

$$g_c(\varepsilon) = N(\varepsilon_c) \exp(\beta_2 (\varepsilon - \varepsilon_c)) = N(\varepsilon_c) \exp(\beta_2 (\hbar\omega - E_g)). \quad (20)$$

Используя (19) и (20), уравнение (18) напомним следующим образом:

$$\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{B\beta_2}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1)} \exp(\beta_2 (\hbar\omega - E_g)) - \frac{B}{\hbar\omega N(\varepsilon_v)} g_v(\varepsilon) \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega}, \quad (21)$$

$$\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} = \frac{B\beta_2}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1) N(\varepsilon_c)} g_c(\varepsilon) - \frac{B}{\hbar\omega} \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)) \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega}. \quad (22)$$

Из этих мы получаем следующие выражения:

$$g_v(\varepsilon) = \frac{\hbar\omega N(\varepsilon_v) \left(\frac{B\beta_2}{\hbar\omega(\beta_2 - \beta_1)} \exp(\beta_2 (\hbar\omega - E_g)) - \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \right)}{B \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right)}, \quad (23)$$

$$g_c(\varepsilon) = \frac{\hbar\omega N(\varepsilon_c) (\beta_2 - \beta_1) \left(\frac{B}{\hbar\omega} \exp(-\beta_1 (E_g - \hbar\omega)) \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right) + \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} + \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} \right)}{A\beta_2}. \quad (24)$$

Используя (19), вычисляем, какое энергетическое состояние определяет $E_g - \hbar\omega$.

$$\varepsilon - \varepsilon_v = E_g - \hbar\omega: \quad \varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_v - \hbar\omega + \varepsilon_v = \varepsilon_c - \hbar\omega \quad (25)$$

Поскольку в формуле (19) $\varepsilon_v < 0$, $\varepsilon_c < 0$ и $\hbar\omega > 0$ ε определяет энергетическое состояние в хвосте валентной зоны.

Определим положение энергетического состояния $\hbar\omega - E_g$ в формуле (20).

$$\varepsilon - \varepsilon_c = \hbar\omega - E_g; \quad \varepsilon = \hbar\omega - \varepsilon_c + \varepsilon_v + \varepsilon_c = \hbar\omega + \varepsilon_v \quad (26)$$

Поскольку в этом выражении $\varepsilon_v < 0$ и $\hbar\omega > 0$ ε в формуле (20) определяет энергетические состояния в хвосте зоны проводимости.

Видно, что формула (23) определяет распределения плотности электронных состояний в хвосте валентной зоны, а формула (24) - в хвосте зоны проводимости.

В параграфах 4.4 и 4.5 с использованием аналитического выражения для плотности электронных состояний в хвостах валентной зоны и зоны проводимости аморфных полупроводников и значений экспоненциального спектра поглощения, определенных экспериментально для аморфного твердого раствора селен-серы.

Усредняя значения коэффициент поглощения и энергии поглощенных фотонов выражение (23) напишем в следующем виде:

$$g_{vi}(\varepsilon) = \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)N(\varepsilon_v) \left(\frac{2B\beta_2}{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)(\beta_2 - \beta_1)} \exp\left(\beta_2 \left(\frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2} - E_g \right)\right) \right)}{2A \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right)} \quad (27)$$

$$= \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)N(\varepsilon_v) \left(\frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) - \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} + \frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) + \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i} \right)}{2B \left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1 \right)}$$

Здесь $\alpha_i(\hbar\omega)$ - и $\hbar\omega_i$ - коэффициенты поглощения и энергии поглощенных фотонов, определяемые из эксперимента, соответственно. Рассчитаем из (27) распределения плотностей электронных состояний в хвосте валентной зоны, подставив значения спектров экспоненциального поглощения и энергии поглощенных фотонов. Результаты расчетов показаны на рисунке 9.

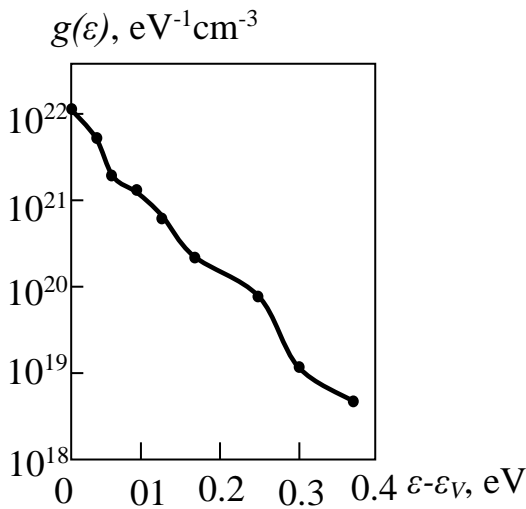


Рис.9. Распределение плотности электронных состояний в хвосте валентной зоны рассчитанные по формуле (27) для аморфного $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$.

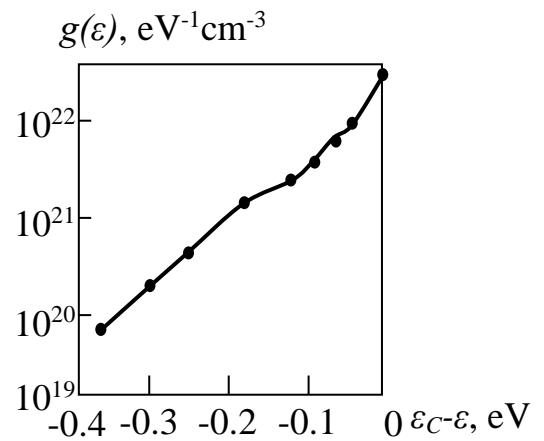


Рис.10. Распределение плотности электронных состояний, в хвосте зоны проводимости, рассчитанные по формуле (28) для аморфного $\text{Se}_{0,5}\text{S}_{0,5}$.

Чтобы вычислить распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости, запишем уравнение (24), усреднив значения экспериментально определенные спектры экспоненциального поглощения и энергии поглощенных фотонов в следующем виде:

$$g_{c_i}(\varepsilon) = \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)N(\varepsilon_c)(\beta_2 - \beta_1)\left(\frac{2B}{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)} \exp\left(-\beta_1\left(Eg - \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)}{2}\right)\right)\left(\frac{\beta_2}{(\beta_2 - \beta_1)} + 1\right)\right)}{2B\beta_2} + \frac{(\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i)N(\varepsilon_c)(\beta_2 - \beta_1)\left(\frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) - \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} + \frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) + \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} + \hbar\omega_i}\right)}{2B\beta_2} \quad (28)$$

Рассчитаем распределения плотностей электронных состояний в хвосте зоны проводимости, подставив значения экспериментально определенного спектра экспоненциального поглощения и энергии поглощенных фотонов в формулу (28). Результаты расчетов показаны на рисунке 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получено аналитическое выражение, объясняющие экспериментальные результаты, показывающие зависимость энергии Урбаха от температуры, и показана линейность этой зависимости. Предложены новые методы определения распределений плотности электронных состояний в валентной зоне и в хвостах разрешенных зон с использованием значений спектров межзонного и экспоненциального поглощения, определенных из экспериментов.

Основные результаты исследования заключаются в следующем.

1. Введено новое выражение, объясняющее температурную зависимость энергии Урбаха для области экспоненциального поглощения спектра коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников, и показано, что эта связь является линейной.

2. Используя формулы Кубо-Гринвуда, записанной в соответствии с методом приближения Дэвиса-Мотта, для спектра межзонного поглощения, получено новое аналитическое выражение, которое определяет распределение плотности электронных состояний в валентной зоне.

3. Используя спектры межзонного поглощения аморфного углерода (*a-C*), определенные экспериментально, было определено распределение плотности электронных состояний в валентной зоне этого материала.

4. Используя формулу Кубо-Гринвуда, записанной для спектра экспоненциального поглощения по методу приближения Дэвис-Мотта были получены новые выражения, которые определяют распределение плотности электронных состояний в хвостах валентной зоны и зоны проводимости.

5. Используя значения спектра экспоненциального поглощения, определенные экспериментально для твердой смеси аморфный селен-сера (*a-Se_{0,5}S_{0,5}*), определены распределения плотности электронных состояний на хвостах валентной зоны и зоны проводимости данного материала.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND
MICROELECTRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

NAMANGAN INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY

MUMINOV KHURSHIDBEK ADHAMJON UGLI

**SPECTRAL CHARACTERISTICS AND DENSITY DISTRIBUTIONS OF
ELECTRONIC STATES IN HYDROGENATED AMORPHOUS
SEMICONDUCTORS**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2022

The theme of the doctoral (PhD) dissertation was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2019.2.PhD/FM418.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at Namangan Institute of Engineering and Technology.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.ispm.uz and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor: **Ikramov Rustamjon Gulomjonovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ass.Professor

Official opponents: **Rasulov Rustam Yavkachovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Egamberdiev Bakhrom Egamberdiyevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Andijan State University**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "04" 03 2022, at 12-00 at the meeting of the Scientific Council No.DSc.03/30.08.2019 FM/T.01.12 at the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Phone: (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, Conference Hall of the ISPM under the NUU).

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No. 31). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Phone: (+99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on "22" 02 2022.
(Registry record No. 35 dated "22" 02 2022)



Sh.B. Utamuradova
Chairman of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

J.J.Khamdamov
Scientific Secretary of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, PhD

Kh.K.Aripov
Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the research work is to determine the distribution of the density of electronic states in the valence band and in the tails of allowed bands, using an analytical expression and experimentally determined values of the interband and exponential absorption spectra of amorphous semiconductors.

The object of investigation is the experimentally determined temperature dependence of the Urbach energy for a-CuIn₃Te₅ and the experimentally determined interband absorption spectrum of amorphous carbon (a-C), as well as the experimentally determined optical absorption spectrum of a solid solution of amorphous selenium-sulfur (*a-Se_{0.5}S_{0.5}*).

The scientific novelty of the research consists of the following:

a new analytical expression for the temperature dependence of the Urbach energy is obtained, which explains the experimental results;

for the first time, from the Kubo-Greenwood formula written for the spectrum of the interband absorption coefficient of amorphous semiconductors, an analytical expression was determined for the distribution of the density of electronic states in the valence band;

according to the values of the spectra of interzonal absorption of amorphous carbon (a-C), determined from the experiments, the distribution of the density of electronic states in the valence band of this material was determined;

for the first time, from the Kubo-Greenwood formula written for the spectrum of the exponential absorption coefficient of amorphous semiconductors, expressions were obtained that determine the distribution of the density of electronic states in the tails of the valence band and the conduction band of this material;

For the first time, using the values of the exponential absorption spectrum determined experimentally for an amorphous solid mixture of selenium-sulfur (*a-Se_{0.5}S_{0.5}*), the distribution of the density of electronic states on the tails of the valence band and the conduction band of this material is determined.

Implementation of research results. Based on the results obtained for the spectral characteristics of hydrogenated amorphous semiconductors and the distribution of the density of electronic states:

new methods for determining the temperature dependence of the Urbach energy and calculating the distributions of the density of electronic states in the valence band and in the tails of the allowed bands of amorphous semiconductors were used in the production of optoelectronic devices at Photon JSC (Reference from Uzeltekhsanoat Joint Stock Company No. 04-3 / 2484 November 23 2021). According to the results of scientific research carried out in LLC "Photon", samples were developed, the photoelectric parameters of which correspond to the current regulatory technological processes;

we used the results of spectral characteristics and distribution of the density of electronic states of hydrogenated amorphous semiconductors for a grant 2019-2021, the reference number of which is AYP (F) -20/516 "The investigation of photoelectrical properties of the Photodiodes for 1-4 pm infrared region" (Uludag

University (Turkey) ref. 2021/20/516). The use of scientific results has made it possible to increase the speed of semiconductor photo converters.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references applications. The text of the dissertation is presented on 118 pages, including 38 figures.

ЭЪЛОНҚИЛИНГ АНИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОКОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Зайнобидинов С., Икрамов Р.Г., Жалалов Р.М., Нуриддинова М.А., Мўминов Х.А. Ютилиш коэффициентни спектрал характеристикалари ва нуқсонларни энергетик ўрни. // Андижон Давлат Университети илмий ахбороти. 2019. №2. С. 5-14. (01.00.00; №13).
2. Ikramov R.G., Nuriddinova M.A., Muminov Kh.A. Spectra of the coefficient of defect absorption and the energy position of defects in amorphous hydrogenated silicon. // International Journal of Multidisciplinary Trends. 2019. V.1(1). P.12-16. (№35Crossref, IF:5.02).
3. Ikramov R.G., Nuriddinova M.A., Muminov Kh.A., Jalolov R.M. Temperature Dependence of Urbach Energy in Non-Crystalline Semiconductors. // Optics and Photonics Journal. 2020. V.10. P. 211-218. (№1 Web of Science, IF:0.72).
4. Ikramov R.G., Nuriddinova M.A., Muminov Kh.A. Parameters defining the interzonal absorption coefficient in amorphous semiconductors. // Journal of Applied Physical Science International. 2020. V.12(1). P. 36-40. (№12IndexCopernicus, IF:4.19).
5. Икрамов Р.Г., Жалалов Р.М., Нуриддинова М.А., Мўминов Х.А. Аморф яримўтказгичларда зоналараро ютилиш коэффициентини аниқловчи параметрлар. // Наманган Давлат Университети илмий ахборотномаси. 2020. №11. С.16-20. (01.00.00; №14).
6. Икрамов Р.Г., Абдулазизов Б.Т., Нуриддинова М.А., Муминов Х.А. Расчет распределения плотности электронных состояний на хвосте зоны проводимости аморфных полупроводников // Узбекский Физический Журнал. 2020. №6. С.344-349. (01.00.00; №5).
7. Зайнобидинов С., Жалалов Р.М., Каландаров Ж.Т., Икрамов Р.Г., Муминов Х.А. Спектр коэффициента межзонного поглощения и плотность электронных состояний в валентной зоне аморфных полупроводников. // Доклады Академии Наук РУ. 2021. №2. С. 45-49. (01.00.00; №7).
8. Икрамов Р.Г., Нуриддинова М.А., Муминов Х.А. Вычисление плотности электронных состояний в валентной зоне из экспериментального спектра межзонного поглощения аморфных полупроводников // Журнал Прикладной Спектроскопии. 2021. Т. 88, № 3. С. 378-382. (№3 Scopus, IF:1.2).
9. Икрамов Р.Г., Нуриддинова М.А., Муминов Х.А. Новый метод определения распределение плотности электронных состояний на хвосте валентной зоны аморфных полупроводников // Оптика и Спектроскопия. 2021. Т. 129, №11. С.1383-1386. (№3 Scopus, IF:0,876).

II бўлим (Часть II; Part II)

10. Икрамов Р.Г., Нуриддинова М.А., Каххаров М.М., Жалалов Р.М. Муминов Х.А. Температурная зависимость энергии Урбаха. // Science a science and education in the modern world: Challenges of the XXI century" Nur-sultan, Kazakhstan. 2019. С. 162-165.

11. Икрамов Р.Г., Нуриддинова М.А., Жалалов Р.М. Муминов Х.А. Урбах энергияси ва температура // Fizikaning hozirgi zamon ta'limidagi o'rni". Samarqand 2019. С. 340-342.

12. Икрамов Р.Г., Нуриддинова М.А., Жалалов Р.М. Муминов Х.А. Энергетическое положение дефектов аморфного гидрогенизированного кремния // Замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация интеграцияси республика илмий-услугий анжумани материаллари. 2020. С.172-175.

13. Султонов Б.К., Холмирзаев О.Т., Муминов Х.А. Расчет распределение плотности электронных состояний в валентной зоне из спектра межзонного поглощения аморфных полупроводников Характеристики сенсibilизированных тонкопленочных солнечных ячеек нового поколения // Experimental and theoretical research in modern science. Procttding of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Kishinev, Moldova. 2021. 26-28 March. P.383-390.

14. Икрамов Р.Г., Нуриддинова М.А., Муминов Х.А. Расчет распределение плотности электронных состояний на хвосте валентной зоны аморфных полупроводников // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг I Республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-I). 2021 й. 21 апрель. С.44-46.

15. Икрамов Р.Г., Нуриддинова М.А., Жалалов Р.М. Муминов Х.А. Взаимодействия света на дефекты псевдолегированного аморфного гидрогенизированного кремния // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг I Республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-I). 2021 й. 21 апрель. С.34-36.

16. Икрамов Р.Г., Исманова О.Т., Жалалов Р.М., Урайимжонов И.М., Пўлатова Н., Муминов Х.А. Аморф яримўтказгичлар учун Кубо – Гринвуд формуласи // Яримўтказгичлар физикаси, микро ва наноэлектроника: фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси истиқболлари республика илмий анжумани. 2021 йил, 21-22 май. С.27-30.

17. Икрамов Р.Г., Нуриддинова М.А., Султонов Б.К., Муминов Х.А. Распределение плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости аморфных полупроводников // Яримўтказгичлар физикаси, микро ва наноэлектроника: фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграцияси истиқболлари республика илмий анжумани. 2021 йил, 21-22 май. С.31-34.

18. Абдуллаев Х.О., Икрамов Р.Г., Султонов Б.Қ., Жалалов Р.М., Муминов Х.А. Кубо-Гринвуд формуласини аниқ интеграл кўринишга келтириш. // “Тенденции развития физики конденсированных сред” Международная научная конференция. Фергана. 2021 г. 25 май. С. 65-68.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида тахрирдан ўтказилиди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди (15.02.2022 йил).

Бичим 60x841/16. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табағи: 3,25. Адади 60. Буюртма №31

Гувоҳнома reester № 10-4434

Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти
босмахонасида чоп этилган.

Босмахона манзили: 100057, Тошкент ш., Янги Олмазор кўчаси 20-уй

