

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.08.2019.ФМ/Т.01.12 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ
КЕНГАШ**

НАМАНГАН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

НАБИЕВ АЪЗАМЖОН БОТИРЖОНОВИЧ

***a-Si:H* АСОСИДАГИ ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИДА
КОВАКЛАР ЭЛЕКТР ТАШУВЧАНЛИГИНИ
ФОТОЭЛЕКТРИК ХОССАЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2019

**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**

Набиев Аъзамжон Ботиржонович

a-Si:H асосидаги қуёш элементларида коваклар электр
ташувчанлигини фотоэлектрик хоссалари 3

Набиев Аъзамжон Ботиржонович

Фотоэлектрические свойства электропереноса дырок в солнечных
элементах на основе *a-Si:H*. 25

Nabiyev Azamjon Botirjonovich

Photoelectric properties of electric transport of holes in solar cells
based *a-Si: H*..... 47

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 51

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.08.2019.ФМ/Т.01.12 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ
КЕНГАШ**

НАМАНГАН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

НАБИЕВ АЪЗАМЖОН БОТИРЖОНОВИЧ

***a-Si:H* АСОСИДАГИ ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИДА
КОВАКЛАР ЭЛЕКТР ТАШУВЧАНЛИГИНИ
ФОТОЭЛЕКТРИК ХОССАЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2019

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.1.PhD/FM320 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Наманган давлат университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбар: **Зайнабидинов Сиражидин Зайнабидинович**
физика-математика фанлари доктори, профессор,
академик

Расмий оппонентлар: **Имамов Эркин Зуннунович**
физика-математика фанлари доктори, профессор
Дадамирзаев Мухаммаджон Гуломқодирович
физика-математика фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот: **Фарғона давлат университети**

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.30.08.2019.FM/T.01.12 рақамли илмий кенгашнинг 2019 йил «___» _____ соат ____ 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. (___ 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 2019 йил « ___ » _____ да тарқатилди.
(2019 йил « ___ » _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

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

С.С. Насриддинов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш
котиби т.ф.д., доцент

А.Т. Мамадалимов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш
қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор, академик

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги. Жаҳонда охириги ўн йилликда қайта тикланадиган энергия манбаларининг, айниқса фотоэнергетика соҳасининг жадал ривожланиши кузатилмоқда. Катта фойдали юзага эга, таннархи арзон қуёш элементларини яратишда асосий материаллардан бири бўлган гидрогенизацияланган аморф кремний ва унинг модификацияларига бўлган қизиқиш тобора ортиб бормоқда. Бунинг асосий сабабларидан бири гидрогенизацияланган аморф кремний ва унинг модификациясидан фойдаланиб, қуёш элементларининг кўп қатламли, юқори самарадорликка эга бўлган моделларининг яратилиш имкониятини юзага келишидир. Бундан ташқари гидрогенизацияланган аморф кремний ҳам илмий, ҳам амалий нуқтаи назардан истиқболли яримўтказгич ҳисобланиб, у ўзининг юқори фотоэлектрик ўтказувчанлиги, кенг спектрал ораликда юқори даражада ютиш коэффициентига эгаллиги ва легирлашнинг самарадорлиги билан илмий тадқиқотчиларга турли усулларни қўллаш имкониятини яратади.

Ҳозирги даврдаги илмий дунёда яримўтказгичлар, айниқса гидрогенизацияланган аморф кремний ва унинг модификациялари асосида яратилган кўп қатламли ва кўп каскадли қуёш элементларининг контакт соҳаларида юзага келган янги хоссаларни, шунингдек уларнинг ток ташувчиларнинг параметрларига таъсирини ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада, қуйида келтирилган йўналишлар бўйича мақсадли тадқиқотлар олиб бориш асосий масалалардан бири ҳисобланади: гидрогенизацияланган аморф кремнийда ёруғликнинг нотекис ютилиши туфайли қатламлар ўртасидаги потенциал тақсимотни аниқлаш; гидрогенизацияланган аморф кремний асосидаги $p-i-n$ структураларда фақат бир турдаги заряд ташувчилардан иборат фототокни ҳосил қилиш шартларини аниқлаш; $p-i-n$ структуралар фотовольт-ампер характеристика (фотоВАХ)ларини назарий таҳлил қилиш; таҳлил натижаларидан фойдаланиб, бир турдаги заряд ташувчилар параметрларини ўзгартириш учун аниқликлар киритиш.

Республикамизда илм-фан ривожига фотоэнергетикага, хусусан монокристалл ва поликристалл кремнийли қуёш модулларининг самарали ишлаш шартларини тадқиқ этишга кейинги йилларда катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада кўплаб ишлар қилинган, яъни турли хил модификациялардан фойдаланиб, кўп қатламли ва гетероўтишли қуёш элементларини яратиш бўйича фундаментал тадқиқотлар олиб борилиб, уларнинг фойдали иш коэффициент (ФИК)ларини орттириш йўлида кўплаб тавсиялар ишлаб чиқилган.

2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича ҳаракатлар стратегияси¹ да илмий тадқиқот

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони // ЎзР ҚХТ Ўзбекистон Республикаси қонун ҳужжатлари тўплами, 2017 й., 6-сон, 70-модда, 20-сон, 354-модда, 23-сон, 448-модда, 37-сон, 982-модда.

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 материаллар асосидаги самарали куёш элементларини ишлаб чиқиш муҳим аҳамиятга эга. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ–4947-сонли Фармони ҳамда 2017 йил 17 февралдаги ПҚ–2789-сонли “Фанлар Академиясининг фаолияти ва илмий-тадқиқот ишларини такомиллаштиришни ташкил қилиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора-тадбирлари тўғрисида”ги қарорлари ва мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга мазкур диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологияларни ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг Ф2 «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Гидрогенизацияланган аморф кремний асосида яратилган фотоэлектрик қурилмалардаги ток ташувчиларнинг фаол қатлам ҳарактеристикаларига боғлиқлиги америкалик олимлар Е. А. Шифф, Р.Г. Лекомбер, Р.А. Стрит ва япониялик олим И. Хамокавалар томонидан ўрганилган.

Москва ва Санкт-Петербург шаҳарларидаги бир неча илмий-тадқиқот гуруҳлари томонидан гидрогенизацияланган аморф кремний ва унинг модификацияларини фотоэлектрик ўтказувчанлигининг ҳароратга боғлиқлиги бўйича тажриба натижаларидан фойдаланиб, асосан рекомбинацион жараёнлар механизми ва рекомбинация марказларнинг энергетик ўрни тадқиқ қилинган. Санкт-Петербург физика-техника институтида, Е.И.Теруков¹ раҳбарлиги остидаги гуруҳ, гидрогенизацияланган аморф кремний асосидаги структураларда ток ташиш жараёнларини тадқиқ этган. Москва давлат университети профессори А.Г. Казанский² бошчилигидаги илмий гуруҳ томонидан эса асосан компланар структуралар тадқиқ этилган.

Ўзбекистонлик олимлар: Р.А. Мўминов, А.Т. Мамадалимов, М.К. Бахадирханов, С.З.Зайнобидинов, К.П. Абдурахмонов, Ғ.Ғ. Гулямов, Э.З. Имомов, Р.Я. Расулов ҳамда Р.Ғ. Икрамовлар ўзларининг бир қатор ишларида моно-, поли-, нано- ва гидрогенизацияланган аморф кремний асосида яратилган куёш элементларида юзага келадиган жараёнлар ва турли ташқи омилларнинг ток ташувчиларга таъсирини ўрганишган.

¹ E.I. Terukov, Yu. V. Kryuchenko, A.V. Sachenko, A.V. Bobyl, V.P. Kostilyov, P.N. Romanets, I.O. Sokolovskiy, A.I. Shkrebtiy., Efficiency a-Si:H solar cell. Detailed theory. Semiconductors Physics, 2012, V. 15, № 2, с. 91-116.

² Казанский А.Г., Кошелев О.Г., Сазонов А.Ю., Хомич А.А. Фотопроводимость тонких пленок аморфного гидрированного кремния. ФТП, Т. 42, 2008, -В. 2. -с.192-194.

Аммо ҳозиргача қалин қатламли гидрогенизацияланган аморф кремний асосидаги структураларда ёруғликнинг нотекис ютилиши асосида ҳосил бўладиган потенциал тўсиқ ва унинг ёрдамида фақат бир турдаги ток ташувчилардан иборат фототокнинг юзага келиши ва унинг кучланишга боғлиқлик тавсифлари деярли ўрганилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Андижон ва Наманган давлат университетлари илмий-тадқиқотлар режасининг ОТ-Ф2-002 рақамли «Поликристалл, аморф ва нанокристалл кремнийли структураларда ташқи таъсирлардан (термик, оптик ва радиацион) рағбатлантирилган номувозанатли заряд кўчиш жараёнлари» (2007 – 2011 йй); ОТ-Ф2-28-рақамли «Легирланган кремний сирти ва ҳажмидаги квант ўлчамли эффектлар ҳамда уларнинг $p-n$ структуралардаги заряд ташувчилар фотогенерацияси ва рекомбинацияси жараёнларига таъсири» (2012 – 2016 йй) мавзуларидаги илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади $a-Si:H$ асосидаги қуёш элементларида ковакларнинг электр ўтказувчанлик жараёнларини ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

$a-Si:H$ асосидаги $p-i-n$ структураларда фақат бир турдаги заряд ташувчилардан иборат фототок олиш мақбул шароитларини аниқлаш;

$p-i-n$ структурани фаол қатламида ёруғликнинг нотекис ютилиши туфайли энергетик потенциал тўсиқнинг юзага келиш сабабларини аниқлаш;

$a-Si:H$ асосидаги $p-i-n$ структуралар фотоВАХси учун Пуассон тенгламаси, узлуксизлик ва қайта зарядланиш учун кинетик тенгламадан фойдаланиб, турли ҳоллар учун аналитик ифода келтириб чиқариш;

фақат коваклар токининг фотоэлектрик параметрларини бир қийматли аниқлаш имконини берувчи фотоВАХ соҳасини аниқлаш;

ковакларнинг ток ташувчанликдаги иштирокига таъсир қилувчи ҳаракатчанлик тирқишидаги зарядли ҳолатлар концентрацияси ва уларнинг энергетик тақсимланиш кенглигини аниқлаш;

Тадқиқот объекти сифатида гидрогенизацияланган аморф кремний олинган.

Тадқиқотнинг предмети стационар ва квазистационар ёритилган гидрогенизацияланган аморф кремнийнинг фотоэлектрик ўтказувчанлигини ҳароратга ва кучланишга боғлиқлигини кўрсатувчи график ёрдамида ковакларнинг ток ташиш механизминини тадқиқ этишдир.

Тадқиқотнинг усуллари. Пуассон тенгламаси, узлуксизлик тенгламаси, қайта зарядланишни кинетик тенгламаси, зарядли ҳолатлар тақсимоти учун Гаусс формуласи, турли функцияларни қаторга ёйиш усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

Илк бор ёруғликнинг қалинлик бўйлаб нотекис ютилиши натижасида бир қатламнинг ўзида ток ташувчиларнинг турли хил концентрациясига эга

икки соҳанинг юзага келиши ва улар ўртасидаги потенциал тўсиқнинг мавжудлиги аниқланган;

$p - i - n$ структураларда ёруғликнинг нотекис ютилиши туфайли юзага келган соҳада фақат бир турдаги ток ташувчилардан иборат фототокнинг юзага келиш шартлари аниқланган;

илк бор гидрогенизацияланган аморф кремний учун ВАХнинг тўғри чизиғидаги қонуниятлар ўрнатилган;

гидрогенизацияланган аморф кремнийда ковакларнинг фотоэлектрик параметрларини аниқлаш мумкинлиги назарий асосланган;

коваклар ҳаракатига таъсир қилувчи нуқсонларнинг ҳаракатчанлик тирқишидаги энергетик сатх ва концентрациясини аниқлаш усули таклиф қилинган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари: гидрогенизацияланган аморф кремний асосидаги фотоэлектрик қурилмаларда ковакларнинг деярли барча фотоэлектрик параметрлари ҳақидаги маълумотларни олиш ва уларнинг самарадорлигини орттириш имкониятлари яратилди.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги назарий ҳисоблашлардан олинган натижаларнинг экспериментал натижалар билан мос тушиши орқали асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти фаол қатламнинг қалинлиги катта бўлган кўп қатламли фотоэлементлар, асосан қуёш элементларида ёруғликнинг нотекис ютилиши ҳисобига қўшимча потенциал тўсиқ ҳосил қилиши ва бу тўсиқнинг коваклар ўтказувчанлигига таъсирини ҳажмий зарядлар билан чегараланган фотоВАХ ёрдамида ўрганишга имкон беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти қуёш элементларининг самарадорлигини ошириш имкониятларидан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. $a\text{-Si:H}$ асосидаги қуёш элементларида коваклар электр ташувчанлигини фотоэлектрик хоссаларини тадқиқ қилиш асосида:

$a\text{-Si:H}$ асосидаги қуёш элементларида ковакларнинг ток ташувчанлик механизмини аниқлаш ва уларга таъсир қилувчи ҳаракатчанлик тирқишидаги зарядли ҳолатлар концентрациясини оптималлаштириш орқали фотоэлектрик қурилмаларнинг самарадорлигини ошириш «Фотон» акциядорлик жамиятида яримўтказгичли электрон қурилмалар ишлаб чиқаришда фойдаланилган. Илмий натижалардан фойдаланиш қуёш элементларининг унумдорлигини ошириш имконини берган. («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2019 йил 13 ноябрдаги 04-4/1827-сон маълумотномаси).

Ёруғликнинг қалинлик бўйлаб нотекис ютилиши натижасида бир қатламнинг ўзида ток ташувчиларнинг турли концентрациясига эга икки соҳанинг юзага келиши ва улар ўртасидаги потенциал тўсиқ мавжудлигини аниқланиши, фототокнинг кучланишга боғлиқлик графигини назарий таҳлили асосида олинган аналитик ифода, тажрибалар натижасида олинган графикларни назарий таҳлилидан фойдаланиб, коваклар ҳаракатига таъсир

килувчи зарядли ҳолатларнинг ҳаракатчанлик тирқишидаги энергетик ўрни ва концентрациясини аниқлаш усули Ф2-ОТ-О-15494 “Квант нуқтали гетеро ва нанотузилмалардаги экситонлар, поляронлар, биполяронлар ва кўчиш ходисаларини тадқиқ этиш асосида нурлагичлар, фотоэлементлар ва бошқа турдаги оптоэлектрон асбобларнинг самарадорлигини яхшилаш” ҳамда Ф-2-21 “Яримўтказгичдиэлектрик чегарасидаги сирт ҳолатлар зичлигини аниқлашни математик моделлаштириш” мавзусидаги фундаментал лойиҳани амалга оширишда фойдаланилган. Илмий натижалардан фойдаланиш фотоэлементлар ва бошқа турдаги оптоэлектрон асбобларнинг самарадорлигини ошириш имконини берган. (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2019 йил 11 ноябрдаги 89.03.4392-сон маълумотномаси).

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари, жумладан, 5 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 17 та илмий иш, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси фалсафа докторлиги диссертацияларининг асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этган илмий нашрларда 8 та мақола, жумладан, 5 таси республика ва 3 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, нашр этилган ишлар рўйхати, фойдаланилган адабиётлар 98 та номдаги рўйхатдан иборат ва диссертациянинг ҳажми 124 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг «**гидрогенизацияланган аморф кремнийни фотоэлектрик ўтказувчанлиги ва рекомбинацион жараёнлар**» деб номланган биринчи бобида мавзу бўйича адабиётларда келтирилган натижалар таҳлил этилган. Гидрогенизацияланган аморф кремний асосидаги қуёш элементларининг самарадорлиги фотоэлектрик параметрларига боғлиқлигидан келиб чиқадиган натижалар асосида ўрганилган. Адабиётларда келтирилган маълумотлар асосида фотоэлектрик ўтказувчанлигининг ҳароратга боғлиқлиги, ютилиш коэффицентининг спектрал тақсимоти ва люкс-ампер характеристикалар орқали коваклар ҳаракатчанлиги μ_p ва яшаш вақти τ_p , $a-Si:H$ пардаларда Ферми сатҳини энергетик жойлашувига, ҳаракатчанлик тирқишидаги зарядли ҳолатлар зичлигига ва уларнинг табиатига, легирлаш даражасига боғлиқлиги тадқиқ этилган. Қуёш элементлари ва фотоэлектрик қурилмаларда ковакларнинг ток ташувчанлик механизмини ўрганишда $a-Si:H$ нинг бор билан кучсиз ва кучли легирланган $a-Si:H(B)$ пардаларида асосий параметрлар бўлган ҳаракатчанлик тирқиши ва ундаги зарядлар тақсимоти, рекомбинацион жараёнлар, вольт-ампер ва люкс-ампер характеристикаларни ўрганишга кам эътибор қаратилгани кўрсатиб берилган. Биз томондан кўпгина муаллифларнинг тажриба натижалари ўрганилди, уларнинг қайд этган вольт-ампер тавсифларида мураккаб кўринишдаги боғлиқлик кузатилган. Лекин бу боғлиқликни кўрсатиб берадиган аналитик ифода уларда мавжуд эмас. Амалга оширилган адабиётлар таҳлили асосида ушбу диссертация ишининг вазифаси ва мақсади кўйилди.

Диссертациянинг « **$a-Si:H$ пардалари ва улар асосидаги структураларда зарядларнинг ток ташиш механизми ва уларнинг фотоэлектрик параметрларга боғлиқлигини ўрганиш усуллари**» деб номланган иккинчи бобида гидрогенизацияланган аморф кремний асосидаги фотоэлектрик қурилмаларда электрон ва ковакларни ток ташиш механизмини белгиловчи зарядлар ҳаракатчанлиги, ўртача яшаш вақти, ҳаракатчанлик тирқишидаги зарядлар ҳолати тақсимоти ва Ферми сатҳи энергетик ўрни каби параметрлар ўрганилган. Асосий эътибор μ_p ва μ_n катталикларнинг $a-Si:H$ парда параметрларига қай даражада боғлиқлигига қаратилган. Бунинг учун узлуксизлик ва электронейтраллик кинетик тенгламаларидан фойдаланиб қуйидагиларни ёзиш мумкин

$$\sigma = e\Delta n\mu_n + e\Delta p\mu_p \quad (1)$$

$$\Delta N_0 \frac{\partial f}{\partial t} = p_t - p_{t0} + N_0^+ - N^+ + N_0^0 - N^0 \quad (2)$$

$a\text{-Si:H}$ парда бор (В) билан кучсиз легирлангани учун (1) тенгламада $\Delta n \approx 0$ деб ҳисоблаш мумкин. Бундан ташқари $\frac{\sigma_{ph}}{\sigma_T} \approx 10^2 - 10^4$ муносабатга кўра

$p_t \gg p_{t0}$ бўлади. p –тип $a\text{-Si:H}$ пардаларда асосий рекомбинация марказлари сифатида D^0 -марказлар қаралгани туфайли тўла концентрация учун $N^0 \gg N^+$ шарт ўринли бўлади.

У ҳолда $N_D = N_0^0 + N_0^+ = N^0 + N^+$ ифодани юқоридаги шартни ҳисобга олиб $N_D \approx N^0$ кўринишда ёза оламиз. Бундан ташқари термодинамик мувозанат учун $N_D \frac{\partial f}{\partial t} = 0$ ифодани ҳисобга олиб, (2) дан қуйидаги ифодага эга бўламиз

$$p_t = N^0. \quad (3)$$

Коваклар учун тутқичлар валент соҳа думида тақсимлангани учун ортиқча коваклар ўзгаришини

$$\frac{\Delta p}{p_t} = \frac{N_v}{N_{pt}} \exp\left(-\frac{E_v - E_{tp}}{kT}\right) \quad (4)$$

кўринишда ифодалаймиз.

Ток ташувчиларнинг генерация тезлиги ва яшаш вақтини ифодалайдиган формулалардан фойдаланиб, (4) ифодани қуйидагича ифодалашимиз мумкин

$$\Delta p = \left[\frac{GN_v}{C_p^0 N_{tp}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_v - E_{tp}}{2kT}\right), \quad (5)$$

У ҳолда фотоэлектрик ўтказувчанлик учун қуйидагига эга бўламиз

$$\sigma_{ph} = e\mu_p \left[\frac{GN_v}{C_p^0 N_{tp}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_v - E_{tp}}{2kT}\right). \quad (6)$$

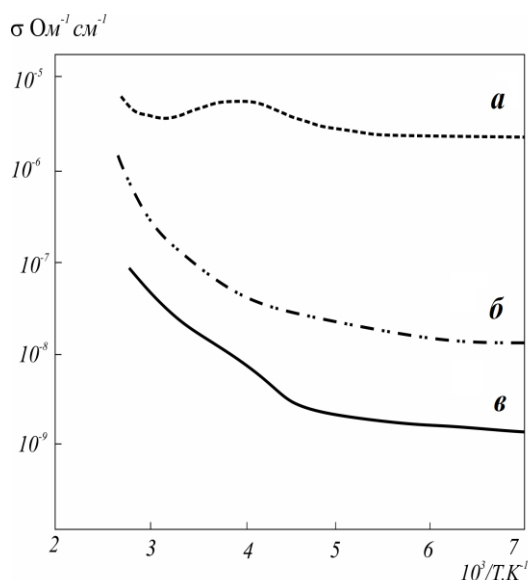
Ифода (6)дан кўринадик, унда τ_p катталиқ иштирок этмайди. N_{tp} – коваклар учун тутқичларнинг эффе́ктив концентрацияси. Ҳарорат ортиб бориши ушбу тутқичларнинг тўлишига олиб келади. Ушбу ҳолатда тутқичларнинг тўла тўлиши содир бўлади. Бу ҳол учун $\tau_p = \frac{1}{C_p^0 N_{tp}}$ ифода ўринли бўлади ва (6) ифода қуйидагича кўринишга ўтади

$$\sigma_{ph} = e\mu_p (\tau_p)^{\frac{1}{2}} \cdot (GN_v)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_v - E_{tp}}{2kT}\right) \quad (7)$$

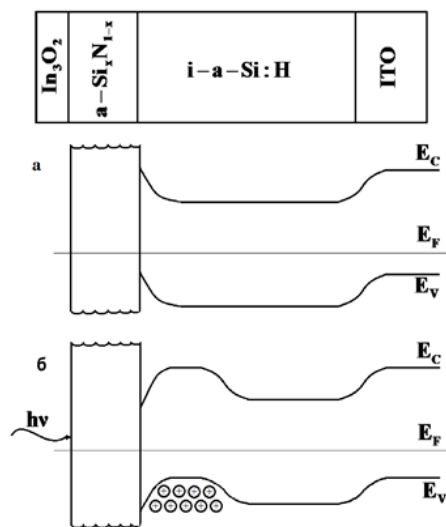
1- расмдаги а) ва б) графиклардан кўринадик (7) ифода $120 \text{ K} < T < 250 \text{ K}$ оралиқда фотоэлектрик ўтказувчанлик-нинг экспоненциал ўсишига мос келади. Бу ҳолатдаги рекомбинация механизмини қуйидагича тушунтириш мумкин: ҳароратнинг ортиши валент зона тутқичларидаги ковакларни термик фаоллаштиради. Бу эса D^0 -марказларда ковакларнинг тутилишига олиб келади, яъни $D^0 + e \rightarrow D^+$ кўринишдаги қайта зарядланиш содир бўлади. D^0 -марказ концентрациясининг камайиши эса, ўз навбатида τ_p -катталиқнинг

ортишини таъминлайди ва бунинг натижасида σ_{ph} -катталиқ ҳам ортиб боради.

Аммо ушбу (7) формула кучсиз легирланган хусусий $a\text{-Si:H}$ ва легирланган $a\text{-Si:H(B)}$ пардаларнинг паст ҳароратларда фотоэлектрик ўтказувчанлигининг ҳароратга боғлиқлигини ифода қила олмайди. Фотоэлектрик ўтказувчанликнинг бундай ҳолатини биз қуйидагича қиёслашимиз мумкин. Кучсиз легирланган аммо хусусий ўтказувчанликка эга $a\text{-Si:H}$ пардаларнинг ҳаракатчанлик тирқишида узилган Si-Si боғлар ҳосил қилган дефектлар концентрацияси деярли жуда кам бўлади. Ёруғлик таъсирида D^0 ва D^- -марказларнинг нисбий ўзгариши катта бўлиб, термик фаоллашиш орқали бу ўзгариш ўртасидаги тафовут ортиб боради. Бу эса ковакларнинг яшаш вақти (τ_p – катталиқ)нинг камайишига, электронларнинг яшаш вақти (τ_n -катталиқ)нинг ортишига олиб келади. Натижада умумий фотоэлектрик ўтказувчанлик (σ_{ph}) кучсиз ўзгаради.



1-расм. Кучли легирланган $a\text{-Si:H}$ (б,в), кучсиз легирланган аммо хусусий ўтказувчанликка эга $a\text{-Si:H}$ (а) пардалар учун $\sigma(1/T)$ боғланиш келтирилган. [48; б.54-57]



2- расм. Видикон нишони қатламларини ёритишдан олдинги (а) ва кейинги (б) зона диаграммаси [3А; 1010-1017 б].

Бу ҳолатни аналитик формула ёрдамида ифодалаш анча мураккаб. Аммо ушбу соҳалардан, яъни фотоэлектрик ўтказувчанликнинг ҳароратга кучсиз боғлиқлигида асосан $\mu_n \tau_n$ катталиқ аниқланади, демак (1) тенгламада $\mu_n \tau_n \gg \mu_p \tau_p$ эканлигини ҳисобга олсак,

$$\sigma = eG\mu_n \tau_n \quad (8)$$

ифодага эга бўламиз ва шундай қилиб, $\mu_n \tau_n$ катталиқни аниқлаш мумкин. Булардан i -тип, яъни кучсиз легирланган $a\text{-Si:H}$ ларда ковакли ўтказувчанликни стационар фотоэлектрик ўтказувчанликнинг ҳароратга боғлиқлиқ усули (SSPC) орқали аниқлаб бўлмаслиги кўринади. Таъкидлаш жоизки ҳар икки турдаги ток ташувчилар учун μ ва τ катталиқлар ҳароратга кучли боғланган, лекин кучсиз легирланган $a\text{-Si:H}$ пардаларда бундай

боғлиқлик кузатилмайди. Бундай боғланиш фақатгина p - ва n -тип $a\text{-Si:H}$ пардаларда кузатилади холос.

Бундай катталикларни тўлароқ ўрганиш учун фақатгина бир турдаги ток ташувчилар, яъни коваклар ёки электронлар бўлиши таълаб этилади. Уларнинг ток ташиш механизмини ўрганиш учун, видикон нишони ёки Шоттки тўсиқли $p\text{-}i\text{-}n$ структурали куёш элементларида тескари кучланиш берилади ва фотоэлектрик ўтказувчанлик тадқиқ этилади. Маълумки, видикон нишонига тушаётган қисқа тўлқин узунлиқдаги ёруғлик $i\text{-}a\text{-}Si\text{:H}$ қатламни юза қисмида ютилади. Шунинг учун $i\text{-}a\text{-}Si\text{:H}$ қатламни асосан юза қисмида коваклар “резервуари” ҳосил бўлади. 2-расмда видикон нишони сифатида олинган структура қатламларининг ёритишдан олдинги (а) ва кейинги (б) зона диаграммаси келтирилган.

Тушган ёруғлик $i\text{-}a\text{-}Si\text{:H}$ сирт қатламдаги барча зарядли ҳолатларда ютилади ва коваклар $i\text{-}a\text{-}Si\text{:H}$ ҳаракатчанлик тирқишидаги зарядли ҳолатлар билан таъсирлашади. Маълумки $i\text{-}a\text{-}Si\text{:H}$ нинг ҳаракатчанлик тирқишидаги ва валент зона думидаги зарядли ҳолатлардан иборат бўлиб, D-марказларнинг узилган $Si\text{-}Si$ боғлари сабабли юзага келади.

Адабиётлар таҳлилидан кўрдикки, $i\text{-}a\text{-}Si\text{:H}$ даги ток ташиш жараёнида асосан икки турдаги D-марказлар, яъни рекомбинация марказлари ёки тутқич марказлари иштирок этади. Электрон учун D^- -марказлар, коваклар учун эса D^0 -марказлар. Юқорида келтирилган умумий ҳолатни эътиборга олиб, ҳаракатчанлик тирқишидаги жами зарядли ҳолатлар зичлигини алоҳида ҳолатлар зичликлари йиғиндиси кўринишида ёзишимиз мумкин

$$g(E) = g_v^{ur}(E) + g_c^{ur}(E) + g_D^G(E) + g_A^G(E),$$

бу ерда $g_v^{ur}(E)$ ва $g_c^{ur}(E)$ - мос равишда, валент соҳа ва ўтказувчанлик соҳа думидаги ҳолат зичлиги. Улар экспоненциал тақсимотга бўйсунди

$$g_v^{ur}(E) = g_{v0} \cdot \exp\left(\frac{E_v - E}{E_D}\right), \quad (9)$$

$$g_c^{ur}(E) = g_{c0} \cdot \exp\left(\frac{E - E_c}{E_A}\right), \quad (10)$$

бу ерда g_{v0} ва g_{c0} мос равишда, валент соҳа юқорисидаги ва ўтказувчанлик соҳа қуйисидаги ҳолатлар зичликларининг максимал қийматлари. E_D ва E_A – донорли ва акцепторли сатҳларни тавсифловчи энергия.

D-марказларнинг ҳаракатчанлик тирқишидаги тақсимланиши Гаусс тақсимотига бўйсунди

$$g_D^G(E) = g_{D0}^G(E) \cdot \frac{1}{\sigma_D \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(E - E_g + E_D)^2}{2\sigma_D^2}\right], \quad (11)$$

$$g_A^G(E) = g_{A0}^G(E) \cdot \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(E - E_A)^2}{2\sigma_A^2}\right]. \quad (12)$$

Бу ерда $g_{D0}^G(E)$ ва $g_{A0}^G(E)$, мос равишда, D^- ва D^0 -марказлар учун Гаусс тақсимоти ҳолат зичлигининг максимал қиймати. E_D ва E_A донор ва акцептор энергетик сатҳлар максимал қийматлари.

Қайси энергетик ҳолатларда тутилган заряд ташувчилар сабабли Ферми сатҳи силжишини аниқлаш керак. Маълумки, видикон нишонини фотоэлектрик ўтказувчанлигида фақат коваклар иштирок этгани учун (9) ва (12) ифодаларни ташлаб юборамиз, чунки бу зарядли ҳолатлар билан электронлар таъсирлашади. Бундан ташқари (9) ва (12) ифодалардаги $g_{v0} \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}/\text{эВ}$ ва $g_{A0} \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}/\text{эВ}$ эканини ҳисобга олсак, тутилган коваклар концентрациясига нисбатан $E_v - E \ll E - E_D$ тенгсизлик бажарилади. Чунки тушаётган ёруғлик интенсивлиги бир хил бўлганда фотонларнинг ҳолатларга нисбатан ютилиш фоизи D-марказда катта. Шунинг учун Ферми сатҳини силжишига ушбу марказ сабаб бўлади ва унинг силжишини фақат (11) ифодадан топишимиз мумкин.

Юқоридагиларни ҳисобга олган ҳолда, тушаётган ёруғликни барчаси ютилади деб ҳисобласак, тутқичларда тутилган коваклар концентрацияси Δp генерацияланган коваклар концентрациясига Φ га тўғри мутаносиб бўлиб, у орқали генерацияланган коваклар концентрациясини ушбу формула орқали топиш мумкин

$$\Delta p = \int_{E_v + E_a - \Delta E}^{E_v + E_a + \Delta E} [1 - f_D(E)] g_D^G(E) dE, \quad (13)$$

бу ерда $f_D(E)$ зарядли ҳолатларни тўлдириш коэффиценти бўлиб, уни қуйидаги муносабатдан ҳисоблаш мумкин

$$f_D(E) = \frac{2 \exp[(E_F - E)/kT]}{1 + 2 \exp[(E_F - E)/kT] + \exp[(2E_F - 2E - U)/kT]}. \quad (14)$$

(14) ифодадан кетма-кет яқинлашиш усули билан ΔE нинг қийматини топишимиз мумкин. Ковакларнинг Ферми сатҳидан пастдаги донорли ҳисобланган D^0 -марказларда тутилганлиги учун E_F Ферми сатҳи E_v томонга $2\Delta E$ қийматга силжийди, у ҳолда потенциал тўсик баландлигини

$$\phi \approx 2\Delta E \quad (15)$$

деб ҳисобласак бўлади.

*a-Si:H*нинг ҳаракатчанлик тирқишидаги D^- ва D^0 -марказлар концентрацияси 10^{14} - 10^{16} см^{-3} дан катта бўлмайди. Шунинг учун видикон нишонига тушаётган фотонлар сони тахминан шу қийматлардан катта бўлмаслиги керак. Бундан ташқари ушбу бобда тушаётган ёруғлик интенсивлигига боғлиқ ҳолда ҳажмий зарядлар соҳасини ўзгариши кўрсатилган.

Диссертациянинг «*a-Si:H* асосидаги видикон нишонининг фотоВАХи ва унинг назарий таҳлили» деб номланган учинчи бобида видикон нишони фотоВАХ графигидаги ўзгаришлар ёруғлик интенсивлиги, кучланиш ва ҳароратга боғлиқ ўзгаришга учраши ва уларни тавсифловчи тенгламалар таҳлил қилинган. Агар видикон нишонига тескари кучланиш берилса, ўтказувчанликда фақат коваклар иштирок этгани учун *i-Si:H* қатламни *p*-тип ярим ўтказгич сифатида қараймиз. Потенциал ва коваклар тақсимотини топиш қуйидаги тенгламаларни ёзамиз:

$$\text{ток зичлиги} \quad j = e p \mu E + D \nabla p ; \quad (16)$$

Пуассон тенгламаси

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi}{\varepsilon}\rho ; \quad (17)$$

узлуксизлик тенгламаси

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial t} . \quad (18)$$

Коваклар ўз ҳаракати давомида валент соҳа думида E_{tp} энергетик сатҳда жойлашган тутқичлар ва E_A энергетик сатҳда жойлашган D^0 -марказлар билан ўзаро таъсирлашади деб ҳисобласак, у ҳолда ҳажмий зарядлар зичлигини $\rho = e(N_p + N_D - p)$ кўринишда ёзамиз.

Агар токни стационар, яъни $j = \text{const}$ ва унинг қийматини жуда кичик деб ҳисобласак, инжекцияланган ковакларнинг қандайдир қисми E_{tp} энергетик сатҳдаги тутқичлар билан термодинамик мувозанатда бўлади дейиш мумкин. Бундан ташқари диффузия коэффициенти учун Эйнштейн муносабатини ҳисобга олиб, (16) ва (17) тенгламаларни қуйидаги кўринишда қайта ёзамиз

$$j = e p \mu \frac{d\varphi}{dx} + \mu k T \frac{dp}{dx}, \quad (19)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi e}{\varepsilon}(p - p_{tp}), \quad (20)$$

Бу ерда p – инжекцияланган коваклар концентрацияси, p_{tp} – E_{tp} сатҳда тутиб қолинган коваклар концентрацияси. Видикон нишони фотоВАХ графигидан кичик кучланишларда фототок қийматининг ниҳоятда кичик эканини ҳисобга олсак, $j \approx 0$ муносабат ўринли бўлади. У ҳолда (19) ифодани қуйидагича ёза оламиз.

$$e p \mu \frac{d\varphi}{dx} = -\mu k T \frac{dp}{dx} \quad \text{ва} \quad p = -p_k \exp \frac{e\varphi}{kT} \quad (21)$$

бу ерда p_k – ҳажмий зарядлар соҳаси учун $x=0$ нуктадаги коваклар концентрацияси бўлиб, қуйидаги экспоненциал қонунига бўйсунди

$$p_k = p_0 \exp\left(-\frac{e\varphi_0}{kT}\right), \quad (22)$$

(21) ва (22) лардан эса қуйидаги ифодага эга бўламиз

$$p = -p_0 \exp\left(\frac{e(\varphi - \varphi_0)}{kT}\right). \quad (23)$$

У ҳолда (23) ни (20) га қўйиб, қуйидаги тенгламага эга бўламиз.

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} p_0 \left(1 - \exp\left(\frac{\varphi_0 - \varphi}{kT}\right)\right). \quad (24)$$

(24) тенгламадан эса “бойитилган” контакт учун ковакларнинг потенциал ва концентрацияси тақсимотини ифодаловчи тенгламага эга бўламиз

$$\varphi = -\frac{2kT}{e} \ln\left(1 - \frac{x}{a}\right), \quad (25)$$

$$p = p_0 \exp \frac{e\varphi}{kT} = p_0 \left(\frac{a}{a+x} \right)^2, \quad (26)$$

Унга кўра потенциал тақсимотга ёруғлик ютилмаган соҳадаги асосий заряд ташувчиларнинг таъсир қилмаслиги аниқ бўлади. Биз қараётган ҳолда эркин зарядлар коваклар бўлиб, уларнинг концентрацияси валент соҳа думидаги тутқичлар ва D -марказларнинг ҳолат зичлигига боғлиқ. Шунга кўра, ўта бойитилган ҳолат учун олинган Пуассон тенгламасидан зарядли ҳолатлар ҳақида маълумот олиш деярли мумкин эмас. Шунинг учун бундай маълумотни олиш, яъни $a\text{-Si:H}$ нинг ҳаракатчанлик тирқишидаги турли зарядли ҳолатлар зичлиги ва уларнинг коваклар ток ташиш механизмига таъсирини ўрганиш учун ёруғлик интенсивлигига юқоридан чегара қўйилади ва фақат шундай шароитда олинган фотоВАХдан коваклар параметрлари ҳақида маълумотлар олиш мумкин.

Видикон нишони учун фототок ҳосил қилишда тескари кучланиш улаб, ток ташувчилар инжекцияси ҳосил қилинади. Ушбу ҳолатда токнинг юзага келиши ички ҳажмий зарядлар ҳосил қиладиган ички потенциаллар фарқи туфайли амалга оширилади. Уни ҳажмий зарядлар билан чекланган токнинг юзага келиши дейилади. У ҳолда $i\text{-}a\text{-Si:H}$ нинг сирт қатламида фотогенерацияланган коваклар $a\text{-Si:H}$ ни ичкараси томон бутун ҳажм бўйича ҳаракатланади ва улар яримўтказгичнинг ҳаракатчанлик тирқишидаги зарядли ҳолатлари билан ўзаро таъсирлашади. Натижада коваклар валент соҳа думидаги тутқичларда ва D⁰-марказларда тутилиб, фаоллашади деб ҳисоблаймиз. Бунинг натижасида узлуксизлик, Пуассон ва қайта зарядланиш кинетик тенгламаларини мос равишда, қуйидаги кўринишда ёзамиз

$$j = ep\mu_p E, \quad (27)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\epsilon} (p + N_2(f-1) + N_1), \quad (28)$$

$$N_2 \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{p}{\tau_p} (1-f) \frac{N_2}{N_1} - G_T, \quad (29)$$

бу ерда p – инжекцияланган коваклар концентрацияси, N_1 ва N_2 мос равишда, валент соҳа думидаги тутқичлар ва D-марказлар концентрацияси, G_T – ковакларнинг термик генерация коэффициенти, f – тутқичларнинг тўлиш коэффициенти.

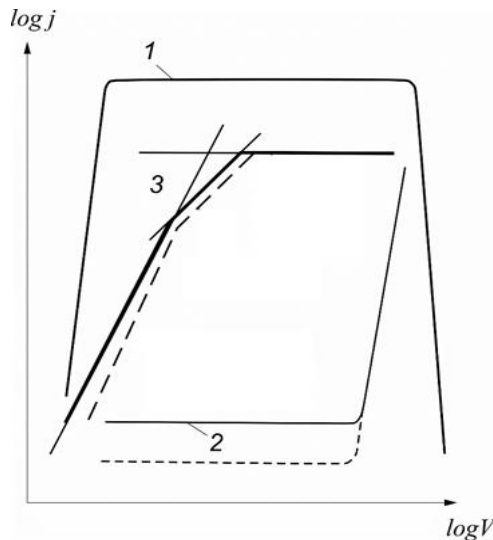
Тенглама (27)да $a\text{-Si:H}$ да диффузия коэффициенти кичик бўлгани учун диффузия тоқларини ҳисобга олмадик. Тенгламалар системасининг тўғридан тўғри аналитик ечимини топиш мумкин эмас, чунки видикон нишонининг фотоВАХи бир неча қисмдан иборат (3-расм). Шунинг учун тенгламалар системаси, ташқи кучланишга ва ёруғлик интенсивлигига боғлиқлигидан, ҳажмий зарядлар соҳасига инжекцияланадиган коваклар концентрацияси билан тутқичларда фаоллашган коваклар концентрацияси орасидаги муносабатга қараб, аналитик ҳолда ечилади.

Кичик кучланишларда инжекцияланган коваклар концентрацияси p билан ҳажмий зарядлар соҳасидаги асосий ток ташувчилар концентрация орасида p_0 қуйидаги $p < p_0$ муносабат ўринли бўлади. Бундан ташқари ток

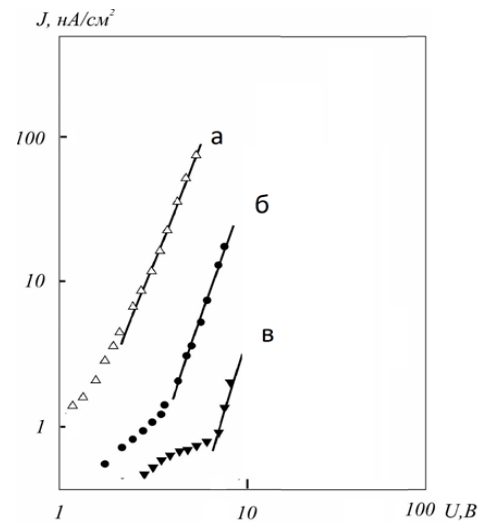
ташувчиларнинг чуқур сатҳдаги тутқичлар билан ўзаро таъсирлашувини ҳисобга олмаймиз. Токни фақат термик фаоллашган ковакларгина ташийди, у ҳолда $p = \text{const}$ шартдан қуйидагига эга бўламиз

$$j = e p \mu_p \frac{U}{L} \quad (30)$$

бу ифода Ом қонуни бўлиб, фото-ВАХда ушбу соҳа фақат паст ҳароратлардагина юзага келади (4- расм).



3-расм. Нишонни идеал фотоВАХи: 1-электрон нурлари учиб ўтиш хоссаси билан аниқланадиган фототокни юқори чегараси; 2-қоронғуликдаги нишон токини қуйи чегараси; 3-Фототок (Боғланишни ҳар учта қисмида ташувчиларни кўчиш жараёни майдонга турлича боғланади); Штрихли боғланиш - пасайтирилган температуралардаги ВАХ.



4-расм. Турли температураларда олинган фазовий заряд билан чегараланган соҳадаги фотоВАХ. Фотон оқими $1,4 \cdot 10^{12}$ фотон/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$), $d=4$ мкм. а. 302 К, б. 262 К, в. 220 К [31; 141 б.]

Кучланишни ортиб бориши билан ҳажмий зарядлар соҳасига инжекцияланадиган коваклар концентрацияси ҳам ортиб боради. Бунинг натижасида

$$p \approx N_2(f-1) + N_1 \quad (31)$$

муносабат ва ўз навбатида $p \gg p_0$ тенгсизлик ўринли бўлади. (31) дан

$$p + N_2(f-1) + N_1 = A[N_2(f-1) + N_1] \quad (32)$$

муносабатга эга бўламиз. Бу ерда $A > 1$ шарт бажарилади. (32) ва (28) муносабатларни ҳисобга олиб Пуассон тенгламасини қуйидагича ёзамиз

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} A[N_2(f-1) + N_1] \quad (33)$$

Импульсни частотаси кичик бўлгани учун видиконни ишлаш режимини квазистационар деб ҳисоблаб, яъни

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx 0 \quad \text{дан} \quad (1-f)N_2 = G\tau_p \frac{N_1}{p} \quad (34)$$

ифодага эга бўламиз.

Куйидаги ифодалар (27) ва (34)дан фойдалансак Пуассон тенгламаси куйидаги кўринишга келади

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} AN_1 \left[1 + e\mu_p G\tau_p \frac{E}{j} \right] = \frac{dE}{dx}. \quad (35)$$

Ушбу иккинчи тартибли дифференциал тенгламани интеграллаш учун интегралнинг куйи чегараси маълум бўлиши керак. Юқорида кўрдикки, ёруғликнинг $a\text{-Si:H}$ юза қисмида ютилиши ҳисобига коваклар “резервуари” ҳосил бўлар эди. Ушбу “резервуар” қатламини энергетик диаграммаси 2-расмда келтирилган. Ташқи кучланиш қийматига боғлиқ ҳолда соҳани ажратувчи эгри чизиқ пасайиши мумкин. Шу эгри чизиқни минимум нуқтасида майдон кучланганлиги нолга тенг бўлади. Коваклар эса максимал потенциал энергияга эга бўлади. Худди шу нуқта “виртуал катод” ҳисобланади ва у куйидагича формула орқали ҳисобланади

$$x_0 = L_0 \ln \left(\frac{e\mu_p E}{2\pi j} \right), \quad (36)$$

бу ерда $L_0 = \frac{kT}{eE}$

Ифода (36) дан кўриниб турибдики, кучланиш ортиши билан x_0 ни қиймати кичрайиб боради ва ўз навбатида ҳажмий зарядлар соҳаси кенгаяди. Тенглама (35)ни интеграллаб куйидаги ифодага эга бўламиз

$$V = \frac{2V_p}{\alpha} \left[\left(1 - \frac{x}{L} \right) - \frac{1}{\alpha} \left(1 - \exp(-\alpha) \left(1 - \frac{x}{L} \right) \right) \right]. \quad (37)$$

Бу ерда V_p - ковак тутқичларни батамом тўлиш кучланиши

Ушбу ифодага куйидаги белгилашларни киритдик

$$V_p = \frac{eN_1 L^2}{\varepsilon}; \quad \alpha = \frac{4\pi A e \mu_p G \tau_p N_1}{j \varepsilon}. \quad (38)$$

(37) ифодани соддалаштириш учун унда қатнашаётган экспоненциал ҳадни қаторга ёйиб, керакли муносабатларни ҳисобга олсак куйидаги ифодага эга бўламиз

$$V = V_p \left[1 - \frac{2L_0}{L} \ln \left(\frac{e\mu_p G \tau_p E}{2\pi j} \right) - \frac{\alpha}{3} \right]. \quad (39)$$

Ушбу ифодадаги логарифмик ҳадда инжекцияланган коваклар концентрацияси ва ток кучи иштирок этади.

Дастлабки инжекцияланган коваклар концентрацияси жуда кичик бўлгани учун

$$\alpha \gg \frac{6L_0}{L} \ln \left(\frac{e\mu_p G \tau_p E}{2\pi j} \right) \quad (40)$$

муносабат бажарилади. У ҳолда (39) ифодани куйидагича кўринишда ёзамиз

$$V = V_p \left[1 - \frac{\alpha}{3} \right]. \quad (41)$$

(38) тенгламадан фойдаланиб, ток зичлигини кучланишга боғланишини топиш мумкин.

$$j = \frac{4\pi A e \mu_p G \tau_p N_1}{3 \left(1 - \frac{V}{V_p}\right)}. \quad (42)$$

Маълумки, инъекцияланган коваклар концентрациясини ортиши билан қаралаётган ҳажмий зарядлар соҳасининг ўтказувчанлиги бир неча марта ортиб, α катталиқнинг қийматини камайишига олиб келади. Шунинг учун кучланишни қандайдир қийматида қуйидаги муносабат ўринли бўлиши келиб чиқади

$$\alpha \ll \frac{6L_0}{L} \ln \left(\frac{e \mu_p G \tau_p E}{2\pi j} \right). \quad (43)$$

У ҳолда (39) ифода қуйидаги кўринишга эга бўлади.

$$j = \frac{e \mu_p p E}{2\pi} \exp \left(- \left(1 - \frac{V}{V_p}\right) \frac{L}{L_0} \right) \quad (44)$$

Шундан сўнг кучланиш ортиши билан инъекцияланаётган коваклар концентрацияси ортиб, тутқичларда тутилиб, фаоллашиб турувчи коваклар билан қуйидаги муносабатда бўлади

$$p > N_1 + (1-f)N_2. \quad (45)$$

Маълумки, инъекцияланган коваклар концентрацияси ташқи кучланиш таъсирида

$$p = p_0 \exp \left(\frac{e(U - \varphi_0)}{kT} \right) \quad (46)$$

экспоненциал қонуният бўйича ўзгаради.

Кучланиш кичик оралиқда ўзгарганда (45) ифодада $p \approx \text{const}$ деб оламиз. У ҳолда (27), (28) ва (29) тенгламалар системаси учун қуйидагига эга бўламиз

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0, \quad (47)$$

$$j = e p \mu_p E, \quad (48)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} p. \quad (49)$$

Юқоридаги тенгламалардан j ва E ўртасидаги қуйидаги муносабат ўрнатилади

$$\frac{\mu_p \varepsilon E}{4\pi} \partial E = j \partial x. \quad (50)$$

Ушбу i - a - $Si:H$ қатламнинг ёруғлик ютилган соҳа қалинлиги ва i - қатлам қалинлиги L билан $x \ll L$ муносабатда бўлгани учун, интегрални қуйи чегараси сифатида нол қийматни олишимиз мумкин. Шунини ҳисобга олсак

$$j = \frac{\varepsilon \mu_p U^2}{8\pi L^3} \quad (51)$$

ифодага эга бўламиз. (51) ифода бизга маълум бўлган Мотт қонуни ёки квадратик қонунини ифода қилади. Юқорида келтириб чиқарилган ифода фақатгина ковак ҳаракатчанлигига боғлиқ бўлиб, ковакларнинг бошқа параметрларига боғлиқ эмас. Аммо, аслида ВАХнинг ушбу соҳасини ҳақиқий тавсифи ковакларнинг концентрациясига, яшаш вақтига ва бошқа

катталикларига боғлиқ. Бу боғлиқлик ёруғликка сезгирлиги ўта катта ва “ўта бойитилган” контактларда кучланишни ортиши билан намоён бўлади, яъни $j \sim U^2$ боғланишдан $j \sim U^m$ ($2 < m < 4$) боғланишга ўтади. Шунинг учун (51) ифодага қуйидагича ўзгартириш киритамиз

$$j = \frac{\varepsilon}{4\pi\sigma_p} \frac{\sigma_p \mu_p}{2} \frac{U^2}{L^3} \quad (52)$$

бу ерда $\tau_m = \frac{\varepsilon}{4\pi\sigma_p}$ - Максвелл релаксация вақти бўлиб, кучланиш ортиши

билан у камайиб боради. Квадратик қонун бажариладиган ВАХ соҳанинг чегарасида τ_m энг кичик қийматга эришиб, қуйидаги муносабат орқали

аниқланади $\tau_m \sim t_y$, бу ерда $t_y = \frac{L}{\langle g \rangle}$ ёки $t_y = \frac{L^2}{\mu}$ ифода ковакларнинг L

қалинликдаги i - a - $Si:H$ қатламини босиб ўтиш вақти. Ушбу муносабат бажарилгандан сўнг (52) ифодада фақатгина учиб ўтиш вақти қатнашади ва у асосан ташқи кучланишга боғлиқ бўлади. Бундан ташқари, $\sigma = e\rho\mu_p$ эканлигидан (52) ифодани қуйидаги кўринишда ёзишимиз мумкин

$$j = \frac{1}{2} \text{теп} \mu_p^2 \frac{U^2}{L^3} \quad (53)$$

бу ерда U кучланиш бутун структурага тушаётган кучланишдир. Кичик токларда i - a - $Si:H$ қатлам солиштирма қаршилиги қолган қатламлар солиштирма қаршилигидан ниҳоятда катта бўлгани учун ($\rho_0 \gg \rho_R$), барча ташқи кучланиш i - a - $Si:H$ қатламга тушади. Аммо i - a - $Si:H$ қатламга инжекцияланаётган коваклар концентрацияси ортиши билан ҳажмий зарядлар соҳасининг қаршилигини камайиши ҳисобига унга тушаётган кучланиш улуши камайиб боради. Шунинг учун айнан шу соҳа учун коваклар концентрацияси ташқи кучланишга боғлиқ ҳолда инжекцияланаётган коваклар концентрацияси

$$p = p_0 \exp\left(\frac{e(U - \varphi_0)}{kT}\right) \quad (54)$$

кўринишда ўзгаради деб ҳисоблаб, $U \approx \varphi_0$ атрофида (54) ифодани қаторга ёямиз ва дастлабки ҳадларини оламиз. Чунки ВАХни ушбу соҳасида i - a - $Si:H$ қатламнинг ҳажмий зарядлар соҳасига тушаётган кучланиши кичик кучланиш оралиғида жойлашганлиги учун қаторнинг кейинги ҳадлари қийматини ҳисобга олмаса ҳам бўлади. Юқоридагилардан ВАХ учун қуйидаги боғланишни оламиз

$$J \sim A \cdot U^m \quad m \geq 2 \quad (55)$$

Демак, фотоВАХ учун бешта аналитик ифода олинди. Олинган барча аналитик ифодалар кичик ёруғлик интенсивлигида ва паст ҳароратларда олинган фотоВАХ графигида кузатилади. Бу эса, барча фаразларимизнинг тўғрилигини яна бир бор тасдиқлайди.

Диссертациянинг “**Фотоэлектрик қурилмаларни фото вольт – ампер характеристикаси ва ковакларни ток ташиш механизми**” деб номланган **тўртинчи бобида** фотоВАХнинг ҳар бир соҳасида коваклар ва уларга таъсир

этувчи ҳаракатчанлик тирқишидаги зарядли ҳолатларнинг параметрларини қандай шартлар бажарилганда аниқланиши мумкинлигини асослари кўрсатиб берилган. Кучланишни иккита қийматига мос ҳолда фототок қийматини (52) формулага кўра қуйидагича ёзамиз

$$j_1 = Bp_1 \frac{U_1^n}{L}, \quad j_2 = Bp_2 \frac{U_2^n}{L}. \quad (56)$$

U_1 ва U_2 кучланишларга мос p_1 ва p_2 тутқичларда тутилган коваклар концентрациялари ифодаларини логарифлаб, ҳадма ҳад айиргандан сўнг қуйидаги ифодага эга бўламиз

$$\delta E_F = kT \ln \left[\frac{j_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^n}{j_2} \right]. \quad (57)$$

Тутқичларда тутилган коваклар концентрациясининг ўзгариши $\delta N = \frac{\delta Q}{e}$ бўлади. δQ – ҳажмий зарядлар соҳасидаги инжекцияланган заряд миқдори бўлиб, соҳа кенглиги бўйлаб чизикли ўзгаради деймиз ва заряд миқдори орқали ковакларнинг тутқичлардаги тақсимот функциясини топиш учун

$$g_0(E) \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) = \frac{\varepsilon(U_2 - U_1)}{4\pi d} \left[kT \ln \left[\frac{j_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^n}{j_2} \right] \right]^{-1} \quad (58)$$

ушбу ифодадан фойдаланамиз. Турли ҳароратларда олинган фотоВАХдан фойдаланиб, уларга мос ток қийматлари орқали тутқичлар ҳолат зичлигини ҳароратга боғланишини топамиз. Ушбу тутқичлар Ферми квазисатҳи ва валент соҳа оралиғида жойлашганини ҳисобга олиб, ҳаракатчанлик тирқишидаги жойлашувни

$$j = e\mu_v \frac{U^n}{d} N_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_F^* - \varepsilon_v}{kT}\right) \quad (59)$$

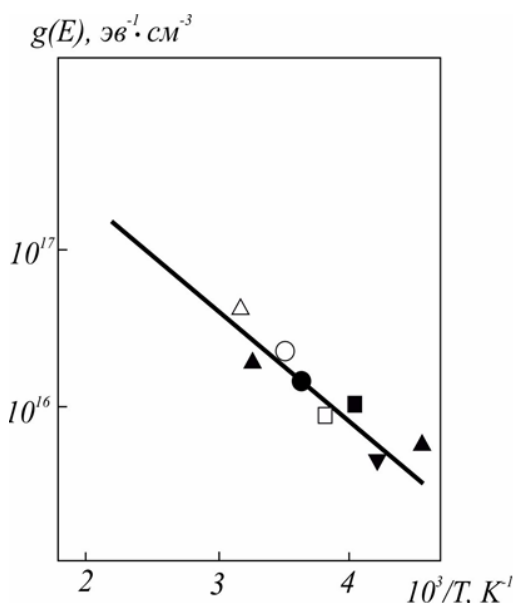
ифода орқали аниқлашимиз мумкин. 6-расмда келтирилган графикдан фойдаланиб, $g_0(E)$ нинг қиймати аниқланганда $g_0(E) \sim 10^{18} \text{ см}^{-3} \text{ эВ}^{-1}$, $\varepsilon_F^* \sim 0,45 \pm 0,05 \text{ эВ}$ ва $\Delta E = 0,33 \pm 0,03 \text{ эВ}$ қийматлар олинган.

Булардан кўринадики, заряд ташувчи коваклар ҳаракатчанлиги *i-a-Si:N*нинг ҳаракатчанлик тирқишида валент соҳа ε_v дан $\varepsilon_F^* = 0,45 \pm 0,05 \text{ эВ}$ юқорида $0,33 \pm 0,03 \text{ эВ}$ энергетик кенгликда жойлашган тутқичлар орқали чегараланар экан. Ушбу олинган натижалар тажрибаларда олинган натижалар билан мос келади.

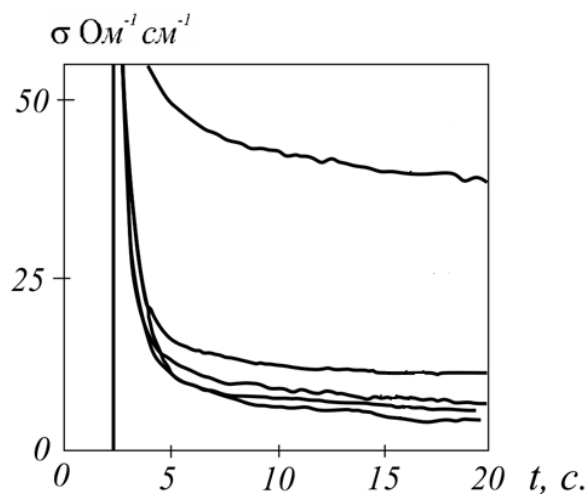
Биз таклиф этган усул ёрдамида юқоридаги ишчи (58) ва (59) ифодалардаги барча катталикларни, яъни μ_p , N_0 ларни тадқиқ қилинаётган наъмуна учун 3-бобда келтирилган фото ВАХ соҳаларининг чегаравий нуқталаридан фойдаланган ҳолда ҳам топилади. Бу эса олинган натижаларнинг ишончлилигини орттиради. Чунки бошқа илмий ишларда ушбу катталиклар турли хил структураларда турли усуллар билан олинган. Бундан ташқари ковакларнинг тутилиш коэффицентини ҳам видикон нишони ёрдамида *p-i-n* структура учун олинган фототокни қолдик

қийматидан аниқлашимиз мумкин. Бунинг учун қуйидаги формуладан фойдаланамиз (6-расм)

$$\gamma_{\text{тр}} = \frac{\eta}{100\tau_p N_t} \quad (60)$$



5-расм. Холат зичлигини температурага боғланиши [5A; 134-136 б.]



6-расм. Кўк (420 нм) ёруғлик учун $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ электрон тўсувчи қатламли *a-Si:H* нишонларининг фотоэлектрик ўтказувчанлик оралиғи. [70; 251-254]

Ушбу ифодадаги барча катталикларни фотоВАХни турли соҳаларидан аниқлаймиз. Олинган қийматлардан фойдаланиб тутилиш коэффициентини $\gamma_{\text{тр}} = 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}$ атрофида баҳолашимиз мумкин. Бу қийматлар бошқа тажрибаларда олинган қийматларга мос келади. Юқоридаги айтилган қолдиқ фототок тутқичлар концентрациясига боғлиқ бўлиб, уларни концентрациясини ўзгартириш билан ковакларнинг тутилиш коэффициентини ўзгартиришимиз мумкин экан. Тутқичлар концентрациясининг ўзгаришини қуйидагича тушунтириш мумкин. *a-Si:H* пардалар бор (В) элементи билан легирланганда D-марказларни қайта зарядланиши қуйидаги кўринишда содир бўлади $\text{D}^0 + \text{h} \rightarrow \text{D}^+$.

Демак коваклар учун асосий тутқич вазифасини бажарган D^0 -марказлар концентрацияси камаяди. Бу эса ўз навбатида N_t катталиқнинг қийматини камайишига олиб келади.

Юқоридагиларни ҳисобга олсак ковакларнинг ҳаракатчанлиги, яшаш вақти, тутилиш коэффициенти асосан валент соҳа E_V дан 0,45-0,6 ЭВ юқорида ётган D^0 марказлар параметрлари билан боғлиқлиги келиб чиқади.

Шунинг учун D^0 -марказлар концентрациясини камайтириш ҳисобига ковакларнинг ток ташувчанлик механизмини яхшилашимиз мумкин. Бу эса ўз навбатида фотоэлементларнинг, шу жумладан қуёш элементларининг самарадорлигини 2-3% га орттиришга олиб келади.

ХУЛОСА

Гидрогенизацияланган аморф кремний асосидаги қуёш элементларида коваклар электр ташувчанлигининг фотоэлектрик хосларини аниқлаш асосида қуйидаги хулосаларга келинди:

1. Қуёш элементини фаол қисми бўлган $i-a-Si:H$ қатламда фотоэлектрик ўтказувчанликни ҳароратга боғлиқлиги орқали фақат бир турдаги ток ташувчилар зарядларининг фотоэлектрик параметрларини бир қийматли аниқлаб бўлмаслиги назарий асосланди;

2. Катта қалинликдаги $a-Si:H$ да қалинлик бўйлаб ёруғликни нотекис ютилиши ҳисобига шу қатламнинг ўзида монохроматик ёруғлик билан ёритилганда потенциал тўсиқ юзага келиши ва бу тўсиқни юзага келишига ҳаракатчанлик тирқишидаги Гаусс тақсимооти бўйича тақсимланган нуқсон ҳолатлари сабаб бўлиши аниқланди;

3. Ташқи кучланиш бўлмаганда гидрогенизацияланган аморф кремнийда ёруғликнинг нотекис ютилиши туфайли хосил бўлган потенциал ва коваклар концентрацияси тақсимооти аниқланди ҳамда ушбу тақсимоот ёруғлик ютилмаган қатламидаги эркин зарядлар концентрациясига боғлиқ эмаслиги кўрсатиб берилди;

4. Ташқи кучланишга боғлиқ ҳолда $p-i-n$ структуралар учун олинган фотоВАХнинг бир неча қисмларлардан иборатлиги ва бу қисмларнинг юзага келишида фотогенерацияланган коваклар концентрацияси билан $a-Si:H$ нинг ҳаракатчанлик тирқишидаги зарядли ҳолатлар концентрацияси ўртасидаги боғлиқлик асосий ўрин тутиши аниқланди ҳамда ҳар бир қисм учун аналитик ифодалар келтириб чиқарилди;

5. $a-Si:H$ асосидаги $p-i-n$ структурали фотоэлементлар фотоВАХидан фойдаланиб, ковакларнинг ток ташиш механизмига таъсир қилувчи ҳаракатчанлик тирқишидаги зарядли ҳолатларнинг турли параметрлари қийматлари аниқланди;

6. $a-Si:H$ асосидаги $p-i-n$ структурали фотоэлементларда ток ташиш механизмига таъсир ўтказувчи параметрларнинг ўзгартириши эвазига қуёш батареяларининг самарадорлигини ортириш йўллари кўрсатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.08.2019.FM/T.01.12 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

НАМАНГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

НАБИЕВ АЪЗАМЖОН БОТИРЖОНОВИЧ

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА
ДЫРОК В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ *a-Si:H***

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент–2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2019.1.PhD/FM320.

Диссертация выполнена в Наманганском государственном университете.

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

Научный руководитель: **Зайнабидинов Сиражидин Зайнабидинович**
доктор физико-математических наук, профессор,
академик

Официальные оппоненты: **Имамов Эркин Зуннунович**
доктор физико-математических наук, профессор
Дадамирзаев Мухаммаджон Гуломкодилович
доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: Ферганский государственный университет

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в __ часов на заседании Научного совета DSc.30.08.2019.FM/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 № ____). Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248–79–59.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2019 года
(реестр протокола рассылки № __ от «__» _____ 2019 г.).

Ш.Б.Утамурадова
председатель Научного совета по присуждению
ученой степени, д.ф.-м.н., профессор
С.С.Насридинов
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученой степени, д.т.н., доцент
А.Т.Мамадалимов
председатель Научного семинара при Научном
совете по присуждению ученой степени,
д.ф.-м.н., профессор, академик

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире в последнее десятилетие наблюдается интенсивное развитие возобновляемых источников энергии, особенно, фотоэнергетики. При создании солнечных элементов, с меньшей себестоимости и с большой полезной площадью растет интерес к основному материалу гидрогенизированного аморфного кремния и его модификациям. Одной из причин такого интереса является возникновение возможности создания многослойных солнечных элементов, высокоэффективных моделей с использованием гидрогенизированного аморфного кремния и его модификации. Кроме этого, с научной и практической точки зрения гидрогенизированный аморфный кремний считается одним из перспективных полупроводников с высокой фотоэлектрической проводимостью, имеющий высокий коэффициент поглощения в широком спектральном диапазоне и легирование этого материала дает возможность исследователям получить материал с улучшенными свойствами.

В настоящее время в научном мире большое внимание уделяется изучению новых свойств, возникающих в контактных областях многослойных и многокаскадных солнечных элементов, созданных на основе полупроводников, особенно гидрогенизированного аморфного кремния и его модификаций, а также их влияние на параметры носителей тока. В этом аспекте проведение целевых научных исследований в нижеприведенных направлениях считается одной из основных задач: определение распределения потенциала между слоями из-за неровномерного поглощения света в гидрогенизированном аморфном кремнии; определение условий получения фототока только с одним типом носителей заряда в *p-i-n* структурах, на основе гидрогенизированного аморфного кремния; теоретический анализ фото вольт-амперных характеристик (фотоВАХ) *p-i-n* структур используя результаты анализа ввести ясность в изменении параметров носителей одного типа.

В последние годы в развитии науки нашей Республики большое внимание уделяется, фотоэнергетике, в частности исследованиям условий эффективной работы солнечных модулей на основе монокристаллического и поликристаллического кремния. В этом аспекте сделано достаточно много работ, проведены фундаментальные исследования для создания солнечных элементов, с использованием различных многослойных модификаций и гетеропереходов и разработаны множество предложений для повышения их коэффициента полезного действия (КПД).

В Стратегии действий¹ по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены цели стимулирования научных исследований и инноваций, внедрения энергосберегающих

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года // Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г., № 6, ст. 70, № 20, ст. 354, № 23, ст. 448, № 29, ст. 683, ст. 685, № 34, ст. 874, № 37, ст. 982.

технологий в производство и расширения использования возобновляемых источников энергии. В связи с этим разработка эффективных солнечных элементов на основе дешевых полупроводниковых материалов имеет важное значение. Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в ряде указов и постановлений Президента страны, в том числе в четвертом направлении из пяти приоритетных направлений, приведённых в Указе Президента № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, в Постановлениях Президента № ПП-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 и изложенных в соответствующих законодательных актах.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данная исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – Ф2. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Степень изученности проблемы. Зависимости носителей тока на характеристики активных слоев в фотоэлектрических приборах, созданных на основе гидрогенизированного аморфного кремния были изучены американскими учеными Е.А.Шиффом, Р.К.Лекомбером, Р.А.Стритом и японцем И.Хамокава.

Несколькими научно-исследовательскими группами городов Москвы и Санкт-Петербурга, используя экспериментальные результаты зависимости фотоэлектрической проводимости от температуры, в основном, были исследованы расположение рекомбинационных центров и механизмы рекомбинационных процессов в гидрогенизированном аморфном кремнии и в его модификациях. В Санкт-Петербургском физико-техническом институте группой под руководством Е.И.Терукова¹ исследованы процессы токопереноса в структурах, на основе гидрогенизированного аморфного кремния. Научной группой под руководством профессора А.Г.Казанского² в Московском государственном университете исследованы, в основном, компланарные структуры.

Ученые из Узбекистана Р.А.Муминов, А.Т.Мамадалимов, М.К.Бахадирханов, С.З.Зайнабидинов, Г.Г.Гулямов, Э.З.Имамов, Р.Я.Расулов и Р.Г.Икрамов в своих научных исследованиях изучили влияние различных внешних воздействий на носителей тока и происходящих процессов в солнечных элементах на основе моно-, поли-, нано- и гидрогенизированном аморфном кремнии.

¹ E.I. Terukov, Yu. V. Kryuchenko, A.V. Sachenko, A.V. Bobyl, V.P. Kostilyov, P.N. Romanets, I.O. Sokolovskyi, A.I. Shkrebtii., Efficiency a-Si:H solar cell. Detailed theory. Semiconductors Physics, 2012, V. 15, № 2, с. 91-116.

² Казанский А.Г., Кошелев О.Г., Сазонов А.Ю., Хомич А.А. Фотопроводимост тонких пленок аморфного гидрированного кремния. ФТП, Т. 42, 2008, -В. 2. -с.192-194.

Однако, до настоящего времени практически не изучены образование фототока, возникающего за счет неравномерного поглощения света и её зависимости от напряжения и потенциального барьера в структурах, на основе толстослойного гидрогенизированного аморфного кремния, созданного из одного типа носителей тока.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Андижанского и Наманганского государственных университетов по темам ОТ-Ф2-002 «Стимулированные внешним воздействием (термическим, оптическим и радиационным) процессов переноса неравновесных носителей заряда в поли- и нанокристаллических, а также аморфных кремниевых структурах» (2007–2011 гг.); ОТ-Ф2-28 «Кванторазмерные эффекты на поверхности и в объеме легированного кремния, и их воздействие на фотогенерационных и рекомбинационных процессов носителей заряда в $p-n$ -структурах» (2012–2016 гг.).

Целью исследования является изучение процессов электрпроводимости дырок в солнечных элементах на основе $a-Si:H$

Задача исследования:

определить оптимальные условия получения фототока из одного типа проводимости в $p-i-n$ структурах на основе $a-Si:H$;

выявить механизм возникновения энергетического потенциального барьера на активных слоях $p-i-n$ структур, вследствие неравномерного поглощения света;

получить аналитические выражения для различных случаев с использованием уравнения Пуассона, уравнения непрерывности и кинетического уравнения перезарядки для фотоВАХ $p-i-n$ структур на основе $a-Si:H$;

установить области фотоВАХ, которые дают возможность определить однозначные фотоэлектрические параметры тока дырок;

определить ширину распределения энергии и концентрацию носителей заряда в щели подвижности, влияющих на участие дырок при переносе тока.

Объектом исследования является гидрогенизированный аморфный кремний ($a-Si:H$).

Предметом исследования являются механизмы токопереноса дырок, с помощью графических зависимостей фотоэлектрической проводимости гидрогенизированного аморфного кремния от напряжения и температуры, при стационарном и квазистационарном освещении.

Методы исследования. Уравнения Пуассона, уравнение непрерывности, кинетическое уравнение перезарядки, формула Гаусса для распределения зарядовых состояний, метод разложения в ряд различных функций.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые выявлено присутствие потенциального барьера между двумя областями, появляющийся из-за наличия концентрации различных типов носителей в одном слое, в результате неравномерного поглощения света по всей толщине;

определены условия появления фототока в области только с одним типом носителей тока, появляющейся из-за неравномерного поглощения света на *p-i-n* структурах;

впервые установлены закономерности в прямой ветви ВАХ гидрогенизированного аморфного кремния;

теоретически обоснованы возможности определения фотоэлектрических параметров дырок в гидрогенизированном аморфном кремнии;

предложен метод определения значений энергетических уровней и концентрации дефектов в щели подвижности, влияющих на движение дырок.

Практическими результатами исследования являются создания возможностей повышения эффективности и получения информации о всех фотоэлектрических параметрах носителей тока из дырок в фотоэлектрических приборах, на основе гидрогенизированного аморфного кремния.

Достоверность результатов исследований обосновывается совпадением полученных результатов из теоретических расчетов с экспериментальными результатами.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость исследования заключается в возможности изучения образования дополнительного потенциального барьера в многослойных фотоэлементах с толстым активным слоем, в основном, в солнечных элементах, при неравномерном поглощении света, а также влияние этого барьера на проводимость дырок, с помощью фотоВАХ ограниченной объемными зарядами.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности повышения эффективности солнечных элементов.

Внедрение результатов исследования. На основе исследований фотоэлектрических свойств электропроводности дырок в солнечных элементах, на основе *a-Si:H*:

Повышение эффективности фотоэлектрических установок, путем определения механизма электропроводности дырок и оптимизации концентрации зарядных состояний в щели подвижности в солнечных элементах на основе *a-Si:H*, использован в акционерном обществе «ФОТОН» в производстве полупроводниковых электронных установок. Использование научных результатов позволило повысить производительность солнечных элементов (Справка № 04-4/1827 Акционерной компании «Уэлтехсаноат» от 13 ноября 2019 года).

Возникновение двух областей, с различными концентрациями носителей тока в одном слое, в результате неравномерного поглощения света по толщине слоя и определение существования барьера между ними, используя

аналитическое выражение, полученное на основе теоретического анализа графика зависимости фототока от напряжения, теоретические анализы графиков, полученные в результате опытов были использованы при выполнении фундаментальных проектов F2-OT-O-15494 “Улучшение эффективности излучателей, фотоэлементов и других оптоэлектронных приборов на основе исследования явления переноса и экситонов, поляронов, биполяронов в наноструктурах и гетероквантовых точках” и Ф-2-21 «Математическое моделирование плотности поверхностных состояний на границе полупроводник-диэлектрик» Использование научных результатов позволило повысить эффективность фотоэлементов и оптоэлектронных приборов других видов (Справка № 89-03-4392 от 11.11.2019 года Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан).

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации обсуждались на 5 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 17 научных трудов, из них 8 научных статей, в том числе 5 в республиканских и 3 в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка опубликованных работ, списка использованной литературы из 98 наименований и изложена на 124 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновываются актуальность и необходимость темы диссертации показано соответствие исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и технологии в Республике Узбекистан, приведены обзоры иностранных научно-исследовательских работ и степень изученности проблем по теме диссертации, описаны цель, задачи, объект и предмет исследования, изложена научная новизна исследования и практические результаты, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов, дана информация об опубликованных работах по теме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием «**Рекомбинационные процессы и фотоэлектрическая проводимость гидрогенизированного аморфного кремния**» проанализированы литературные данные по теме диссертации. Изучены результаты, вытекающие из взаимосвязи фотоэлектрических параметров с эффективностью солнечных элементов, на основе гидрогенизированного аморфного кремния. Из известных зависимостей фотоэлектрической проводимости от температуры, спектральной распределении коэффициента поглощения и люкс-амперной характеристики исследованы зависимости подвижности дырок μ_p и время жизни τ_p от энергетического расположения уровня Ферми в пленках $a\text{-Si:H}$, плотности состояний зарядов в щели подвижности и их природы, а также от уровня легирования. Показаны, что при изучении механизма проводимости тока дырками в солнечных элементах и фотоэлектрических приборах $a\text{-Si:H}$, слабо и сильно легированных бором пленках $a\text{-Si:H(B)}$, недостаточно уделено внимание изучению распределения зарядов в щели подвижности, рекомбинационных процессов, вольт-амперной и люкс-амперной характеристики. Нами были изучены результаты многих работ, в которых на вольт-амперной характеристике наблюдаются сложные формы зависимостей, имеющие характерный схожий вид, а также отсутствие аналитических выражений, описывающие эти зависимости. На основе анализа литературных данных обосновано постановка задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием «**Методы изучения механизма проводимости тока в пленках $a\text{-Si:H}$ и в структурах на их основе зависимостей от фотоэлектрических параметров**» изучены параметры энергетических уровней Ферми, распределение зарядовых состояний в щели подвижности, среднее время жизни, подвижность зарядов, которые определяют механизм проводимости тока дырок и электронов в фотоэлектрических приборах, на основе гидрогенизированного аморфного кремния. При этом основное внимание было уделено на изучение параметров пленок $a\text{-Si:H}$ от сильной зависимости величин μ_p и μ_n . В этом случае используя уравнений электронейтральности и непрерывности запишем

$$\sigma = e\Delta n\mu_n + e\Delta p\mu_p, \quad (1)$$

$$\Delta N_0 \frac{\partial f}{\partial t} = p_t - p_{t0} + N_0^+ - N^+ + N_0^0 - N^0. \quad (2)$$

Поскольку пленки, на основе $a\text{-Si:H}$, слабо легированы бором, то в (1) можно принять $\Delta n \approx 0$. Кроме того, соотношение $\frac{\sigma_\phi}{\sigma_T} \approx 10^2 - 10^4$ позволяет учитывать в $p_t \gg p_{t0}$. Также будет справедливо условие $N^0 \gg N^+$, при рассмотрении в качестве основных рекомбинационных центров D^0 - центры, в пленках р-типа $a\text{-Si:H}$.

Тогда выражение $N_D = N_0^0 + N_0^+ = N^0 + N^+$ принимает вид $N_D \approx N^0$. Кроме этого при термодинамическом равновесии учитывая, условие $N_D \frac{\partial f}{\partial t} = 0$ из (2) имеем

$$p_t = N^0. \quad (3)$$

Поскольку ловушка для дырок распределяется на хвосте валентной зоны, то изменение избыточных дырок выражается в следующем виде

$$\frac{\Delta p}{p_t} = \frac{N_v}{N_{pt}} \exp\left(-\frac{E_v - E_{tp}}{kT}\right). \quad (4)$$

Используя формулы, описывающие скорость генерации и время жизни носителей тока выражение (4) можно написать в следующем виде

$$\Delta p = \left[\frac{GN_v}{C_p^0 N_{tp}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_v - E_{tp}}{2kT}\right), \quad (5)$$

Тогда для фотоэлектрической проводимости имеем

$$\sigma_{ph} = e\mu_p \left[\frac{GN_v}{C_p^0 N_{tp}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_v - E_{tp}}{2kT}\right). \quad (6)$$

Как видно из (6) в ней отсутствует величина τ_p . N_{tp} – эффективная концентрация ловушек для дырок. С ростом температуры эти ловушки заполняются, т.е. происходит полное заполнения ловушек (ПЗЛ). Для этого случая справедлива $\tau_p = \frac{1}{C_p^0 N_{tp}}$, следовательно (6) принимает следующий вид

$$\sigma_{ph} = e\mu_p (\tau_p)^{\frac{1}{2}} \cdot (GN_v)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_v - E_{tp}}{2kT}\right). \quad (7)$$

Из графиков б, в на рис. 1. видно, что выражение (7) соответствует экспоненциальному росту в интервале $120\text{K} < T < 250\text{K}$. Механизм рекомбинации для этого случая можно объяснить следующим образом: рост температуры активизирует дырки, находящихся в ловушках валентной зоны.

Это приводит к захвату дырок D^0 -центрами, т.е. начинается перезарядка $D^0 + e \rightarrow D^+$, а уменьшение концентрации D^0 -центров приводит к росту величины τ_p и следовательно росту σ_{ph} .

Следует отметить, что при низких температурах формула (7) не может описать температурную зависимость фотоэлектрической проводимости слабо легированных собственных пленок $a\text{-Si:H}$ и сильно легированных $a\text{-Si:H}(B)$. Это можно интерпретировать следующим образом. В слабо легированных, но

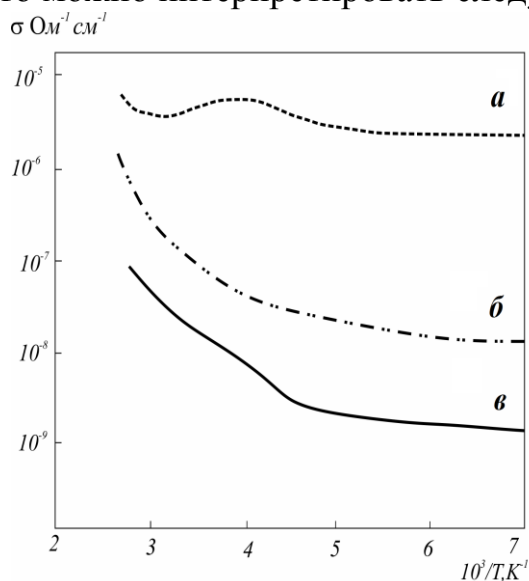


Рис.1. Зависимость проводимости от температуры для сильно легированных $a\text{-Si:H}(B)$ (б,в), слабо легированной но имеющий собственную проводимость пленок $a\text{-Si:H}$ (а) [48; б.54-57]

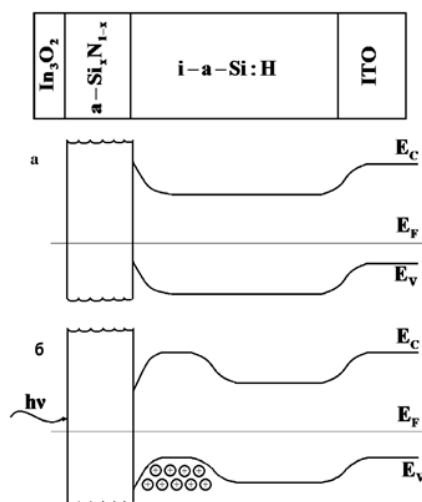


Рис.2. Зонная диаграмма мишени видикона до (а) и после (б) освещения светом слоев пленок [3А; 1010-1017 б].

имеющих собственную проводимость пленках $a\text{-Si:H}$ концентрация дефектов, образованных оборванными связями в щели подвижности будет минимальным. Под действием света относительные изменения центров D^0 и D^- возрастает и с термической активацией это разность увеличивается. Это приводит к уменьшению времени жизни дырок τ_p и увеличению времени жизни электронов τ_n . В результате общая фотоэлектрическая проводимость σ_{ph} изменяется слабо.

Описание подобных зависимостей, с помощью аналитических выражений сложно. Однако, в областях с слабой зависимостью фотоэлектрической проводимости от температуры определяется величина $\mu_n\tau_n$, а значит учитывая в формуле (1) $\mu_n\tau_n \gg \mu_p\tau_p$ получим

$$\sigma = eG\mu_n\tau_n, \quad (8)$$

и таким образом можно определить $\mu_n\tau_n$. Это означает, что в слабо легированных $a\text{-Si:H}$ дырочную проводимость нельзя определить методом температурной зависимости фотоэлектрической проводимости (SSPC).

Нужно отметить, что для каждого типа проводимости величины μ и τ сильно зависят от температуры, однако такие зависимости для слабо легированных пленок $a\text{-Si:H}$ не заметны. Такая зависимость наблюдается только в пленках $a\text{-Si:H}$ p - и n - типа.

Для того, чтобы подробно исследовать подобные величины, необходимо иметь проводимость только одного типа, т.е. дырочную или электронную. При этом необходимо изучить фотоэлектрическую проводимость солнечных

элементов с *p-i-n* структурой, с мишенью видикона или барьером Шоттки постепенно подавая обратное смещение. Падающий коротковолновый свет на мишени видикона поглощается в поверхности слоя *i-a-Si:H*. Поэтому, в приповерхностной части слоя *i-a-Si:H* образуется “резервуар” дырочных носителей тока. На рис. 2. приведены зонные диаграммы в слоях до (а) и после (б) освещения, полученные на мишени видикона.

В приповерхностном слое *i-a-Si:H* падающий свет поглощается во всех зарядовых состояниях и в щели подвижности *i-a-Si:H* дырки взаимодействуют с зарядовыми состояниями. Известно, что зарядовые состояния в щели подвижности и в хвосте валентной зоны, возникают из-за оборванных *Si-Si* связей D-центров.

Из литературных данных известно, что в *i-a-Si:H* в процессе носителей тока участвуют два типа D-центра, т. е. центры ловушек и центры рекомбинаций. Для электронов D⁻центры, а для дырок D⁰-центры. Учитывая выше изложенную общую картину плотность зарядовых состояний, в щели подвижности можно записать в виде суммы отдельных плотностей состояний

$$g(E) = g_v^{ur}(E) + g_c^{ur}(E) + g_D^G(E) + g_A^G(E),$$

где $g_v^{ur}(E)$ и $g_c^{ur}(E)$ плотности состояний на хвосте валентной и зоны проводимости. Они подчиняются экспоненциальному закону распределений

$$g_v^{ur}(E) = g_{v0} \cdot \exp\left(\frac{E_v - E}{E_D}\right), \quad (9)$$

$$g_c^{ur}(E) = g_{c0} \cdot \exp\left(\frac{E - E_c}{E_A}\right), \quad (10)$$

где g_{v0} и g_{c0} максимальные значения плотности состояний в потолке валентной зоны и на дне зоны проводимости. E_D и E_A характеристические акцепторные и донорные энергетические уровни.

Распределение D-центров в щели подвижности подчиняется распределению Гаусса

$$g_D^G(E) = g_{D0}^G(E) \cdot \frac{1}{\sigma_D \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(E - E_g + E_D)^2}{2\sigma_D^2}\right], \quad (11)$$

$$g_A^G(E) = g_{A0}^G(E) \cdot \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(E - E_A)^2}{2\sigma_A^2}\right]. \quad (12)$$

где $g_{D0}^G(E)$ и $g_{A0}^G(E)$ максимальные значения плотностей состояний распределения Гаусса для центров D⁻ и D⁰, соответственно. E_D и E_A максимальные значения донорного и акцепторного уровня.

Необходимо определить, какие именно энергетические состояния захваченных носителей заряда приводят к смещению уровня Ферми. Известно, что в фотоэлектрической проводимости мишени видикона участвуют только дырки, и следовательно выражения (9) и (12) можно отбросить, потому что с этими зарядовыми состояниями взаимодействуют электроны. Кроме того, с учётом $g_{v0} \approx 10^{21}$ см⁻³/эВ и $g_{A0} \approx 10^{18}$ см⁻³/эВ в

выражениях (9) и (11) относительно концентрации захваченных дырок имеет место неравенство $E_v - E \ll E - E_A$. При одинаковых интенсивностях падающего света относительная процентная доля фотонов, поглощаемых в D-центрах будет больше. Поэтому смещение уровня Ферми вызывается этим центром, и её можно найти только из уравнения (11).

С учетом вышеизложенных и считая падающий свет полностью поглощается, концентрация дырок захваченных на ловушках Δp , прямо пропорционально концентрации генерированных дырок Φ , из этого концентрация генерированных дырок можно вычислить по следующей формуле

$$\Delta p = \int_{E_v + E_a - \Delta E}^{E_v + E_a + \Delta E} [1 - f_D(E)] g_D^G(E) dE, \quad (13)$$

где $f_D(E)$ – коэффициент заполнения зарядового состояния, его можно вычислить по следующему соотношению

$$f_D(E) = \frac{2 \exp[(E_F - E)/kT]}{1 + 2 \exp[(E_F - E)/kT] + \exp[(2E_F - 2E - U)/kT]}. \quad (14)$$

Из (14) последовательным приближением можно найти значение ΔE . Из-за захвата дырок донорными центрами $-D^0$, находящихся на ниже уровне Ферми, уровень Ферми E_F смещается в сторону E_v на величину $2\Delta E$. Тогда высоту потенциального барьера можно принять

$$\phi \approx 2\Delta E \quad (15)$$

Концентрации D^0 и D-центров в щели подвижности $a\text{-Si:H}$ не превышают значения 10^{14} - 10^{16} см⁻³. Поэтому падающие на мишени видикона число фотонов тоже не превышает этого значения. В этой главе также описывается изменения области объёмного заряда в зависимости от интенсивности падающего света.

В третьей главе диссертации под названием **“Фото ВАХ мишени видикона на основе $i\text{-Si:H}$ и ее теоретический анализ”**, проанализированы изменения фотоВАХ мишени видикона, в зависимости от интенсивности света, температуры, электрического поля и характеризующие их уравнения. Если подать на мишени видикона обратное напряжения, то в проводимости участвует только дырки, и поэтому $i\text{-Si:H}$ слой можно рассмотреть как полупроводник p -типа проводимости. Чтобы найти потенциал и распределения дырок для плотности тока напишем следующие уравнения

$$j = e p \mu E + D \Delta p, \quad (16)$$

уравнение Пуассона

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\frac{4\pi}{\epsilon} \rho, \quad (17)$$

уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial t}. \quad (18)$$

Если считать, что дырки в течение своего движения взаимодействуют с ловушками в хвосте валентной зоны, расположенными в энергетическом уровне E_{tp} , и с D^0 -центрами, расположенными в энергетическом уровне E_A , тогда для плотности объемных зарядов можно записать $\rho = e(N_p + N_D - p)$.

Если считать, что значение стационарного тока $j = \text{const}$ слишком мало, тогда некоторая часть инжектированных дырок находится в термодинамическом равновесии с ловушками на энергетическом уровне E_{tp} . Кроме того учитывая соотношение Эйнштейна для коэффициента диффузии соотношения (16) и (17) можно переписать в следующем виде

$$j = e p \mu \frac{d\varphi}{dx} + \mu k T \frac{dp}{dx}, \quad (19)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi e}{\varepsilon} (p - p_{tp}), \quad (20)$$

где p – концентрация инжектированных дырок, p_{tp} – концентрация захваченных дырок на E_{tp} уровне. Если учесть малость фототока при низких значениях напряжения на графике фотоВАХ мишени видикона, то справедливо будет соотношение $j \approx 0$. Тогда (19) перепишем в виде

$$e p \mu \frac{d\varphi}{dx} = -\mu k T \frac{dp}{dx} \quad \text{и} \quad p = -p_k \exp \frac{e\varphi}{kT}, \quad (21)$$

где p_k – концентрация дырок в точке $x=0$ в пространстве объемного заряда и она подчиняется экспоненциальному закону

$$p_k = p_0 \exp \left(-\frac{e\varphi_0}{kT} \right), \quad (22)$$

из (21) и (22) имеем

$$p = -p_0 \exp \left(\frac{e(\varphi - \varphi_0)}{kT} \right). \quad (23)$$

Тогда подставляя (23) на (20) имеем

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} p_0 \left(1 - \exp \left(\frac{\varphi_0 - \varphi}{kT} \right) \right). \quad (24)$$

Из уравнения (24) получаем для “обогащенного” контакта выражение, описывающее распределение потенциала и концентрацию дырок

$$\varphi = -\frac{2kT}{e} \ln \left(1 - \frac{x}{a} \right), \quad (25)$$

$$p = p_0 \exp \frac{e\varphi}{kT} = p_0 \left(\frac{a}{a+x} \right)^2. \quad (26)$$

Из этих уравнений установлены, что основные носители заряда, находящиеся в области, где не поглощается свет, не влияют на распределение потенциала. В нашем случае свободные заряды – это дырки и их концентрация зависит от плотности состояний D-центров и ловушек в хвосте валентной зоны. Учитывая это, невозможно получить из уравнения Пуассона сведения о зарядовых состояниях для случая сильного обогащения. Чтобы получить такие сведения, т. е. для изучения влияния плотности зарядовых состояний в щели подвижности $a\text{-Si:H}$ на механизм переноса дырочного тока

необходимо ограничить интенсивность света сверху и только полученные в таких условиях фотоВАХ может дать сведения о параметрах дырок.

Для мишени видикона при подключении обратного напряжения получается фототок и образуется инжекция носителей тока. В таких ситуациях появление тока происходит за счет разности внутренних потенциалов, образующихся внутренними объемными зарядами и внешним напряжением. Его назовем током, ограниченным объемными зарядами. Тогда дырки, фотогенерируемые на поверхности i - a - $Si:H$ движутся во внутрь по всему объему взаимодействуют с зарядовыми состояниями в щели подвижности полупроводника. Вследствие этого можно считать, что дырки захватываются ловушками в хвосте валентной зоны и D^0 -центрами, а за тем, активируются. Тогда кинетические формулы Пуассона и перезарядки, уравнение непрерывности можем переписать в следующем виде

$$j = e p \mu_p E, \quad (27)$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} (p + N_2(f-1) + N_1), \quad (28)$$

$$N_2 \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{p}{\tau_p} (1-f) \frac{N_2}{N_1} - G_T, \quad (29)$$

где p - концентрация инжектированных дырок, N_1 ва N_2 концентрация ловушек в хвосте валентной зоны и D-центров, соответственно, G_T – коэффициент термической генерации дырок, f – коэффициент заполнения ловушек.

Из-за малости коэффициента диффузии в a - $Si:H$ в (27) не учтен диффузионный ток. Аналитическое решение системы уравнений не представляется возможным из-за сложной зависимости фотоВАХ мишени видикона, которая состоит из нескольких участков (рис.3).

В этой связи аналитическое решение системы уравнений получается в зависимости от соотношений между концентрациями ловушек и концентраций дырок, который инжектируются в области объемного заряда, в зависимости от интенсивности света и внешнего напряжения.

Между концентрацией дырок p , инжектированных при малых напряжениях и концентрацией основных носителей тока p_0 в области объемного заряда, выполняется соотношения $p < p_0$. Кроме того можно не учитывать взаимодействие носителей тока с глубокими ловушками. Величину тока обеспечивает только термически активированные дырки, тогда из этих условий имеем

$$j = e p \mu_p \frac{U}{L}, \quad (30)$$

которая выражает закон Ома, а это зависимость в фотоВАХ выполняется только при низких температурах (рис.4).

По мере роста напряжения в области объемного заряда концентрация инжектированных дырок растёт. В результате соотношение

$$p \approx N_2(f-1) + N_1, \quad (31)$$

и в свою очередь неравенство $p \gg p_0$ будет справедлив. Из (3.3.5) имеем

$$p + N_2(f - 1) + N_1 = A[N_2(f - 1) + N_1], \quad (32)$$

здесь выполняется условия $A > 1$. Исходя из (3.3.6) и (3.3.2) перепишем уравнения Пуассона

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} A[N_2(f - 1) + N_1]. \quad (33)$$

При низких частотах импульсов, режим работы видикона можно считать квазистационарным тогда имеем

$$(1 - f)N_2 = G\tau_p \frac{N_1}{p} \quad (34)$$

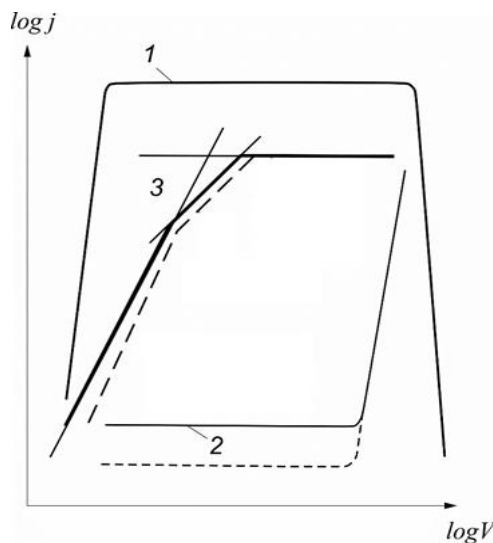


Рис.3. Идеальная фотоВАХ мишени: 1-верхний предел фототока определяемый пролетными свойствами электронного луча; 2-нижний предел темнового тока мишени; 3-фототок (на каждом из трех участков кривой процесс переноса носителей различным образом зависит от поля); штриховые кривые-ВАХ при пониженной температуре.

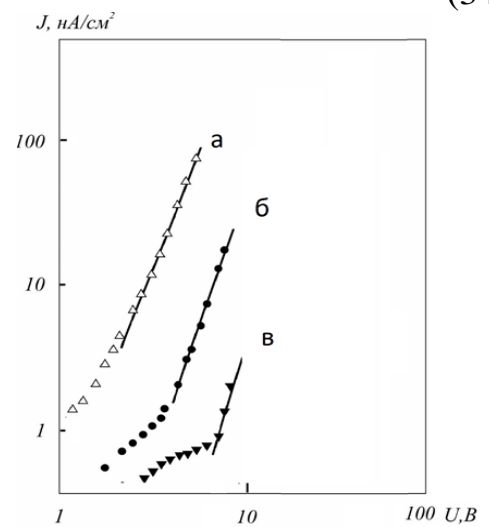


Рис.4. ФотоВАХ в области ограниченной пространственным зарядом, снятая при различных температурах. Поток фотонов равен $1,4 \cdot 10^{12}$ фотон/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$), $d=4$ мкм. а. 302 К, б. 262 К, в. 220 К [31; 141 б.]

Используя (27) и (34) приведем уравнение Пуассона в следующий вид

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} AN_1 \left[1 + e\mu_p G\tau_p \frac{E}{j} \right] = \frac{dE}{dx} \quad (35)$$

Для интегрирования этого дифференциального уравнения нужно знать нижний предел интегрирования. Мы уже видели, что при поглощении света на поверхностной части $a\text{-Si:H}$ образуется “резервуар” дырок. На рис.2 приведена энергетическая диаграмма слоя этого резервуара. В зависимости от внешнего напряжения кривая может снижаться. В точке минимума этой кривой напряженность равна нулю, а потенциальная энергия дырочных носителей тока будет максимальным. Это точка считается виртуальным катодом и его положение определяется соотношением

$$x_0 = L_0 \ln \left(\frac{e p \mu_p E}{2 \pi j} \right), \quad (36)$$

где $L_0 = \frac{kT}{eE}$

Из (36) видно, что с ростом напряженности поля значение величин x_0 уменьшается и в свою очередь расширяется область объемных зарядов. После несложного интегрирования уравнению (35) имеем

$$V = \frac{2V_p}{\alpha} \left[\left(1 - \frac{x}{L} \right) - \frac{1}{\alpha} \left(1 - \exp(-\alpha) \left(1 - \frac{x}{L} \right) \right) \right]. \quad (37)$$

Здесь V_p - напряжение полного заполнения дырочных ловушек. На этом выражение введём обозначение

$$V_p = \frac{e N_1 L^2}{\varepsilon}; \quad \alpha = \frac{4 \pi A e \mu_p G \tau_p N_1}{j \varepsilon} \quad (38)$$

Для упрощения выражения (37) присутствующий вне экспоненциальный член разложим в ряд и учитывая необходимые члены ряда имеем

$$V = V_p \left[1 - \frac{2L_0}{L} \ln \left(\frac{e \mu_p G \tau_p E}{2 \pi j} \right) - \frac{\alpha}{3} \right]. \quad (39)$$

Как видно, в логарифмическом члене участвуют концентрация инжектированных дырок и сила тока. Из-за низкой концентрации изначально инжектированных дырок выполняется соотношение

$$\alpha \gg \frac{6L_0}{L} \ln \left(\frac{e \mu_p G \tau_p E}{2 \pi j} \right). \quad (40)$$

Тогда (39) можно переписать в следующем виде

$$V = V_p \left[1 - \frac{\alpha}{3} \right]. \quad (41)$$

Теперь используя уравнение (38) можно найти зависимость плотности тока от напряжения

$$j = \frac{4 \pi A e \mu_p G \tau_p N_1}{3 \left(1 - \frac{V}{V_p} \right)}. \quad (42)$$

Как известно, с ростом концентрации инжектированных дырок проводимость объемного заряда в рассматриваемой области увеличивается на несколько раз. Это приводит к уменьшению величины α , и следовательно при определенном значении напряжения выполняется соотношения

$$\alpha \ll \frac{6L_0}{L} \ln \left(\frac{e \mu_p G \tau_p E}{2 \pi j} \right). \quad (43)$$

Тогда выражение (39) будет иметь следующий вид

$$j = \frac{e \mu_p p E}{2 \pi} \exp \left(- \left(1 - \frac{V}{V_p} \right) \frac{L}{L_0} \right). \quad (44)$$

С ростом напряжения увеличивается концентрация инжектированных дырок и имеет с активными и захватываемыми дырками следующее соотношение

$$p > N_1 + (1-f)N_2 \quad (45)$$

Концентрация инжектированных дырок, благодаря внешним напряжением определяется по экспоненциальному закону

$$p = p_0 \exp\left(\frac{e(U - \varphi_0)}{kT}\right) \quad (46)$$

При изменении напряжения в малом интервале в (45) $p \approx \text{const}$. Тогда используя систему уравнений (27), (28) и (29) имеем

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0, \quad (47)$$

$$j = e p \mu_p E, \quad (48)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{4\pi e}{\varepsilon} p. \quad (49)$$

Из этих уравнений можно установить соотношение между j и E

$$\frac{\mu_p \varepsilon E}{4\pi} \partial E = j \partial x. \quad (50)$$

В i - a - $Si:H$ толщина поглощаемой области света (50), и толщина i - слоя L имеют соотношение $x \ll L$, и тогда в (50) за нужную границу интеграла можно принять ноль. С учётом этого получаем выражение

$$j = \frac{e \mu_p U^2}{8\pi L^3}. \quad (51)$$

Полученное (51) выражает закон Мотта или же квадратичный закон. Выше описанные формулы связаны только с подвижностью дырок и не связаны с другими параметрами. На самом деле реальная характеристика ВАХ на этой участке зависит от концентрации, времени жизни и других параметров дырок. Они проявляют себя лишь при обогащенных и при «слишком чувствительных» контактах к освещению, т. е. из соотношения $j \sim U^2$ переходит к $j \sim U^m$ ($2 < m < 4$), поэтому выражение (51) перепишем с некоторыми изменениями

$$j = \frac{\varepsilon}{4\pi\sigma_p} \frac{\sigma_1 \mu_p}{2} \frac{U^2}{L^3}, \quad (52)$$

где $\tau_m = \frac{\varepsilon}{4\pi\sigma_p}$ - время релаксация Максвелла, которая уменьшается с ростом напряжения.

В область ВАХ, где выполняется квадратичная зависимость, τ_m достигает наименьшее значение и определяется соотношением

$$\tau_m \sim t_y$$

Здесь $t_y = \frac{L}{\langle g \rangle}$ или $t_y = \frac{L^2}{\mu_i}$ - время прохождения дырок толщины L слоя a - $Si:H$.

При выполнении этих условий в (52) участвует только время пролета дырок, и в основном она зависит только от внешнего напряжения.

Кроме этих, используя равенство $\sigma = e p \mu_p$, выражение (52) перепишем в следующем виде

$$j = \frac{1}{2} e p \mu_p^2 \frac{U^2}{L^3}, \quad (53)$$

где U – напряжение прикладываемое на всю структуры.

При достаточно низких значениях тока удельное сопротивление слоя i - a - $Si:H$ будет гораздо больше, чем удельное сопротивление остальных слоев ($\rho_0 \gg \rho_R$) и вся напряжения падает на слой i - a - $Si:H$. Однако, с ростом концентрации инжектируемых в слой i - a - $Si:H$ дырок, уменьшается сопротивление области объемного заряда и доля падающей на неё напряжения также уменьшается. Это обстоятельство позволяет анализировать изменение концентрации дырок в структуре. Считаем, что дырки инжектируются во внутрь слоя, и их концентрацию в этом случае можно рассчитать по следующей формуле

$$p = p_0 \exp\left(\frac{e(U - \phi_0)}{kT}\right). \quad (54)$$

Выражение (54) разложим в ряд для окрестности $U \approx \phi_0$ и ограничимся первыми членами, тогда для ВАХ получим

$$J \sim A \cdot U^m \quad m \geq 2. \quad (55)$$

Таким образом, нами были получены для описания ВАХ 5 аналитических выражений. Полученные все эти выражения соответственно наблюдаются при низких температурах и малых интенсивностях освещения, что подтверждает наши предположения.

В четвертой главе диссертации под названием **“Фото вольт-амперные характеристики и механизм дырочной проводимости тока в фотоэлектрических приборах”** рассмотрены и обоснованы каждые области фотоВАХ, при которых можно определить параметры дырок в условиях переноса фототока и влияния на них зарядового состояния в щели подвижности. Согласно формуле (52), в соответствии двух значений напряжения для расчета фототока можно написать следующие выражения

$$j_1 = B p_1 \frac{U_1^n}{L}, \quad j_2 = B p_2 \frac{U_2^n}{L} \quad (56)$$

Логарифмируя выражения (56) концентрации дырок захваченных в ловушках p_1 и p_2 , соответствующих напряжениям U_1 и U_2 , а также после вычитывания имеем

$$\delta E_F = kT \ln \left[\frac{j_1}{j_2} \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^n \right]. \quad (57)$$

Изменения концентрация дырок, захваченных ловушками имеет вид $\delta N = \frac{\delta Q}{e}$, где δQ – количество инжектированных зарядов в объеме. Полагая, что она по ширине области меняется линейно, можно найти функцию

распределения ловушек для дырок через количество заряда

$$g_0(E) \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) = \frac{\varepsilon(U_2 - U_1)}{4\pi d} \left[kT \ln \left[\frac{j_1}{j_2} \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^n \right] \right]^{-1}. \quad (58)$$

Используя графические зависимости ВАХ, при различных значениях температуры по значениям тока определим зависимости плотности состояний ловушек от температуры. Учитывая то, что ловушки расположены между квазиуровнем Ферми и валентной зоны можно определить зависимость в щели подвижности с помощью выражения

$$j = e\mu_v \frac{U^n}{d} N_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_F^* - \varepsilon_v}{kT}\right). \quad (59)$$

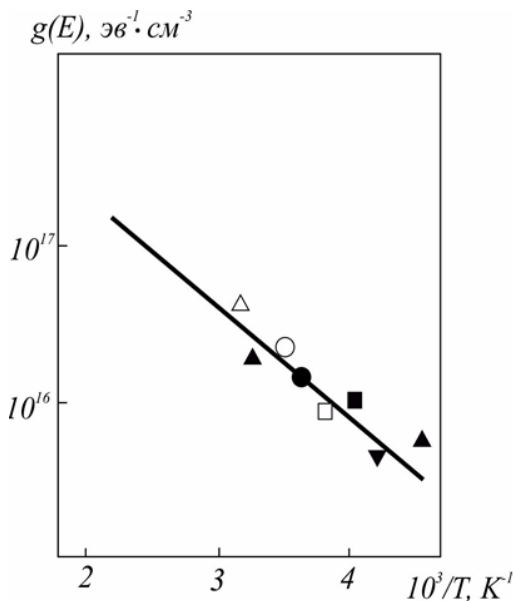


Рис.5. Зависимость плотности состояний от температуры.[5А; 134-136 б]

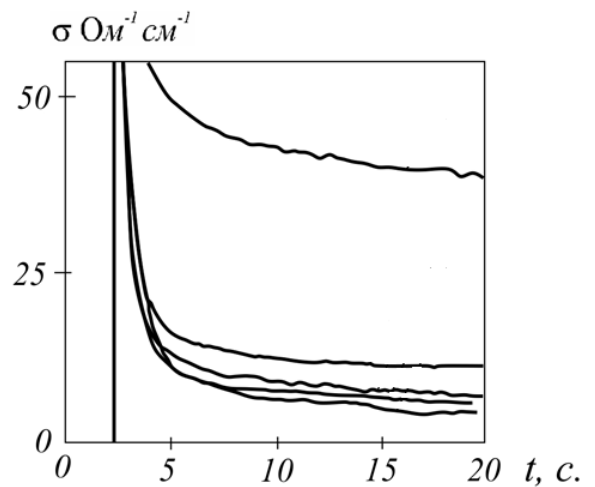


Рис.6. Интервал фотоэлектрической про-водимости мишени *a-Si:H*, с электронно барьерным слоем $\text{Si}_x \text{C}_{1-x}$ для синего (420 нм) света [70; 251-254].

Полученная таким образом зависимость $g_0(E)$ от T приведена на рис. 6. По наклону определены значения ширины энергии ΔE , внутри которой распределена плотность состояний ловушек.

Отсюда вытекает, что подвижность дырок в щели подвижности слоя *i-a-Si:H* ограничена ловушками, находящимися в энергетическом интервале между валентной зоной и щели подвижности с ε_v $\varepsilon_F^* = 0,45 \pm 0,05$ эВ выше $0,33 \pm 0,03$ эВ.

Эти результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Предложенным нами методом, можно найти основные величины в (58) и (59) с использованием граничных точек фотоВАХ, т. е. μ_p , N_0 . Кроме того, можно определить коэффициент захвата дырочных носителей тока, с помощью остаточного фототока полученного для *p-i-n* структуры мишени видикона. Для этого используем следующую формулу (рис. 6)

$$\gamma_p = \frac{\eta}{100\tau_p N_i}. \quad (60)$$

Значения величин, входящих в эту формулу можно определить из

разных участков фотоВАХ. Используя полученные значения можно оценить коэффициент захвата в пределах $\gamma_{тр} = 10^{-9} \text{ см}^3\text{с}$. Эти значения хорошо согласуются с экспериментальными значениями. Упомянутый нами остаточный фототок зависит от концентрации ловушек, поэтому изменяя это значения можно регулировать коэффициент захвата дырок.

Перезарядка D-центров, при легировании пленок *a-Si:H* бором, происходит по следующей схеме $D^0 + e \rightarrow D^+$. Это указывает на то, что для дырок концентрация D^0 -центров, играющая основную роль ловушек уменьшается и это приводит к уменьшению величины N_t .

Из выше указанных результатов установлено, что подвижность, время жизни и коэффициент захвата дырок связаны с параметрами D^0 -центров, которые расположены выше 0,45-0,6 Эв от валентной зоны E_V . Поэтому с уменьшением концентрации D^0 -центров можно регулировать механизм дырочной проводимости. А это приводит к повышению эффективности фотоэлементов, в том числе солнечных элементов на 2÷3%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изучения и определения фотоэлектрических свойств дырочных носителей заряда солнечных элементов полученных из гидрогенизированного аморфного кремния были сделаны следующие выводы:

1. Теоретически обоснована не возможность однозначного определения фотоэлектрических параметров только однотипных носителей заряда, с помощью зависимостей фотоэлектрической проводимости от температуры в слоях *i-a-Si:H*, которые являются активной частью солнечных элементов.

2. Установлена причина появления потенциального барьера в толстых пленках *a-Si:H*, возникающая за счет неравновесного поглощения света при освещении монохроматический лучом, которыми являются дефекты, распределенные в щели подвижности по распределению Гаусса.

3. Определены распределения концентрации дырок и потенциала в гидрогенизированном аморфном кремнии, появляющиеся за счет неравномерного поглощения света при отсутствии внешнего напряжения и показано, что это распределения не зависит от концентрации свободных зарядов, находящихся в непоглощенной части пленок.

4. Выявлено, что ВАХ полученные для *p-i-n* структур в зависимости от внешнего поля состоят из несколько частей и в появлении этих частей основную роль играет взаимосвязь между концентрациями фото генерированных дырок и зарядовых состояний в щели подвижности *a-Si:H*, а также для каждой части выведены аналитические выражения.

5. Используя фотоВАХ фотоэлементов в *p-i-n* структуре на основе *a-Si:H*, определены значения различных параметров зарядовых состояний в щели подвижности дырок, влияющие на механизм проводимости.

6. Указаны способы повышения эффективности солнечных батарей за счет изменения параметров, влияющих на механизм токопроводимости в фотоэлементах с *p-i-n* структурой на основе *a-Si:H*.

**SCIENTIFIC BOARD DSc. 30.08.2019. FM / T.01.12 ON THE AWARDING
ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE
OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELECTRONICS (AT) OF
THE NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

NAMANGAN STATE UNIVERSITY

NABIYEV AZAMJON BOTIRJONOVICH

**PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF ELECTRIC TRANSPORT OF
HOLES IN SOLAR CELLS BASED *a-Si: H***

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2019

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. B2019.1.PhD/FM320.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at Namangn State University.

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: **Zaynabidinov Sirajidin Zaynobidinovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
academician

Official opponents: **Imamov Erkin Zunnunovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Dadamirzayev Mukhammadjon Gulomkodiurovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organization: **Fergana State University**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "____" _____ 2019, at _____ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.30.08.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics under the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, Conference Hall of the SRIPSM under the NUU).

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

The abstract of the dissertation was distributed on "____" _____ 2019.
(Registry record No. _____ dated "____" _____ 2019)

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

S.S. Nasriddinov
Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees, Doctor of
Technical Sciences, Assistant Professor

A.T. Mamadalimov
Chairman of the Scientific Seminar of the
Scientific Council on Award of Scientific
Degrees, Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Academician

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The purpose of the research work: is to obtain information on the current of hole carriers and the charge state affecting them in the mobility gap due to the analysis of the photovolt-ampere characteristics of structures based on hydrogenated amorphous silicon.

The object of the research work: Hydrogenated amorphous silicon.

The Scientific novelty of the research is as follows: are that in photovoltaic devices based on hydrogenated amorphous silicon, opportunities have been created to increase the efficiency and obtain information of almost all the photoelectric parameters of hole current carriers.

Implementation of the research results. Through the investigation of photoelectric properties of the electrical conductivity of holes in solar elements based on a-Si:H:

Improving the efficiency of photovoltaic installations by determining the mechanism of hole electrical conductivity and optimizing the concentration of charge states in the mobility gap in a-Si: H based solar cells was used in the FOTON accent society in the manufacture of semiconductor electronic settings. The use of scientific results gave the chance to increase the efficiency of solar cells. (Reference No. 04-4/1827 of the Joint-Stock Company Uzeltehsanoat company from November 13, 2019).

The emergence of two regions with different concentrations of current carriers in one layer as a result of uneven absorption of light over the layer thickness and the determination of the existence of a barrier between them using an analytical expression obtained on the basis of a theoretical analysis of the photocurrent voltage dependence, theoretical graph analyzes obtained as a result experiments were used in the implementation of fundamental projects F2-OT-O-15494 “Improving the efficiency of emitters, photocells, and other optoelectronic devices based on the study of the transport phenomenon and excitons, polarons, bipolarons in nanostructures and heteroquantum dots” and F-2-21 “Mathematical modeling of the density of surface states at the semiconductor-insulator interface”. The use of scientific results gave the chance to improve the efficiency of photoelectric cells and other types of optoelectronic devices. (Reference No. 89- 03-4392 dated 11.11.2019 of the Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan).

Publication of the research results. On the theme of the thesis, 17 manuscripts were published, which 8 articles in foreign and the republican journals, and the rest of them are printed in the international and republican conferences.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion and list of used literature. The text of the dissertation is set out on 124 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I; part I)

1. А.Б. Набиев. Перенос дырок в фотоэлементах на основе аморфного гидрированного кремния. Научный вестник НамГУ, 2019, вып.10, с. 12-19, (01.00.00. №14).

2. S.Zaynobidinov , U.Babakhodzhayev, A.Nabiyev. Effects of deep traps on a hole photocurrent of a - Si:H-based photocells. Journal of Scientific and Engineering Research, 2019, 6(2): 252-255 (№ 19, Scientific Indexing Services, № 2, Journal Impact Factor, IF=0.42).

3.S.Zaynobiddinov, U.Bobokhodzhaev, A.Nabiev, N.Muydinov, B. Ergashev. The effect on the photoelectric parameters of non-uniformly light absorption in structures based on *a-Si:H*. International Journal of Scientific and Engineering Research ISSN 2229-5518, 2019, Vol.10, №10, pp. 1010-1017. (№ 25, Directory of Open Access Journals, IF=4,2)

4. S.Zaynobidinov, U.Babakhodzhayev, A.Nabiyev. The Mechanism of Hole Transport in Photocells Based on a-Si: H., International Journal of Engineering and Advanced Technology ISSN 2249-8958, (Scopus, IF=5,97),2019, Vol.9, № 2, pp.91-96.

5.С.Зайнобидинов, У. Бобоходжаев, А.Набиев. Фотоэлектрические параметры носителей тока *a-Si:H* и влияние их на фотопроводимость фотоэлементов на основе *a-Si:H*. Научный вестник НамГУ, 2019 , вып.2, с. 3-9, (01.00.00. №14).

6. С.Зайнобидинов, У. Бобоходжаев, А.Набиев. Исследование некоторых параметров многопереходных солнечных элементов на основе гидрированного кремния. Научный вестник НамГУ, 2019 , вып.4, с. 13-18, (01.00.00. №14)..

7. У. Бобохужаев, Н. Рахимов, А.Набиев, Х. Мавлянов Исследование температурной зависимости фотоВАХ мишени видикона на основе a-Si:H. Узбекский физический журнал, 2006, Vol. 8, № 3, с. 134–136 (01.00.00. №5).

8. У. Бобохужаев, Н. Рахимов, Р. Икрамов, А. Набиев, М. Нуриддинова. Исследование влияния ловушек на фотоэлектрические свойства мишени видикона на основе a-Si:H. Узбекский физический журнал, 2003, Vol. 8, № 2, с. 375-378. (01.00.00. №5).

II бўлим (Часть II; part II)

9. С. Зайнобидинов, У. Бобохужаев, А. Набиев, Н. Муйдинов. Исследования механизмов рекомбинационных процессов в пленках аморфного гидрогенизированного кремния. III Международная научно-практическая конференция инновационные процессы в науке и образовании, Г. Пенза, 2019 г 20 сентябрь, С.10-16.

10. Zaynobiddinov S.Z., Babakhodzhaev U.S., Quchqarov X.O., Nabiyev A.B., Ergashev B.F., Usmanov M.A. The influence on the photoelectric features of uneven light absorption in structures based on Hydrogenated Amorphous Silicon. International correspondence scientific and practical conference “Evropen research: innovation in science, education and technology” London, 2019, 8-9 October, pp.6-11

11. S.Zaynobiddinov, U.Bobokhodzhaev, A.Nabiev, N.Muydinov. *a-Si:H* асосидаги структураларда ёруғликни нотекис ютилишини фотоэлектрик параметрларга таъсири. “Қайта тикланувчи энергия манбалари ва барқарор атроф муҳитнинг замонавий муаммолари” мавзусидаги халқаро анжуман материаллари, Тошкент, 2019 йил 26-27 сентябрь, 56-61 бетлар.

12. У.С. Бобоходжаев, А. Набиев, Б. Эргашев, Н. Муйдинов. Фото-ВАХ мишеней видикона на основе *a-Si:H*. Материалы международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». Фергана, 25-26 мая, 2018, 367-371 с.

13. У. Бобохўжаев, А. Набиев, М. Усманов. Аморф яримўтказгичлар ҳолат зичлигини тадқиқ қилиш. Наманган давлат университети, Илмий ахборотномаси (махсус-сон.). Наманган 2017. 33-35 бетлар

14. Бабаходжаев У. С., Набиев А.Б., Давлатов А. Б. Исследование некоторых параметров многопереходных солнечных элементов на основе гидрированного кремния. «Актуальные проблемы физики и химии полимерных композитов, а также технология конструктивных материалов» Наманган, Узбекистан. 12-13 июля, 2017 года. с. 132-135.

15. Н. Рахимов, У. Бобохўжаев, Х. Мавлянов, А. Набиев. Исследование температурной зависимости плотности состояний в щели подвижности на основе *a-Si:H*. “Хозирги замон физикасининг долзарб муаммолари” III-Республика илмий-назарий конференцияси. Термиз, 2006 йил 20-22 апрель. 72-74 бетлар

16. Н. Рахимов, У. Бобохўжаев, Х. Кучкаров, А. Набиев. Влияние внешних воздействий на фотоэлектрические параметры аморфного гидрированного кремния в зависимости от исходных характеристик пленок. Наманган давлат университети илмий ахборотномаси, 2001 йил, 1-сон, 69-71 бетлар.

17. У. Бобохўжаев, Н. Рахимов, Х. Мавлянов, А. Набиев. Исследование температурной зависимости фотоВАХ мишени видикона на основе *a-Si:H*. Наманган давлат университети илмий ахборотномаси, 2001 йил, 3-сон, 16-19 бетлар

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек ва рус тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди.

Босишга рухсат этилди. 2019. Ҳажми босма табоқ.
Бичими 60x84 1/16. Рақамли босма усули. Times гарнитураси. Шартли босма табоғи: 3,25.
Адади 80. Буюртма №5.

Гувоҳнома реестр № 10-4434 Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти босмаҳонасида чоп этилган. Босмаҳона манзили: 100057, Тошентш., Янги олмазор кўчаси 20-уй.