

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМий ДАРАЖА БЕРУВЧИ DSc.28.02.2018.FM.60.01
РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

ТУРСУНОВ ИКРОМЖОН ГУЛАМЖОНОВИЧ

**КОМПЕНСИРЛАНГАН КРЕМНИЙ ВА УЛАР АСОСИДАГИ
СИРТ - БАРЬЕР ДИОД СТРУКТУРАЛАРДА
ТЕНЗОСТИМУЛЛАШ ҲОДИСАЛАР**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

АНДИЖОН – 2018

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской диссертации

Content of the abstract of doctoral dissertation

Турсунов Икромжон Гуламжонович

Компенсирланган кремний ва улар асосидаги сирт - барьер диод
структураларда тензостимуллаш ходисалар

3

Турсунов Икромжон Гуламжонович

Тензостимулированные явления в компенсированном кремнии и в
поверхностно - барьерных диодных структурах на его основе

27

Tursunov Ikromjon Gulamjonovich

Tensostimulated phenomena in compensated silicon and in surface-
barrier diode structures based on it

51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works.....

56

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМий ДАРАЖА БЕРУВЧИ DSc.28.02.2018.FM.60.01
РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

ТУРСУНОВ ИКРОМЖОН ГУЛАМЖОНОВИЧ

**КОМПЕНСИРЛАНГАН КРЕМНИЙ ВА УЛАР АСОСИДАГИ
СИРТ - БАРЬЕР ДИОД СТРУКТУРАЛАРДА
ТЕНЗОСТИМУЛЛАШ ҲОДИСАЛАР**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

АНДИЖОН – 2018

Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.2.DSc/FM43 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ўзбекистон Миллий университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (Ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.adu.uz) ҳамда «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталига (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: Маматкаримов Одижон Охундаевич
физика-математика фанлари доктори

Расмий оппонентлар: Каримов Абдулазиз Вахитович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Отажонов Салимжон Мадрахимович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Нуритдинов Изатилла
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: Қорақалпоқ давлат университети

Диссертация химояси Андижон давлат университети ҳузуридаги DSc.28.02.2018.FM.60.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «22» 41 соат 18 дақиқасида бўлиб ўтди. (Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: (374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz, Андижон давлат университети мажлислар зали)

Диссертация билан Андижон давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин 020 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: (374) 223-88-30.

Диссертация автореферати 2018 йил «14» 11 да тарқатилди.
(2018 йил «14» 11 дақиқасида рақамли реестр баённомаси.)



С. Зайнабидинов
Илмий даража берувчи илмий кенгаш раиси
ф.м.ф.д., академик

А.О. Курбанов
Илмий даража берувчи илмий кенгаш илмий
котиби, ф.-м.ф.н.

И.А. Каримов
Илмий даража берувчи илмий кенгаш
қондаги Илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д.

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон миқёсида жадал ривожланаётган яримўтказгичлар физикаси соҳасида чуқур сатҳлар ҳосил қилувчи киришма атомлари билан легирланган яримўтказгичли материал ва структураларда тензостимуллаштирилган (юқори босимлар билан рағбатлантирилган) эффектларнинг намоён бўлиш механизмларини ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада Au, Mn ва Zn билан легирланган кремний ва улар асосидаги структураларда изотроп гидростатик ва бир ўқли деформация таъсирида содир бўлаётган физик жараёнларни ўрганиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳоннинг йирик илмий марказларида киришмали атомлар билан легирлаш ёрдамида берилган хоссаларга эга бўлган янги яримўтказгичли материаллар олиш, бу материалларни электрофизик хоссаларининг нурланиш, температура, босим каби ташқи таъсирларга барқарорлиги ва сезгирлигини оширишга қаратилган илмий тадқиқот ишларини олиб боришга катта аҳамият берилмоқда. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотлар, жумладан изотроп гидростатик деформациянинг олтин, марганец ва цинк киришмалари билан легирланган кремний монокристалларининг электр ўтказувчанлигига таъсирини аниқлаш; легирланган кремнийда тензоэффект ҳодисасини намоён бўлишининг физик механизмларини аниқлаш; легирланган кремний асосидаги сирт-барьерли структураларнинг вольт-ампер характеристикаларига изотроп ва бир ўқли эластик деформациянинг таъсирини аниқлаш; киришмали кремний материалларида тензорелаксацион ҳодисалар кинетикасини аниқлаш; импульсли изотроп гидростатик деформация ва бир ўқли босим шароитларида чуқур сатҳлар ҳосил қилувчи киришмали кремний намуналарида тензоўтказувчанлик эффектнинг физик механизмларини очиқ бериш муҳим вазифалардан ҳисобланади.

Мамлакатимизда фундаментал тадқиқотларга катта эътибор қаратилиб, хусусан янги турдаги яримўтказгичли материаллар асосида турли ташқи таъсирларга барқарор бўлган универсал тензоўзгартиргичлар яратиш устида изланишлар олиб борилмоқда. Ўзбекистон Республикасининг 2017-2021 йилларга мўлжалланган ривожлантириш Ҳаракатлар стратегиясида «илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш, олий ўқув юртлари ва илмий-тадқиқот институтлари ҳузурида ихтисослаштирилган илмий-экспериментал лабораториялар, юқори технология марказлари ва технопаркларни ташкил этиш» вазифалари белгилаб берилган¹. Бу борада киришма атомлари билан легирланган кремний ва улар асосидаги сирт-барьерли структураларда тензоэффект ҳодисалари аниқлаш ва мақсадли хоссаларга эга янги тензосезгир

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.

материалларни олиш ҳамда уларни ишлаб чиқаришга жорий этилиши муҳим аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги ПФ-4947-сон Фармонини ва 2010 йил 15 декабрдаги «2011-2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ПҚ-1442-сон ва 2017 йил 17 февралдаги «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПҚ-2789-сон Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация тадқиқоти республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши» нинг устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи¹.

Яримўтказгичли материаллар ва улар асосидаги структураларга деформациянинг таъсирини аниқлаш бўйича жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан Флорида Department of Electrical and Computer Engineering (АҚШ) университети, В.Е.Лашкарев номидаги Яримўтказгичлар физикаси институти (Украина) Фанлар Миллий академияси), Луцк Миллий техника ва Волыньск Миллий университети (Украина), Нижний Новгород Микроструктуралар физикаси институти (Россия), А.Ф. Иоффе номи физика-техника институти (Россия), Физика-техника институти, Ядро физикаси институти (Ўзбекистон) томонидан илмий изланишлар олиб борилмоқда.

Яримўтказгичли материаллар ва улар асосидаги структуралар хоссаларига ташқи деформациянинг таъсирини аниқлашга доир жаҳонда олиб борилаётган илмий тадқиқотлар бўйича қуйидаги қатор илмий натижалар олинган: яримўтказгичли материаллар ва металл-оксид-яримўтказгич транзисторларда тензоэффект ходисаси, сенсорларда пьезорезистив эффектлар (Флорида Department of Electrical and Computer Engineering университети, АҚШ); турли кристаллографик ориентацияларга эга n-Ge материалларида кучли магнит майдон таъсирида тензоэффект ходисалари (В.Е.Лашкарев номидаги Яримўтказгичлар физикаси институти, Украина); чуқур энергетик сатҳли киришмалар мавжуд бўлган кремний монокристалларида бир ўқли деформациянинг ток ташувчиларнинг ҳаракатчанлигига таъсири (Луцк Миллий техника ва Волыньск Миллий

¹ Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий-изланишлар шарҳи Physics of strain effects in semiconductors and metal-oxide-semiconductor field-effect transistors // journal of Applied physics, 101.104503 (2007) ва бошқа манбаалар асосида бажарилган.

университетлари, Украина); 6H-SiC *p-n*-структураларнинг электрофизикавий хоссаларига бир ўқли босимнинг таъсири (Физика-техника институти, Россия), кремнийдаги ток релаксациясига бир ўқли босимнинг таъсири (Микроструктуралар физикаси институти, Россия); кремний-германий қаттиқ қотишмалари асосида қўп қатламли структуралар олинган ва уларнинг электрофизикавий хоссалари аниқланган (Физика-техника институти, Ўзбекистон).

Жаҳонда киришмالي яримўтказгич материаллар ва улар асосидаги структураларнинг электрофизик хоссаларига изотроп ва анизотроп деформация таъсирини аниқлаш бўйича, жумладан киришма атомлари билан легирланган кремний ва германий асосида ташқи деформацияга сезгир структуралар олиш; киришма атомларига эга кремний монокристаллари хоссаларининг деформация таъсирида ўзгариш механизмларини аниқлаш; кристаллографик йўналишларга боғлиқ ҳолда бир ўқли деформация таъсирида кремний ва германий материалларининг электрофизик хоссаларини аниқлаш; қўп қатламли яримўтказгич структураларнинг параметрларига деформация таъсирини аниқлаш; легирланган яримўтказгич структуралар асосида юқори сезгирликка эга бўлган тензоўзгартиргичларни яратиш бўйича экспериментал тадқиқотлар олиб боришмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Y.Sun S.E.Thompsonлар (АҚШ) томонидан кремний, германий ва улар асосидаги металл – оксид – яримўтказгичли транзистор структураларда деформацион эффектлар назарий тадқиқ қилинган. В.С.Осадчук ва Н.Л.Билоконлар (Украина) томонидан яримўтказгичли структуралар параметрларига босимнинг таъсири назарий жиҳатдан ўрганилган. А.М.Мусаев (Россия) томонидан эса *p-Ge* да термоэластик деформация таъсирида юз берадиган термоэлектрик эффектлар ўрганилган.

Мамлакатимизда академик М.К.Баҳадирхонов¹ томонидан кучли компенсирланган кремнийда бир ўқли эластик деформация таъсирида юз берадиган тензорезистив эффект компенсирловчи аралашма тури, характери ва кристаллографик йўналишига боғлиқ ҳолда ўрганилган. Кучли компенсирланган кремнийда бир ўқли эластик деформация таъсирида юз берадиган ток автотебранишларини ҳосил бўлиш эффекти кузатишган, ҳамда бир ўқли эластик деформациянинг $Si < B, Mn >$ намуналар фотоўтказувчанлигига таъсири ўрганилган. Профессор F.Ғуломов², томонидан босимнинг импульсли таъсир режимида компенсирланган кремнийда деформацион эффектларнинг фазовий тасвирлари назарий жиҳатдан ўрганилган.

Ҳозирги вақтгача ўтказилаётган илмий тадқиқот ишларининг кўплигига қарамай, замонавий микроэлектроника ва электрон асбобсозлик соҳаси учун гоят муҳим бўлган чуқур сатҳли киришмالي кремний материаллари ва улар

¹ Баҳадирхонов М.К., Илиев Х.М., Зикриллаев Х.Ф. Автоколебания тока в компенсированном кремнии при деформации // Электронная обработка материалов. 2000, №6, 53–57 стр.

² Guliyatov G., Guliyatov A.G., Muhidinova F.R. Influence of Recombination Centers on the Phase Portraits in Nanosized Semiconductor Films. Journal of Modern Physics—USA, 2016, 7, pp. 1661-1667

асосидаги диод структураларида изотроп ва анизотроп деформациянинг таъсирида кузатиладиган тензостимуллашган ҳодисалар механизмлари ва уларни амалиётда қўлланиши билан боғлиқ муаммолар кам ўрганилган.

Тадқиқотнинг диссертация иши бажарилган олий таълим муассасасидаги илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Миллий университети илмий-тадқиқот ишлар режасининг ОТ-Ф2-28 «Легирилган кремнийдаги сиртий ва ҳажмий квант ўлчовли эффектлар ва уларни p - n тузилмалардаги генерация-рекомбинация ва ток ташувчиларни ажралиш жараёнига таъсири» (2012–2016 йй.); ОТ-Ф2-068 «Кристалларда киришма–нуқсон турдаги микро ва нанобирикмаларни ҳосил бўлиш механизмлари ва уларнинг кенг функционал имкониятли кўп қатламли структурлар яратишдаги ўрни» (2017–2020 йй.) мавзуларидаги фундаментал лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади чуқур сатҳлар ҳосил қилувчи Au, Mn и Zn киришма атомлари билан легирилган кремний ва улар асосидаги структураларда тензостимуллашган ҳодисаларни ва уларнинг намоён бўлиш физик механизмларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

изотроп эластик деформацияни $Si < Au >$, $Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ намуналарининг электр ўтказувчанлигига таъсирини ва уларда тензоэффект ҳодисаси намоён бўлишининг физик механизмларини аниқлаш;

изотроп ва бир ўқли эластик деформацияни $Sb - p - Si < Mn > - Au$ турдаги сирт–барьер структураларнинг вольт–ампер характеристикаларига таъсирини ўрганиш;

импульсли изотроп эластик деформация таъсирида $Si < Au >$, $Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ намуналарида тензорелаксацион кинетик ҳодисаларни аниқлаш;

$Si < Au >$, $Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ намуналарида динамик тензоўтказувчанлик ва $Si < Au >$, $Si < B, Mn >$, $n - Si < P, Zn >$ намуналарида бир ўқли босим $I \parallel X \parallel [111]$ ва $I \parallel X \parallel [100]$ шароитларида тензоэффект ҳодисаси намоён бўлишининг физик механизмларини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти олтин, марганец ва цинк атомлари билан легирилган кремний ва улар асосидаги сирт–барьерли диод структураларидан иборат.

Тадқиқотнинг предмети легирилган кремний ва улар асосидаги Шоттки диод структураларида изотроп ва анизотроп босимлар билан рағбатлантирилган физик жараёнларнинг механизмларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари сифатида деформация таъсирида яримўтказгичли материалларнинг тензоўтказувчанлигини, улар асосидаги диод структуралардаги ток характеристикаларини ўрганиш ва ток ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанликларини аниқлашнинг электрик ва магнетоэлектрик усулларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

изотроп босимнинг статик режимида $Si < Au >$, $Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ намуналар электр ўтказувчанлигининг ортиши, Au , Mn ва Zn чуқур сатҳлар ионлашув энергиясининг барик ўзгариши ҳисобига, асосий ток ташувчилар концентрациясининг ўзгариши натижасида юз бериши аниқланган;

кремнийда чуқур сатҳли марганец, цинк, олтин киришмаларнинг ионлашиш энергиялари ва уларнинг ўзгариш босим коэффициентлари аниқланган;

статик режимида $Sb - p - Si < Mn > - Au$ структураларда гидростатик босим таъсирида база ва потенциал барьердаги ўзгаришлар ҳисобига, тўғри ва тескари тоқларнинг сезгирлиги қўйилаётган кучланишга боғлиқлиги аниқланган;

импульсли ҳар томонлама гидростатик босим таъсирида $Si < Au >$, $Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ намуналарда токнинг тензорелаксацион ўзгариши тензо-термо эффект натижасида температуранинг босим билан синхрон ўзгариши ҳисобига содир бўлиши аниқланган;

$Si < Au >$, $Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ намуналарда электр ўтказувчанликнинг ўзгариши кремнийнинг тақикланган соҳасида цинк, олтин, марганец киришмалар энергетик сатҳларининг барик силжиши ва термик генерацияси туфайли ток ташувчилар концентрациясининг ўзгариши билан боғлиқ динамик тензоўтказувчанлик эффектнинг намоён бўлиш механизмлари аниқланган;

$Si < Mn >$ намуналарида босим амплитудасининг катта кийматлари ҳисобига, тензостимуллашган эффектнинг ток ўзгаришидаги улуши температура улушидан катта бўлиши аниқланган;

$Si < P, Au >$, $Si < B, Mn >$ ва $n - Si < P, Zn >$ компенсирланган намуналарда бир ўқли босим шароитларида тензоэффект ҳодисаси $I \parallel X \parallel [111]$ ва $I \parallel X \parallel [100]$ кристаллографик йўналишларда ток ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанликларнинг қарама-қарши ўзгариши туфайли содир бўлиши кўрсатилган;

термик ишлов берилган намуналарда тензоқаршилик эффекти асосан ток ташувчилар ҳаракатчанлигининг ўзгариши натижасида содир бўлиши ҳамда $[111]$ кристаллографик йўналишдаги бир ўқли деформация Si ҳажмидаги ҳосил бўладиган, шунингдек бошқариб бўлмайдиган аралашмалар туپлами, микробирикмаларнинг босим остида емирилишига олиб келиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

умумий тензосезгирлиги $S_k = 6 \cdot 10^5$ га ва дискрет тензосезгирлиги $S_{мс} = 600$ га тенг бўлган $Au - Si < B, Mn > - Sb$ турдаги сирт-барьерли диод структурасини пневмокучайтиригичли тензоўзгартиргич сифатида ишлатилган;

олинган структура ва материаллар асосида тензосезгирлик коэффициенти саноатда мавжуд тензоўзгартиргичлар тензосезгирлик коэффициен-

тидан сезиларли катта бўлган статик ва динамик тензоўзгартиргичлар, босим ўлчагичларнинг лаборатория намуналари яратилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги олинган материаллар тензоўтказувчанлигини, яримўтказгичли структураларнинг вольт-ампер ва юқори частотали вольт-фарад характеристикаларини тадқиқ қилишнинг асосланган замонавий экспериментал усулларининг қўлланилиши, тадқиқот объектининг тўғри танланганлиги, айрим тажриба натижаларини адабиётдаги назарий натижалар билан солиштириш ёрдамида асосланди.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти компенсирланган кремний материалларида ва улар асосидаги структураларда изотроп ва анизотроп деформация таъсирида содир буладиган физик жараёнлар ҳақидаги янги тасавурларни кенгайтириш имконини беради.

Олинган тадқиқот натижалари амалий жихатдан сезгирлиги мавжуд тензоўзгартиргичларнинг сезгирлигига нисбатан юқори бўлган замонавий ўлчаш асбобларини яратиш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структураларнинг электрофизик хоссаларига изотроп ва анизотроп деформациянинг таъсирини аниқлаш бўйича олинган натижалар асосида:

компенсирланган кремний ва улар асосидаги $Au - Si < B, Mn > - Sb$ турдаги структураларда кузатиладиган тензоэффект ҳодисаси физик механизмлари, изотроп деформация таъсирида сирт-барьер диод структураларда потенциал барьернинг ўзгариши ва унинг барик коэффициентини аниқлаш бўйича олинган натижалар «Transporte Mono-y Bipolar en Estructuras Semiconductoras» хорижий грант лойиҳасида яримўтказгичли структураларнинг вольт-ампер характеристикасига деформация таъсирини аниқлаш, ток ўзгариши механизмини тушунтиришда фойдаланилган (Мексика Миллий тадқиқот институтининг 2018 йил 2 майдаги 6171-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш изотроп деформация таъсири натижасида сирт-барьерли структураларда юз берадиган физик жараёнларни тушунтириш имконини берган;

статик ва импульсли босимнинг сирт-барьер диод структуралар вольт-ампер характеристикасига таъсири, структура тўғри ва тескари тоқларининг босим туфайли ўзгариши ва унинг кучланишга боғлиқлиги бўйича олинган натижалар ОТ-Ф2-077 рақамли «Яримўтказгичли пардаларда деформацион эффектлар динамикаси ва уларда юзага келувчи тоқларга электромагнит тўлқинларнинг таъсири» (2007-2011) грант лойиҳасида деформациянинг яримўтказгичли структуралар фототок ва фото электр юритувчи кучларига таъсирини аниқлашда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 31 майдаги №89-03-2128-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли структураларда деформацион эффектлар фаза кўринишларини тузиш имконини берган;

$Au - Si < Mn > - Sb$ турдаги Шоттки барьерли структуралар асосида

«FOTON» акционерлик жамиятида босимни кенг интервалида ўлчаш имконини яратувчи универсал тензоўзгартиргич ишлаб чиқилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 14 июндаги 02-1330-сонли маълумотномаси). Илмий натижалар саноатда ишлаб чиқарилаётган яримўтказгичли структуралар физик параметрларининг турли хил деформацияларга барқарорлигини ошириш имконини берган.

ҳар томонлама гидростатик босим шароитида яримўтказгичлар ва улар асосидаги структураларда тензоэффект ҳодисасини тадқиқ қиладиган универсал қурилма «FOTON» акционерлик жамиятида параметрлари яхшиланган тензоўзгартиргич ишлаб чиқаришда қўлланилган. («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 14 июндаги 02-1330-сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгич ва улар асосидаги структураларда ҳар томонлама босимда тензоэффект ҳодисасини тадқиқ қилиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси.

Диссертация ишининг натижалари 6 та халқаро ва 8 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилиниб, муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 30 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 11 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, беш боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва 3 та илова, 61 та расм ва 3 та жадвалдан иборат. Диссертация ҳажми 190 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади, вазифалари, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши бўйича маълумотлар берилган.

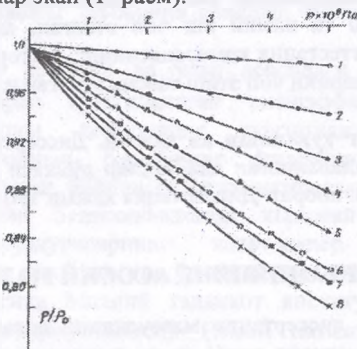
Диссертациянинг «Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структураларнинг тензоэлектрик хоссалари» деб номланган биринчи бобида яримўтказгичлар материалларнинг электрофизикавий хоссаларига ва яримўтказгичли диод структураларнинг характеристикаларига статик, динамик ҳамда бир ўқли эластик деформациянинг таъсирини тадқиқ қилиш бўйича адабиётларда мавжуд маълумотлар шарҳи келтирилган.

Диссертациянинг «Компенсирланган кремний электр ўтказувчанлигига ва улар асосидаги сирт-барьерли диод структуралар ВАХга изотроп босимнинг таъсирини тадқиқ қилиш» деб номланган иккинчи бобида кремнийнинг тақиқланган соҳасида чуқур сатҳлар ҳосил қилувчи Au , Mn ва Zn атомлари билан легирланган кремний ва улар асосидаги

структуралар электр ўтказувчанлигига изотроп деформациянинг таъсирини ўрганиш бўйича тадқиқот натижалари келтирилган.

Компенсирланган ва кучли компенсирланган $Si < Au >$ намуналарида ҳар томонлама гидростатик босим таъсирида тензоўтказувчанликни тадқиқ этиш шуни кўрсатдики, босим қиймати $P = (0 \div 6) \cdot 10^8 \text{ Па}$ гача ортиши билан намуналардаги ток аввал ошади ва 20 секунд вақт ўтгандан кейин босимнинг ўзгармас ($P = \text{const}$) қийматида ток аста-секин бошланғич ҳолатига қайтади. Намуналардаги тензоўтказувчанликнинг бундай ўзгаришини босим таъсирида олтин атомлар энергетик сатҳларининг вақтинча бўшаб қолиши ва электронларнинг ўтказувчанлик соҳасига ўтиши ва вақт ўтиши билан электронларнинг ўз жойига қайтиши билан тушунтириш мумкин.

Компенсирланган $Si < Mn >$, $Si < Zn >$ ва синов намуналарида ҳар томонлама гидростатик босимнинг статик режимида тензоқаршиликларни ўлчаш шуни кўрсатдики, солиштира қаршилиқ (ρ) ҳамма намуналарда босим ортиши билан камайар экан, ρ нинг энг катта ўзгариши кучли компенсирланган, энг кам ўзгариши кучсиз компенсирланган ва синов намуналарида кузатилар экан (1-расм).



1-дастлабки ва синов намуналар $p-Si < B >$, $\rho = 4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 2 - $p-Si < Mn >$
 $\rho = 2,62 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 3 - $p-Si < Mn >$ $\rho = 8 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 4 - $n-Si < Zn >$
 $\rho = 3,4 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 5 - $n-Si < Zn >$ $\rho = 4,35 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 6 - $p-Si < Mn >$
 $\rho = 4,95 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 7 - $n-Si < Mn >$ $\rho = 4,3 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 8 - $p-Si < Mn >$
 $\rho = 3,62 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

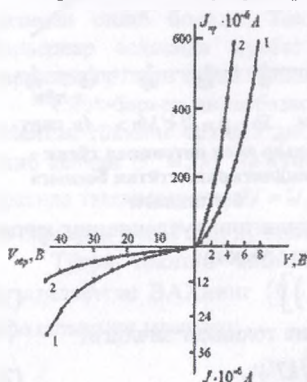
1-расм. $Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ намуналарининг статик босим таъсиридаги тензоқаршиликлари

Гидростатик босимнинг статик режимида бу намуналарда Холл эффектини тадқиқ этиш, дастлабки ва синов намуналарда ток ташувчилар концентрациясининг ўзгармай қолишини, қолган намуналарда эса босим ортиши билан концентрация ортиб боришини, шунингдек, намуналардаги компенсация даражаси ортиши билан концентрациянинг ўзгариш тезлиги ҳам ортиб боришини кўрсатди.

Кремнийдаги саёз сатҳлар тўлиқ бўш бўлганлиги, чуқур сатҳлар эса қисман ионлашган ҳолатда бўлганлиги учун олинган $n(P)$ боғлиқлик дастлабки ва синов намуналарида тензоэффект назарияси билан тушунтирилиши мумкин. Босим таъсирида чуқур сатҳлар тўлиш даражасининг ўзгариши рухсат этилган соҳаларда ток ташувчилар концентрациясининг ортишига олиб келади.

Тажрибалар шуни кўрсатдики, ток ташувчилар ҳаракатчанлиги дастлабки, синов ва компенсирланган $p-Si < Mn >$ ва $n-Si < Zn >$ намуналарда босим ортиши билан қисман ортади, ўта компенсирланган $n-Si < Mn >$ (солиштирама қаршилиги $\rho = 4,96 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) намуналарда электронларнинг ҳаракатчанлиги босим ортиши билан, аксинча камаяди.

Дастлабки $p-Si < B >$, $n-Si < P >$ ва кучсиз компенсирланган намуналарда ток ташувчилар ҳаракатчанлигининг босим ортиши билан қисман ўзгаришини, рухсат этилган соҳа четларининг силжиши натижасида ток ташувчилар энергиясининг ўзгариши билан тушунтириш мумкин. Компенсирланган $Si < Mn >$ намуналарда босим таъсирида электронлар ҳаракатчанлигининг камайиши, сочувчи ионлашган Mn марказлар концентрациясининг ва бу марказлар билан ток ташувчилар таъсирлашуви потенциалининг ортиши билан тушунтирилади.



1- $P=0$; 2- $P=5 \cdot 10^8 \text{ Па}$

2-расм. $Sb-Si < Mn > -Au$ сирт-барьер диоднинг ВАХ си.

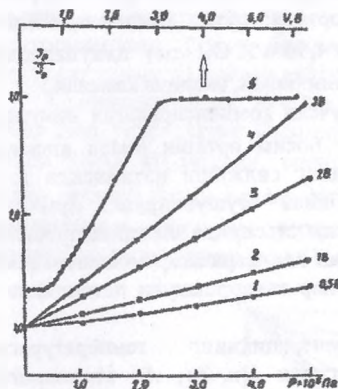
Концентрациянинг температурага боғлиқлигидан Mn , Zn , Au атомларига тегишли чуқур сатҳларининг ионлашув энергияси қийматлари $E_{Mn} = E_c - 0.51 \text{ эВ}$, $E_{Zn} = E_c - 0.53 \text{ эВ}$, $E_{Au} = E_v + 0.36 \text{ эВ}$ ва мос равишда энергетик сатҳлар силжишининг босим коэффицентлари $\alpha_{Mn} = 1.82 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па}$, $\alpha_{Zn} = 1.44 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па}$, $\alpha_{Au} = 1.96 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па}$ аниқланди.

Бу бобда компенсирланган $Si < Mn >$ (2-расм) асосида олинган $Sb-Si < Mn > -Au$ диод структураларнинг ВАХга статик изотроп босим таъсирининг тадқиқот натижалари келтирилган.

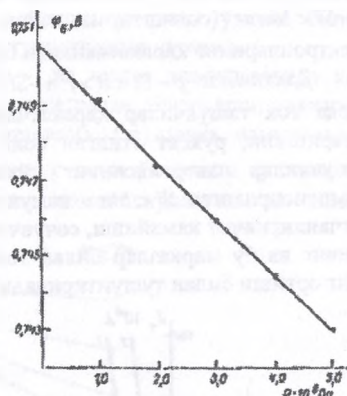
Чизмадан кўриниб турибдики, кучланишнинг тўғри ва тескари йўналишларида структура токи босим қийматига мутаносиб равишда ортади. Бу структураларда бир хил қўйилган кучланишларда тўғри токнинг босимга сезгирлиги тескари токникига нисбатан каттароқ бўлади.

3-расмда структура тўғри токининг (нисбий бирликларда) $P=0 \div 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ интервалида ва қўйилган $U = 0.5, 1, 2$ ва 3 В кучланишларда ташқи босимга

боғлиқлиги ва босимнинг $P = 5 \cdot 10^8$ Па кийматида кучланишга $J_p/J_0 = f(U)$ боғлиқлиги келтирилган. Расмдан кўринадики, бу сирт - барьер диод структураларининг тензотоки қўйилаётган кучланишга кучли боғлиқ бўлиб, кучланиш U ортиши билан токнинг нисбий киймати J_p/J_0 ортиб боради (1 - 4 эгри чизиклар). 5-эгри чизикдан кўриндики, $J_p/J_0 = f(U)$ боғлиқлик чизиги учта характерли қисмдан иборат. Кучланишнинг 0,5 В кийматигача структуранинг ток бўйича босимга сезгирлиги доимий ва $J_p/J_0 \approx 1.34$.



3-расм. Sb - p-Si < Mn > - Au сирт-барьер диод ВАХ тўғри токи нисбий ўзгаришининг статик босим (1 - 4) ва кучланишга (5) боғлиқлиги



4-расм. Sb - p-Si < Mn > - Au сирт-барьер диод потенциал тўсик баландлигининг статик босимга боғлиқлиги

Идеал сирт - барьер диод орқали ўтаётган ток зичлигини кучланишнинг кичик кийматларида қуйидаги формула орқали аниқлаш мумкин:

$$J = J_0 [\exp(qU/kT) - 1] \quad (1)$$

бу ерда J_0 - термоэлектрон эмиссия учун тўйиниш токининг зичлиги:

$$J_0 = A^* T^2 \exp(-q\phi_{n,m}/kT) \quad (2)$$

Ток кичик бўлган соҳада, сирт-барьер диод ВАХи (1) муносабат билан ифодалаш ва потенциал барьер баландлигини қуйидаги формула орқали ҳисоблаш мумкин:

$$\phi_{n,m} = \frac{kT}{q} \ln \frac{A^* T^2}{J_0} \quad (3)$$

бу ерда $A^* = 79.2$ - коваклар учун Ричардсон доимийси, J_0 - тўйиниш токи 0,5 В дан кичик соҳада ВАХ тўғри чизигининг $U = 0$ кийматига экстраполяциялаш усули билан аниқланди. Ҳисоблашлар кўрсатдики, ҳар томонлама босимнинг $P = 5,5 \cdot 10^8$ Па кийматигача Ричардсон доимийсининг ўзгариши атиги $\sim 0,98\%$ ни ташкил этади.

4-расмда (3) ифода орқали ҳисоблаб топилган потенциал барьер баландлигининг $T=293\text{ K}$ ва $P=0.6 \cdot 10^8\text{ Па}$ интервалда ҳар томонлама босимга боғлиқлиги келтирилган.

Чизмадан кўринадики, босим ортиши билан потенциал барьернинг баландлиги камаяди, босимнинг $P=0$ қийматида потенциал барьер баландлиги $\varphi_{n0}=0.74\text{ В}$ га тенг. Бунда потенциал барьер баландлиги босим коэффициентининг қиймати $\alpha=-1.53 \cdot 10^{-11}\text{ эВ/Па}$ ни ташкил этади ва кремний тақикланган соҳаси кенглиги ўзгаришининг адабиётларда кўрсатилган босим коэффициенти қиймати $\alpha=-1.49 \cdot 10^{-11}\text{ эВ/Па}$ билан мос тушади. Шунинг учун тадқиқ қилинаётган структуралар потенциал барьери баландлигининг босим таъсирида ўзгариши асосан кремний тақикланган соҳаси кенглигининг ўзгариши билан тушунтириш мумкин.

Кичик тоқлар соҳасида $\gamma=J_0^{-1}dJ/dP$ ва $\gamma=q(kT)^{-1}d\varphi_n/dP$ ифодалар ёрдамида аниқланган тоқнинг босимга сезгирлиги $6.57 \cdot 10^{-10}\text{ Па}^{-1}$ ва $7.27 \cdot 10^{-10}\text{ Па}^{-1}$ га тенг эканлиги, кучланишнинг кичик 0.5 В дан кичик соҳасида тоқнинг ўзгариши асосан потенциал барьер баландлигининг ўзгариши билан тушунтиришга асос бўла олади.

Кучланишнинг $U=3\text{ В}$ қийматигача ортиши билан J_p/J_0 нисбат чизикли ошиб боради. Тоқ сезгирлигининг кейинги ортишига Шоттки барьерлар соҳасида мусбат ички тескари алоқа улушининг сезиларли даражада ортиши сабаб бўлиши аниқланди.

Сирт-барьер диод базаси компенсирланган бўлгани учун диод орқали ўтаётган тоқнинг ортиши диод базасига тушаётган кучланишнинг ортишига олиб келади $U_\sigma=JR_\sigma$ ва қўйилаётган кучланиш база ва Шоттки барьерлари орасида тақсимланади: $U=U_0+U_{\sigma n}$, бу ерда $U_{\sigma n}=kT \ln(J/J_0+1)/q$ натижада барьерга тушаётган кучланишнинг ошиши тоқнинг ортишига олиб келади.

Тўғри тоқнинг қиймати ҳар томонлама босим таъсирида ортиши кузатилаётган ВАХнинг ($0.5\text{ В} < U < 1\text{ В}$) соҳаси қуйидаги муносабат билан ифодаланиши мумкин:

$$J=J_0 \left[\exp \frac{U-JR_\sigma}{kT} - 1 \right] \quad (4)$$

Кейин инжекция даражаси пастдан юқорига ўтишига мос бўлган ($1 \leq U \leq 3\text{ В}$) соҳа кузатилади. Кучланишнинг кейинги ортишида $U \geq 3\text{ В}$ берилган структураларнинг тоқ бўйича сезгирлиги ўзгармас бўлиб $J_p/J_0 \approx 3$ га тенг.

Тўғри кучланишнинг катта қийматларида тоқ ўтишининг асосий механизми, тоқнинг диффузион ва термоэмиссион компоненталардан анча катта бўлган дрейф компонентаси ошишига боғлиқ бўлган тоқ ташувчиларнинг инжекциясидан иборат, деб фараз қилиш мумкин.

Ушбу бобда шунингдек структура базасидаги аралашмалар концентрациясининг бир текис тақсимланмаган ҳолати учун Шоттки барьер

вольт-фарад характеристикасига изотроп босимнинг таъсири ҳам кўриб чиқилган.

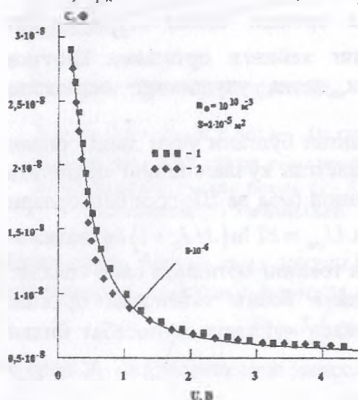
Металл-яримўтказгич контактини ясси конденсатор сифатида қараб a параметрининг берилган қийматида Шоттки барьерли диод сиғимини

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{L} \quad (5)$$

қўйиладиган кучланишга боғлиқлигини топиш мумкин. Ярмўтказгичдаги электр майдоннинг кириб бориш масофаси L ни қуйидаги ифода билан аниқлаш мумкин:

$$L = \left[a \left[\exp \left(\frac{2\epsilon \epsilon_0 (\phi_k + U)}{en_0} \right) - 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Бу ерда n_0 — металл-яримўтказгич чегарасидаги аралашма концентрацияси, $a = \text{const}$, ϕ_k — контакт потенциаллар фарқи.



- 1 - синов диодлари
2 - босимнинг 6 кБар қиймати

5-расм. Шоттки диодлари учун тажриба C-U боғлиқлиги

5-расмда, n -турдаги яримўтказгич асосида олинган Au-n-Si диоднинг экспериментал вольт-фарад (5 та намуна бўйича ўртачаси) характеристикаси келтирилган. Туташ чизик $a = 8 \cdot 10^{-6}$ параметр учун назарий ҳисобланган вольт-фарад характеристикасига мос келади.

Расмдан кўринадик, экспериментал боғланиш, назарий ҳисоб натижасида олинган боғланиш билан мос тушади, бу эса ҳисоблашда фойдаланилган киришма таксимот қонунининг тўғри эканлигини тасдиқлайди.

Шоттки диодлари учун экспериментал C-U боғланишдан кўринадик, босим таъсирида вольт-фарад характеристика

(қўйилган кучланишнинг 0,5-1,5 В соҳасида) чап томонга силжийди. Характеристиканинг бундай силжиши бу соҳада dC/dU қийматининг ортишига ва

$$S = \frac{dC}{C} \frac{U}{dU} \frac{1}{n+2} \quad (7)$$

ифода билан (бу ерда n — аралашманинг яримўтказгич ҳажмий заряд соҳаси қалинлиги бўйича таксимланишини кўрсатувчи $N(x) = N_0 x^n$ ифодадаги даража кўрсаткичи) аниқланадиган варактор сезгирлигининг ошишига олиб келади. Тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, варакторларни тайёрлашда

уларнинг C-U характеристикасини яхшилаш учун гидростатик босимни қўллаш мақсадга мувофиқ бўлар экан.

Диссертациянинг «Компенсирланган кремний ва улар асосидаги структураларда тензорелаксация ходисаларини тадқиқ қилиш» деб номлаган учинчи бобида компенсирланган $Si < Mn >$, $Si < Zn >$ намуналар ва улар асосида олинган $Sb - p - Si < B, Mn > - Au$ Шоттки барьерли структураларда босимнинг $P = (0 \div 6) \cdot 10^8 \text{ Па}$ ва температуранинг $T = 330 \div 273 \text{ К}$ оралиқларида импульсли гидростатик босим таъсири натижасида вужудга келадиган динамик тензоўтказувчанлик ва унинг содир бўлиши физик механизмларининг компенсация даражаси ва ўтказувчанлик турига боғлиқ ҳолда тадқиқ қилиш натижалари келтирилган.

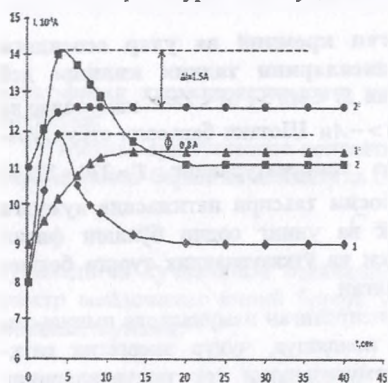
Олиб борилган тадқиқотлар компенсирланган намуналарда импульсли гидростатик босим таъсирида термик ионлашув, чуқур энергетик сатҳларнинг босим остида силжиши ва номувозанатли ток ташувчиларнинг рекомбинацияси билан боғлиқ бўлган токнинг релаксацион ўзгариш жараёни юз беришини кўрсатди. Бунда компенсирланган намуналарда динамик тензосезгирлик унинг статик қийматидан анча катта бўлиши аниқланди.

Намуналар температурасини бевосита ўлчаш ва импульсли гидростатик босимнинг таъсирида олинган тажриба маълумотлари таҳлили намуналардаги токнинг динамик ўзгариши улар температурасининг синхрон ўзгариши билан юз беришини кўрсатди. Температуранинг (термозффе́кт) ва импульсли босимнинг (тензорелаксацион эффект) тензоўтказувчанликдаги улушини аниқлаш учун импульсли босим таъсирида ва статик босим шароитида бевосита температурани ўзгартириш натижасида намуналардаги токнинг ўзгариши тадқиқ қилинди. 6-расмда тезлиги $\frac{\partial P}{\partial t} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{Па}}{\text{сек}}$ бўлган импульсли гидростатик босим таъсирида ва киздиргич ёрдамида температурани ўзгартирганда солиштирма қаршилиги $\rho = 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ бўлган $n - Si < Mn >$ намуналар орқали ўтаётган токнинг $I = f(t)$ кинетик ўзгариши келтирилган. Босимни $P = 2,5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ва $P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ қийматларигача ўзгартирилганда намуна температуранинг ўзгариши мос равишда $(4 \div 5)^\circ \text{C}$ ва $(8 \div 9)^\circ \text{C}$ ни ташкил қилади. Олинган натижалар таҳлили шуни кўрсатадики, босимнинг $P = 2,5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ қийматида токнинг умумий ўзгаришида тензостимуллашган ўзгариш улуши сезиларли даражада кичик, яъни босимнинг кичик қийматларида токнинг ўзгариши асосан температуранинг ўзгариши билан белгиланади.

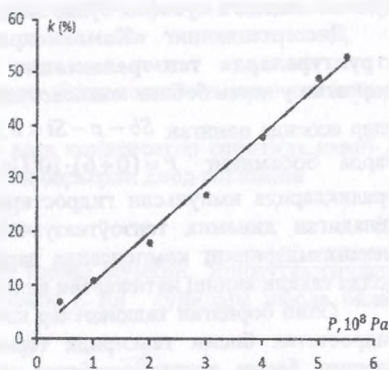
Аммо босим амплитуда қийматининг ортиши билан ток ўзгаришида тензостимуллашган эффект улуши $k = \frac{I_{\text{max}} - I_T}{I_{\text{max}} - I_{\text{CT}}}$ ортиб боради (7-расм).

Яримўтказгич материалларида кузатиладиган динамик тензорезистив эффект тақиқланган соҳасида чуқур энергетик сатҳлар ҳосил қиладиган аралашмали марказларга эга бўлган яримўтказгичлар учун характерлидир. Шунинг учун чуқур энергетик сатҳлар ҳосил қиладиган аралашмали

марказларга эга кремний кристалларида тензозффеќтнинг намоён бўлиш механизмларини ўрганиш мућим аћамиятга эга.



1, 1' - $P = 2,5 \cdot 10^8$ Па, 2, 2' - $5 \cdot 10^8$ Па)
6-расм. Импульсли гидростатик босим таъсирида ва қиздиргич ёрдамида ҳароратни ўзгартирганда $n - Si < Mn >$ 10^5 Ом·см намуналар орқали ўтаётган токнинг $I = f(t)$ кинетик ўзгариши



7-расм. $n - Si < Mn >$; 10^5 Ом·см намуналарда тензорелаксацион эффект улушининг босим амплитуда қийматига боғлиқлиги

Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, ўзгарувчан босим таъсирида намуналарнинг температураси маълум бир ΔT қийматга ортади. У ҳолда ўзгарувчан босим таъсирини ҳисобга олиб, заряд ташувчилар концентрациясини қуйидаги ифода билан аниқлаш мумкин:

$$n = n_0 \exp \left(- \frac{E_i - \alpha P}{k(T + \Delta T)} \right) \quad (8)$$

Бу ерда n_0 - дастлабки концентрация, E_i - аралашма атомининг ионлашиш энергияси, T - намуна температураси, k - Больцман доимийси, α - энергетик сатҳлар силжишининг босим коэффициенти, P - қўйилган босим катталиги.

Ўзгарувчан босим таъсирида заряд ташувчиларнинг умумий концентрациясини қуйидаги кўринишда ифодалаш мумкин:

$$n = n_d + n_{ст} \quad (9)$$

бу ерда n_d - концентрация ўзгаришининг динамик улуши, $n_{ст}$ - статик босимдаги заряд ташувчиларнинг умумий концентрацияси.

Динамик гидростатик босим таъсирида заряд ташувчиларнинг умумий концентрациясини қуйидагича аниқлаш мумкин:

$$n = n_d + n_0 \exp \left(- \frac{E_i - \alpha P}{kT} \right) \quad (10)$$

(8) ва (9) ифодаларни ўзаро таққослаб, ўзгарувчан босим таъсирида заряд ташувчилар концентрацияси ўзгаришининг динамик улушини аниқловчи ифодага эга бўламиз:

$$n_d = n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{k(T + \Delta T)}\right) - n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha P}{kT}\right) \quad (11)$$

ёки:

$$n_d = n_{cm} \left(\exp\left(\frac{\Delta E}{kT} \frac{\Delta T}{T + \Delta T}\right) - 1 \right) \quad (12)$$

Ўзгарувчан босим таъсирида температуранинг нисбий ўзгаришини

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta T}{T + \Delta T} \quad (13)$$

кўринишида белгилаймиз.

ΔT импульсли босимнинг амплитуда қийматидан ва яримўтказгич хоссаларидан боғлиқ бўлганлиги учун босим ўзгаришининг бир хил қийматлари ва тезликларида ε_T дастлабки температура T га боғлиқ деб қараш мумкин. Яъни, T қанча кичик бўлса, ε_T шунча катта бўлади.

(13) ни ҳисобга олган ҳолда (12) ни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$n_d = n_{cm} \left(\exp\left(\varepsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT} - 1\right) \right) \quad (14)$$

Паст температураларда $\exp\left(\varepsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT}\right) \gg 1$, деб ҳисобласак, охириги (14)

ифода қуйидаги кўринишга келади:

$$n_d = n_{cm} \exp\left(\varepsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT}\right) \quad (15)$$

(15) ни ҳисобга олиб, ўзгарувчан босим таъсирида яримўтказгич орқали ўтаётган ток зичлигини аниқловчи қуйидаги ифодани олиш мумкин:

$$J = e \mu \vartheta n_{cm} \left(\exp\left(\varepsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT}\right) - 1 \right)$$

Олинган ифодадан кўринадики, ўзгарувчан босим таъсирида яримўтказгич орқали ўтаётган ток босим таъсирида ҳосил бўлаётган заряд ташувчилар концентрациясига боғлиқ бўлар экан. Бунда дастлабки температура қанча кичик бўлса, заряд ташувчилар концентрациясининг динамик улуши ҳам шунча катта бўлади.

Бу бобда сирт-барьер диод $Sb-p-Si < Mn > -Au$ структуралари характеристикаларига импульсли босим таъсири ҳам ўрганилди. Экспериментал тадқиқотлардан шу нарса аниқландики, бу структураларда токнинг тензорелаксацион ўзгариш манзараси кўриниш жиҳатдан компенсирланган $Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ кристаллардаги ўтказувчанликнинг релаксацион ўзгариш жараёнлари билан ўхшаш бўлса-да, сирт-барьер структураларда токнинг максимал ва статик қийматлари фарқи диодга қўйиладиган кучланишга боғлиқ бўлади. Структура температурасининг

амплитуда қиймати $P = 5 \cdot 10^8$ Па ва ўзгариш тезлиги $\partial P / \partial t \approx 10^8$ Па/с бўлган импульсли босим ёрдамида ўзгартирилди.

Кичик кучланишларда тўғри токнинг температуранинг амплитуда қийматига мос келадиган максимал қиймати ўзгармас босим шароитидаги статик қийматларидан сезиларли даражада катта бўлиши ўлчаш жараёнларида аниқланди. Бу ҳолатда (кичик тоқларда) импульсли ҳар томонлама босим таъсирида сирт-барьерли диод тоқининг кинетик ўзгариши $J(t)$ структура тоқининг температурага боғлиқлиги билан аниқланади. Импульсли гидростатик босим таъсирида токнинг ўзгаришидаги температуранинг улуши диодга бериладиган кучланишнинг ортиши билан компенсацияланиб, яъни камайиб боради.

Кучланишнинг $U_m \sim 5$ В қийматида диоднинг тўғри динамик тоқи статик ток билан мос тушади, яъни $J(t)$ боғланишда температура улушини тўла “компенсацияланади”. Кучланишнинг $U_m \geq 3$ В (базада ток ташувчиларнинг инжекцияси сезиларли роль ўйнайдиган) соҳаларида босим таъсирида пасайган потенциал барьер орқали инжекцияланиб ўтаётган ток ташувчилар сонининг ортиши, ток ўзгаришидаги температуранинг улушини компенсация қилиши мумкин.

Ўтказилган тадқиқотлар шуни кўрсатадики, импульсли гидростатик босим таъсирида диод тескари тоқининг температурага боғлиқлиги кучланишнинг кенг оралиғида (20 В гача) тескари кучланишга сезиларли даражада боғлиқ эмас ва $J_{\max} / J_{\text{см}} \approx 1.35$ га тенг.

$Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ намуналарда тензоўтказувчанлик бўйича ўтказилган тажрибалар натижалари асосида динамик ва статик тензосезгирлик коэффициентлари мос равишда қуйидаги формулалар бўйича ҳисобланди ва солиштирилди:

$$S_{\text{см}} = \frac{E^{\circ}}{P} \frac{\Delta \rho}{\rho_0}; \quad S_D = \frac{E^{\circ}}{P} \frac{\Delta I}{I_0}$$

Динамик тензосезгирлик коэффициенти S_D ток ўзгариши $J(t)$ нинг максимал қиймати $J_{\max}$ орқали ҳисобланди

Ўтказилган тадқиқотлар шуни кўрсатадики, дастлабки намуналардан фарқли ўлароқ компенсирланган $Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ намуналарда ташқи босимга нисбатан статик ва динамик тензосезгирлик компенсация даражасига боғлиқ равишда ошиб боради.

$Si < Mn >$ ва $Si < Zn >$ намуналар статик тензосезгирлигининг улар компенсация даражаси ошиши ва температуранинг камайиш туфайли ортиши босим таъсирида генерацияланган ортиқча ток ташувчиларнинг ўтказувчанлик ўзгаришидаги улуши эффективлигининг ортиши билан боғлаш мумкин. Импульсли босим ўзгариш тезлигининг (10^7 Па/с) кичик қийматларида $Si < Mn >$ намуналарда динамик тензосезгирлик коэффициенти S_D шу намуналардаги статик тензосезгирлик коэффициенти $S_{\text{см}}$ билан

мос тушади. Импульсли босим ўзгариш тезлигининг ортиши билан S_D коэффициентнинг қиймати тез ошади ва $\partial P/\partial t \approx 10^8$ Па/с қийматида $Si < Mn >$ намуналарда чуқур Mn сатҳларнинг қўшимча тензо-термо ионлашуви ҳиссбига S_D/S_{cm} нисбат 7 ÷ 8 марта катта бўлади.

Худди шунга ўхшаш натижалар компенсирланган $Si < Zn >$ намуналар учун ҳам олинди.

Бу тадқиқот натижалар ва усуллари тузилиши жиҳатдан содда бўлган изотроп босим тензоўзгартиргичларни яратиш ҳамда ионлашиш энергияси қийматини, яримўтказгичларда чуқур сатҳлар ўзгаришининг босим коэффициентни ва бошқа параметрларини аниқлаш имконини беради.

Диссертациянинг «Бир ўқли эластик деформация таъсирида компенсирланган кремний электрофизик хоссаларини тадқиқ қилиш» деб номланган тўртинчи бобида бир ўқли босим таъсирида компенсирланган ва иссиқлик ишлови берилган $Si < Mn >$, $Si < Zn >$ ва $Si < Ti >$ намуналарида тензоэффект ҳодисасини ва уларнинг намоён бўлиш механизмларининг тадқиқ этиш натижалари келтирилган.

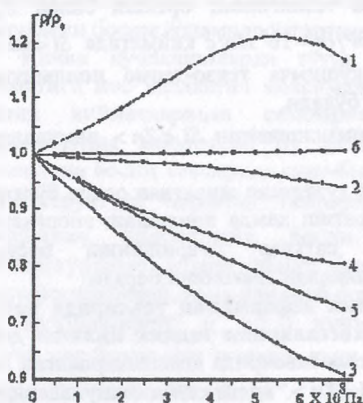
Бу намуналарда тензоўтказувчанликни тадқиқ қилиш деформациянинг $I \parallel X \parallel [111]$ ва $I \parallel X \parallel [100]$ шароитларида, босимнинг $X = (0 \div 6) \cdot 10^8$ Па қийматлари оралиғида хона температурасида олиб борилди.

Ўтказилган тадқиқотлар шуни кўрсатдики, дастлабки, компенсирланган, кучли компенсирланган ва ўта кучли компенсирланган намуналарда кристаллографик ўқнинг $[111]$ йўналишида берилган босим ортиши билан солиштирма қаршилик камаяди.

Нисбатан кучли тензоэффект дастлабки $p-Si < B >$ намуналарида кузатилди. Тадқиқ қилинаётган намуналарда компенсация даражасининг ортиши тензоқаршилик эффектини сусайтиради, яъни компенсация даражаси ортиши билан солиштирма қаршиликнинг ўзгариш тезлиги камаяди.

8-расмдан кўринадики, цинк ва марганец билан кетма-кет легирланган $p-Si < B, Mn, Zn >$ (6-эгри чизик) намуналарда солиштирма қаршилик бир ўқли босим ортиши билан деярли ўзгармай қолади. Иссиқлик ишлови берилган $p-Si < B >$ ($\rho = 40$ Ом·см) намуналарда босим ортиши билан солиштирма қаршилик камаяди, босим олинганда эса $\rho(X)$ боғлиқликда гистерезис кузатилади, яъни босим олинганда намуналарда ρ нинг охириги қиймати бошланғич қийматига нисбатан камайиб қолади (9 - расм, 1, 1' - эгри чизиклар).

Тажриба тадқиқот натижалари (8-расм) шуни кўрсатадики, компенсирланган $n-Si < P, Zn >$ намуналарда (1-эгри чизик) кристаллографик ўқнинг $[100]$ йўналиши бўйича босим қийматининг ортиши билан солиштирма қаршилик аввал ортади. $\rho(X)$ боғлиқликда $X > 0,5$ ГПа бошлаб ошиш тезлиги камаяди ва кейинчалик солиштирма қаршилик босим X ортиши билан камаяди.



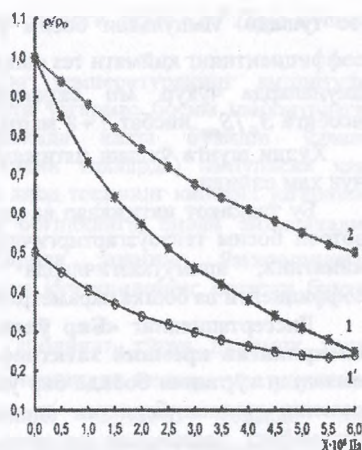
1- $n\text{-Si} <P, Zn> \uparrow || X || [100]$
 2- $n\text{-Si} <P, Zn>$, 3- $p\text{-Si} \uparrow || X || [111]$,
 4- $n\text{-Si} <B, TD>$, 5- $p\text{-Si} <B, Zn>$,
 6- $p\text{-Si} <B, Mn, Zn>$

8-расм. Компенсирланган кремний солиштирма қаршилигининг бир ўқли босим қийматига боғлиқлиги

Тензoeffект механизмларини аниқлаш мақсадида тадқиқ қилинаётган намуналарда деформациянинг юқорида келтирилган шароитларида Холл эффекти тадқиқ қилинди. Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, дастлабки ва синов $p\text{-Si} $ намуналарида босим қийматининг бутун оралиғида ковакларнинг концентрацияси ўзгармай қолади, чунки саёз сахтли аралашмалар хона температурасида тўлиқ ионлашган ҳолатда бўлади. Компенсирланган ва ўта компенсирланган $Si <Mn>$, $Si <Zn>$ намуналарда бир ўқли босим қийматининг ортиши билан электрон ва коваклар концентрациясининг ортиши, босим таъсирида кремнийдаги Mn ва Zn чуқур сатҳлар ионлашиш энергиясининг ўзгариши натижасида уларнинг тўлдирилганлик даражасининг ўзгариши билан боғланган, деб ҳисоблаш мумкин.

Дастлабки ва кучсиз компенсирланган намуналарда босим ортиши билан коваклар ҳаракатчанлиги ортади, ўта компенсирланган $n\text{-Si} <Mn>$ намуналарда электронларнинг ҳаракатчанлиги эса камаяди. Дастлабки ва кучсиз компенсирланган намуналарда деформация ўқининг ҳамма изоэнергетик эллипсоидларга нисбатан симметрик жойлашуви шароитида коваклар ҳаракатчанлигининг ортишини валент соҳадаги енгил ва оғир коваклар соҳаларига ажралиши билан боғлаш мумкин.

Кучли ва ўта кучли компенсирланган $Si <Mn>$ намуналарида босимнинг [111] кристаллографик ўқи йўналиши бўйича таъсири шароитида коваклар ва электронлар ҳаракатчанлигининг камайиши тензoeffект



1 - Иссиқлик ишловидан кейинги $p\text{-Si} $, $\rho = 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$,
 2 - дастлабки $p\text{-Si} $, $\rho = 4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

9-расм. $p\text{-Si} $ намуналарида тензоқаршилиқнинг бир ўқли босимга боғлиқлиги, $T=293\text{K}$

назарияси тасаввурларига мос келмайди. Ҳаракатчанликнинг бундай камайиши [111] ўқи йўналишида деформацияланганда кремний кристалли ҳажмидаги ножинсликлар электр потенциалининг экранлаш радиусининг ошиши натижасида ток ташувчилар сочилишининг кучайиши билан боғлиқ, деб тахмин қилиш мумкин. $n-Si < P, Zn >$ намуналарда деформациянинг $I \parallel X \parallel [100]$ шароитида электронлар ҳаракатчанлигининг камайиши ажралган соҳаларда электронларнинг қайта тақсимланиши билан боғлиқ. Шунингдек, деформациянинг $I \parallel X \parallel [111]$ шароитида ўтказувчанлик соҳасининг ажралишлари ва эквивалент соҳалар бўйлаб электронларнинг қайта тақсимланиши содир бўлмаслиги сабабли $n-Si < P, Zn >$ намуналарда босим X нинг ортиши билан электронлар ҳаракатчанлигининг камайиши, силжиш деформацияси натижасида электронлар кўндаланг эффектив массасининг ортиши билан тушунтирилади.

Деформациянинг $I \parallel X \parallel [111]$ шароитида ўтказувчанлик тури $p \rightarrow n$ ўзгарган $n-Si < B, Tl >$ намуналарда кузатилаётган электронлар ҳаракатчанлигининг аномал ортишини, $p-Si < B, Zn >$ ва $p-Si < B, Mn, Zn >$ намуналарда коваклар ҳаракатчанлигининг доимийлиги ва камайишини уларнинг потенциал рельефининг ўзгариши ҳисобига Zn ва Mn аралашма марказлари билан боғлиқ ножинсликларда сочилиши билан боғлаш мумкин.

Босим олинганда иссиқлик ишлови берилган солиштирма қаршилиги $\rho = 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ бўлган $p-Si < B >$ намуналарда коваклар ҳаракатчанлигининг босимга боғлиқлиги $\mu(X)$ да гистерезис кузатилади ва натижада коваклар ҳаракатчанлигининг дастлабки қиймати ортиб қолади. Бу ҳолатда [111] йўналишида босим таъсирида иссиқлик ишлови берилган намуналарда коваклар ҳаракатчанлигининг бундай ўзгариши коваклар ҳаракатчанлигининг ортишига ва $\rho(X)$, $\mu(X)$ боғланишлардаги гистерезиснинг намоён бўлишига сабаб бўладиган кремний ҳажмида аралашмалар ҳосил қилган электронейтрал бирикма ва микро нуқсонларнинг босим остида емирилиш эффекти билан боғлаш мумкин.

Солиштирма қаршилиги $\rho = 296 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ бўлган компенсирланган $p-Si < B, Mn >$ намуналар асосида олинган сирт-барьерли диод структура-ларни электрофизик параметрларига бир ўқли эластик деформациянинг таъсири ҳам ўрганилди. Шоттки барьерли текислиги кристаллографик [111] йўналишига перпендикуляр қилиб олинган. Ўтказилган тадқиқотлар шуни кўрсатадики, бир ўқли босим ортиши билан тўғри ток аввал монотон равишда ортиб боради ва $X > 6 \cdot 10^8 \text{ Па}$ дан бошлаб, $J(X)/J_0$ боғланишида секинлашиш ва тўйиниш соҳаси бошланади ва бунда $U = 2 \text{ В}$ да тўғри токнинг максимал ўзгариши 2,5 мартани ташкил қилади. Шуни таъкидлаш керакки, токнинг босимга сезгирлиги тўғри йўналишда $U > 2 \text{ В}$ бўлганда қуйилган кучланишга боғлиқ бўлмай қолади. Тескари йўналишда “тешиб ўтиш” кучланишидан узокроқ соҳада кучланишнинг бир хил қийматларида

диод тескари токнинг бир ўқли эластик деформацияга сезгирлиги, тўғри токнинг сезгирлигидан катта бўлади

Шуни таъкидлаш лозимки, сирт-барьерли $Sb-Si < B, Mn > -Au$ диодлар тескари токининг деформацияга сезгирлиги тўғри токи сезгирлигидан фарқли ўларок кучланишнинг кенг диапазонида тескари кучланишдан боғлиқ бўлиб қолади.

Бир ўқли босим таъсирида сирт-барьерли диодлар тўғри токининг ўзгариши қуйидаги ифодага

$$\frac{J_x}{J_0} = \frac{\mu_0}{\mu_x} \exp\left(\frac{q\Delta\phi_s}{kT}\right)$$

асосан базадаги ток ташувчилар ҳаракатчанлиги ва потенциал барьер баландлигининг бир вақтда ўзгариши билан боғлиқ (бу ерда J_x , μ_x - мос равишда ток ва коваклар ҳаракатчанлигининг $X \neq 0$ бўлгандаги қиймати).

Тажриба натижалари ва уларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, $Sb-Si < B, Mn > -Au$ сирт-барьерли диод тўғри токининг ўзгариши, асосан, коваклар ҳаракатчанлиги, потенциал барьер баландлигининг ўзгариши ва ички мусбат тескари алоқа механизми намоён бўлиши билан боғлиқ. Бу берилган структуралар тескари токининг бир ўқли босим таъсирида ошиб бориши ҳажмий зарядлар соҳаси ва диод базасида мувозанатда бўлмаган ток ташувчилар генерациясининг кучайиши, шунингдек, Mn чуқур сатҳларининг тўлдирилганлик даражасининг ўзгариши туфайли коваклар концентрациясининг ошиши билан боғлиқ, деб қараш мумкин. Тескари йўналишда қўйилган кучланишнинг ошиши билан диод тескари токи сезгирлигининг ортишини, электр майдонни кучайиши ва бунинг натижасида ҳажмий зарядлар соҳасида ток ташувчилар дрейф тезлигининг ошиши билан тушунтириш мумкин.

Диссертациянинг «Электрон ўлчаш техника соҳасида деформацион эффектларнинг қўлланилиши» деб номланган бешинчи бобида мавжуд тензоўзгартиргичлар сезгирлигидан бир неча бор юқори бўлган таклиф қилинган янги тензоўзгартиргич конструкцияси баён қилинган. Бу қурилмада тензосезгирликнинг юқори бўлиши пневмокучайтиригичдан фойдаланиш эвазига эришилади. Тензосезгир элемент сифатида чуқур сатҳли аралашмалар билан компенсирланган кремний асосида тайёрланган Шоттки барьерли структурадан фойдаланилади.

Агар тензосезгир элемент сифатида солиштирма қаршилиги 10^2 Ом·см бўлган $Si < Mn >$ асосида олинган Шоттки барьерли структурадан фойдаланилса, конструкциянинг умумий тензосезгирлиги тахминан $S_k = 6 \cdot 10^5$ га тенг бўлади. Бунда тензосезгир элементнинг сезгирлиги $S_{хс} = 600$ ни ташкил қилади. Демак, таклиф қилинаётган конструкциянинг тензосезгирлиги структуранинг сезгирлигидан уч тартибга юқори экан.

Тензосезгир $Au-Si < Mn > -Sb$ элементнинг тензоўтказувчанлиги ўлчанадиган босимнинг ҳамма диапазонида чизиқли характерга эга ва рентабиллиги 96÷97% ни ташкил этади.

Тензосезгир элемент сифатида $Au-Si<Mn>-Sb$ Шоттки барьерли структуралар қўлланилган универсал тензоўзгартиргич лаборатория намунаси яратилди. Босимнинг $P=0\div 10^6$ Па интервалида қурилманинг тензосезгирлик коэффиценти $S=1\cdot 10^6\div 3.4\cdot 10^{-3}$ В/Па га тенг.

Кучли компенсирланган $Si<Mn>$ намуналарда импульсли босим таъсирида юз берадиган тензо-термо эффект асосида импульсли босимнинг динамик тензоўзгартиргичи яратилди. Таклиф этилаётган қурилманинг динамик тензосезгирлиги импульсли босимнинг $P=10^4\div 10^8$ Па диапазонида $(2\div 3)\cdot 10^5$ га тенг.

Диссертациянинг илова қисмида босимнинг статик ва динамик режимларида $P=(0\div 10)\cdot 10^8$ Па ва температуранинг $T=280\div 530$ К интервалларида тензоқаршилиқ, тензо-термо-Холл эффектларини, ярим-ўтказгич материалларда киришма атомларининг емирилиш жараёнлари кинетикасини тадқиқ қилиш имкониятини берадиган пневмокучайтиргичли гидростатик босим қурилмаси баён қилинган. Компенсирланган кремний ва $Au-Si<Mn>-Sb$ турдаги Шоттки барьерли структураларни тензоелектрик хоссаларини бир ўқли эластик деформация таъсирида $130\div 430$ К да ва $0\div 9\cdot 10^8$ Па интервалларда тадқиқ қилиш учун махсус универсал қурилмадан фойдаланилди.

ХУЛОСАЛАР

Чуқур сатҳлар ҳосил қилувчи Au , Mn и Zn киришма атомлари билан легирланган кремний ва улар асосидаги структураларда тензостимуллашган ҳодисаларни ва уларнинг физик механизмларини ўрганиш бўйича ўтказилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. $Si<Mn>$ ва $Si<Zn>$ намуналар ҳар томонлама гидростатик босимнинг статик режимида солиштира қаршилигининг ўзгариши, асосан термик генерация ва Si даги Mn ва Zn чуқур сатҳлар ионлашув энергиясининг барик ўзгариши натижасида асосий ток ташувчилар концентрациясининг ўзгаришига боғлиқ бўлиши аниқланган.

2. Сирт барьерли $Sb-Si<Mn>-Au$ диод структуралар тўғри токининг ҳар томонлама гидростатик босим таъсирида ўзгариши асосан потенциал барьер баландлигининг ўзгариши туфайли юз бериши, кучланишнинг $0.5<U<3$ В қийматларида токнинг ўзгариши, асосан ҳар томонлама гидростатик босим таъсирида барьер ва диод базасига кучланишнинг таъсири билан боғлиқлиги аниқланган.

3. $Si<B,Mn>$ ва $Si<P,Zn>$ намуналарида токнинг динамик релаксацион ўзгариши импульсли босим таъсирида кузатиладиган тензо-термоэффект натижасида температуранинг синхрон ўзгариши туфайли содир бўлиши аниқланган.

5. $Si<B,Mn>$ ва $Si<P,Zn>$ намуналарнинг динамик тензоўтказувчанлиги ва тензосезгирлик коэффиценти ўтказувчанлик турига боғлиқ

бўлмаган ҳолда уларнинг компенсация даражаси, импульсли босимнинг амплитудаси ва ўзгариш тезлиги ортиши билан кучайиши аниқланган.

6. Mn , Zn , Au чуқур сатҳларнинг ионлашув энергиялари ва уларнинг босим коэффициентлари аниқланган.

7. Тадқиқ қилинаётган намуналарда босим амплитудасининг катта қийматларида тензостимуллашган эффектнинг ток ўзгаришидаги улуши температура улушидан катта бўлиши тажрибада тасдиқланган.

8. $[111]$ кристаллографик ўқ бўйича қўйилган деформация таъсирининг ортиши билан $p-Si < Mn >$ ва $p-Si < Zn >$ намуналарда солиштира қаршиликнинг камайиши тензоэффект чуқур сатҳлар тўлдирилиш даражаси ва ток ташувчиларнинг кремний ҳажмидаги киришмалари нуқсонлар билан ўзаро таъсирлашув потенциалининг ўзгариши натижасида ток ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигининг ўзгариши туфайли юз бериши аниқланган.

9. Дастлабки ва иссиқлик ишлови берилган $p-Si < B, TI >$ намуналарда бир ўқли $I \parallel X \parallel [111]$ босим шароитида тензоқаршилик эффекти фақат асосий ток ташувчилар ҳаракатчанлигининг ўзгариши билан боғлиқлиги, $[111]$ кристаллографик йўналишдаги бир ўқли деформация эса иссиқлик ишлови берилган Si ҳажмида ҳосил бўладиган бошқариб бўлмайдиган киришма атомлари бирикмаларининг емирилишига олиб келиши аниқланган.

10. Тадқиқ қилинаётган сирт-барьерли диод структураларнинг ток бўйича бир ўқли босимга сезгирлиги кучланишнинг тескари йўналишида тўғри йўналишдагига нисбатан катта эканлиги аниқланган.

11. Компенсирланган кремний асосида пневмокучайтиргичли тензоўзгартиргич яратилган ва унинг тензосезгирлик коэффициенти $S_k = 6 \cdot 10^5$ га тенглиги, $Au-Si < Mn > -Sb$ Шоттки барьерли структура асосида эса кенг диапазонда босимни ўлчаш имконини берувчи универсал тензоўзгартиргич яратилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.28.02.2018.FM.60.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ АНДИЖАНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА

ТУРСУНОВ ИКРОМЖОН ГУЛАМЖОНОВИЧ

**ТЕНЗОСТИМУЛИРОВАННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В
КОМПЕНСИРОВАННОМ КРЕМНИИ И В ПОВЕРХНОСТНО –
БАРЬЕРНЫХ ДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ НА ЕГО ОСНОВЕ**

01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

АНДИЖАН – 2018

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан, за номером B2018.2.DSc/FM43

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

Научный консультант: Маматкаримов Одилжон Охундаевич
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Каримов Абдулазиз Вахитович
доктор физико-математических наук, профессор

Отажонов Салимжон Мадрахимов
доктор физико-математических наук, профессор

Нуриддинов Изатилла
доктор физико-математических наук, профессор

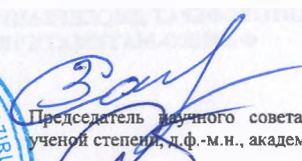
Ведущая организация: Каракалпакский государственный университет

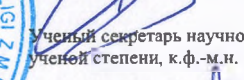
Защита диссертации состоится «30» 11 2018 года в 14 часов на заседании Научного совета DSc.28.02.2018.FM.60.01 при Андижанском государственном университете. Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университет, дом 129. Зал конференций Андижанского государственного университета Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz

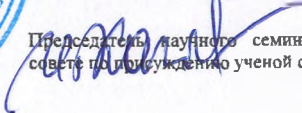
С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Андижанского государственного университета (зарегистрирована за № 026). Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университет, дом 129. зал конференций Андижанского государственного университета. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz

Автореферат диссертации разослан «14» 11 2018 г.
(протокол рассылки № 8 от «14» 11 2018 г.).




С.Зайнабидинов
Председатель научного совета по присуждению
ученой степени, д.ф.-м.н., академик


А.О. Курбанов
Ученый секретарь научного совета по присуждению
ученой степени, к.ф.-м.н.


И.А. Каримов
Председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению ученой степени, д.ф.-м.н.

Введение (Аннотация докторской диссертации (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день в мире в бурно развивающейся области физики полупроводников уделяется особое внимание одному из перспективных направлений - изучению механизмов проявления тензостимулированных эффектов в полупроводниковых материалах и структурах легированных примесями создающими глубокие примесные уровни. В этом аспекте изучение физических процессов протекающих при изотропной упругой и одноосной деформации в кремнии легированном примесями Au, Mn и Zn и структурах на его основе является одним из важных задач.

В настоящее время в ведущих научных центрах мира большое внимание уделяется проведению научных исследований по созданию новых полупроводниковых материалов с заданными свойствами путем легирования их примесными атомами, повышению стойкости и чувствительности электрофизических параметров этих материалов к различным внешним воздействиям, в частности радиации, температуре и давлению. В этом аспекте одним из важных задач является проведение целевых научных исследований в следующих направлениях: изучение влияния изотропной упругой деформации на электрофизические свойства легированного марганца, цинком и золотом монокристаллов кремния, определение механизмов проявления тензоэффектов в них; изучение кинетических тензорелаксационных явлений и влияния изотропной и одноосной упругой деформации на вольт-амперные характеристики диодных структур на основе легированного кремния, раскрытие физических механизмов тензоэффектов в кремнии с глубокими уровнями в условиях одноосной и импульсной изотропной упругой деформации.

В Республике значительное внимание уделяется вопросам создания на основе полупроводниковых материалов универсальных тензопреобразователей нового типа, стабильно функционирующих в экстремальных условиях. В стратегии развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах отмечены следующие задачи «стимулирование научно-исследовательской и инновационной деятельности, создание эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений в практику, создание при высших образовательных учреждениях и научно-исследовательских институтах научно - экспериментальных специализированных лабораторий, центров высоких технологий, технопарков»¹. В этом плане особое значение имеют вопросы исследования тензоэлектрических явлений в компенсированном кремнии и поверхностно барьерных структурах на его основе и физических процессов определяющих тензорезистивные свойства полупроводниковых материалов и структур. Это в свою очередь позволит раскрыть роль

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.

деформации в формировании функциональных характеристик полупроводниковых структур.

Данная диссертационная работа в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года и №-ПП-1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2010 года и №-ПП-2789 «О мерах в дальнейшем совершенствованию деятельности организаций Академии наук, управления и финансирования их научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно - правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энегетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино - и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации¹.

Научные исследования по воздействию деформации на полупроводниковые структуры проводятся в ведущих мировых центрах и университетах, в том числе, University of Florida Department Electrical and Computer Engineering (США), в институте физики полупроводников имени В.Е.Лашкарева (Национальной академии наук Украины), в Луцийском Национальном техническом и Волинском Национальном университетах (Украина), в Нижние - Новгородском институте физики микроструктур (Россия), в физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (Россия), Физико-техническом институте, Институте ядерной физики (Узбекистан).

В ходе проведения научных исследований в мире по изучению влияния внешней деформации на электрофизические свойства полупроводников и структур на их основе были получены следующие научные результаты: в University of Florida Department Electrical and Computer Engineering изучается тензозффект в полупроводниковых материалах, МОП транзисторах и пьезорезистивные эффекты в сенсорах, исследования тензосопротивлений п-Ge, разной кристаллографической ориентации при наличии сильного магнитного поля и без него ведутся в институте физики полупроводников имени В.Е.Лашкарева (Национальной академии наук Украины).

Исследования влияния одноосной упругой деформации на подвижность носителей тока в монокристаллах кремния при наличии глубоких энергетических уровней ведутся в Луцийском Национальном техническом и Волинском Национальном университетах (Украина) и в других научных центрах мира. Исследования влияния одноосного давления на

¹ Обзор международных научных исследований по теме проведен на основе Physics of strain effects in semiconductors and metal-oxide-semiconductor field-effect transistors // journal of Appliend physics, 101.104503 (2007) и др. источников.

электрофизические свойства 6H-SiC p-n-структур проводятся в Физико-техническом институте Академии наук Российской Федерации; в институте физики микроструктур (Россия) ведутся исследования влияния одноосного давления на релаксацию тока в кремнии; в физико-техническом институте (Узбекистан) получены многослойные структуры на основе твердых растворов кремния-германия и изучены их электрофизические свойства.

В настоящее время в мире проводятся экспериментальные исследования по изучению влияния изотропной и анизотропной упругой деформации на электрофизические свойства полупроводниковых материалов и структур на их основе. В частности проводятся исследования по созданию чувствительных к внешней деформации структур на основе кремния и германия легированных с примесными атомами; изучению механизма изменения электрофизических свойств легированного монокристаллического кремния; изучению влияния одноосной упругой деформации различной ориентации на электрофизические свойства кремния и германия; изучению влияния деформации на параметры многослойных полупроводниковых структур, а также по созданию высокочувствительных тензодатчиков на основе полупроводниковых материалов и структур.

Степень изученности проблемы. Теоретические исследования деформационных эффектов в кремнии и германии и МОП полевых транзисторах на их основе проведены Y.San, S.E.Thompson, (США), теоретически рассмотрены вопросы влияния давления на параметры полупроводниковых структур В.С. Осадчуком и Н.Л. Билоконом (Украина), изучен термоэлектрический эффект обусловленного термоупруго-деформационным механизмом в p-Ge, А.М. Мусаевом (Россия).

В работах академика М.К.Бахадырханова¹ изучен тензорезистивный эффект в сильно компенсированном кремнии в зависимости от типа, характера компенсирующих примесей и кристаллографического направления при одноосном упругом сжатии. В сильнокомпенсированном кремнии обнаружен эффект возбуждения автоколебаний тока, стимулированных ОУС, а также изучено влияние одноосного сжатия на фотопроводимость $Si < B, Mn >$. Фазовые портреты деформационных явлений в легированном кремнии при переменном давлении теоретически изучены профессором Г. Гулямовым².

Однако, несмотря на многочисленные исследования до настоящего времени остаются малоизученными вопросы, связанные с изучением и практическим применением тензостимулированных явлений и физические механизмы их проявления в кремнии с глубокими примесными уровнями и структур на их основе, являющиеся важным элементом современной

¹ Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Зикриллас Х.Ф. Автоколебания тока в компенсированном кремнии при деформации // Электронная обработка материалов. 2000, №6, стр.53–57.

² Gulyamov G., Gulyamov A.G., Muhitdinova F.R. Influence of Recombination Centers on the Phase Portraits in Nanosized Semiconductor Films. Journal of Modern Physics–USA, 2016, 7, pp. 1661-1667

микроэлектроники и электронного приборостроения при различных условиях воздействия изотропной и анизотропной деформации.

Связь темы диссертации с тематическими планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Национального университета Узбекистана по темам: ОТ-Ф2-28 «Поверхностные и объемные квантово-размерные эффекты в легированном кремнии и влияние их на процессы фотогенерации и рекомбинации носителей заряда в *p-n* структурах» (2012-2016 гг.); ОТ-Ф2-68 «Механизмы формирования микро - и нанообъединений, и их роль в создании многослойных структур с широкими функциональными возможностями» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является установление особенностей тензостимулированных явлений и физических механизмов их проявлений в кремнии легированном примесями Au, Mn и Zn создающими глубокие энергетические уровни и в структурах на их основе.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи исследований:

исследование влияния изотропной упругой деформации на электропроводимость образцов $Si < Au >$, $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ и выявление физических механизмов тензоэффекта в этих образцах.

изучение влияния изотропной и одноосной упругой деформации на вольтамперной характеристики поверхностно - барьерных диодных структур типа $Sb - Si < Mn > - Au$.

исследование тензорелаксационных кинетический явлений в компенсированных образцах $Si < Au >$, $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ при импульсном (ударном) воздействии изотропной упругой деформации.

исследование физических механизмов динамического тензоэффекта в образцах $Si < Au >$, $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ и тензоэффекта в образцах $Si < Au >$, $Si < B, Mn >$ и $n - Si < P, Zn >$ в условиях одноосного сжатия $I \parallel X \parallel [100]$ и $I \parallel X \parallel [111]$.

Объектами исследования являются кремний, легированный примесями золота, цинка, марганца и поверхностно-барьерные структуры на его основе.

Предметом исследования являются механизмы физических явлений, стимулированных изотропным и анизотропным давлениями в легированном кремнии, а также в структурах типа БШ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются электрические и магнитоэлектрические методы изучения тензопроводимости полупроводниковых материалов, токовые характеристики полупроводниковых структур и определения концентрации и подвижности носителей тока при деформации.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

установлено, что в статическом режиме воздействия изотропной упругой деформации электропроводимость образцов $Si < Au >$, $Si < Mn >$ и

$Si < Zn >$ увеличивается за счёт изменения концентрации основных носителей тока, вследствие барического смещения глубоких энергетических уровней Au, Mn, Zn в Si ;

определены энергии ионизации глубоких центров Au, Mn, Zn и коэффициенты давления их изменения в монокристаллическом кремнии;

определено, что чувствительность как прямого, так и обратного токов поверхностно-барьерных диодных $Sb-Si < Mn > -Au$ структур к всестороннему гидростатическому сжатию зависит от напряжения на диоде за счет изменений, происходящих в базе и барьере диода;

установлено, что тензорелаксация тока в образцах $Si < Au >$, $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ при адиабатическом воздействии ВГС, связаны с аналогичной релаксацией их температуры, вызванной термоэффектом, стимулированным ударным давлением;

выявлены физические механизмы объясняющие эффект динамической тензопроводимости, которые основаны на изменении электропроводимости в образцах $Si < Au >$, $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ связанной с изменением концентрации основных носителей тока за счёт их термической генерации и барического смещения энергетических уровней примесей Au, Mn и Zn в запрещенной зоне кремния;

установлено, что при больших амплитудах импульсного давления вклад тензостимулированного эффекта в изменение тока в исследуемых образцах dominates по сравнению с вкладом температуры.

показано, что тензоэффект в компенсированных образцах $Si < P, Au >$, $Si < P, Zn >$, $Si < B, Mn >$ в условиях одноосного сжатия в кристаллографических направлениях $I \parallel X \parallel [100]$ и $I \parallel X \parallel [111]$ связан с одновременными изменениями концентрации и подвижности носителей тока;

установлено, что эффект тензосопротивления в термообработанных образцах обусловлен в основном изменением подвижности основных носителей тока, а одноосное сжатие по кристаллографическому направлению $[111]$ приводит к барическому расщеплению неконтролируемых примесных микрообъединений образующихся в объёме кремния при термической обработке.

Практические результаты исследований заключаются в следующем:

в возможности использования $Au-Si < B, Mn > -Sb$ -поверхностно-барьерной диодной структуры с общей тензочувствительностью $S_k = 6 \cdot 10^5$ и тензочувствительностью самой структуры $S_{TЧЗ} = 600$ в качестве тензопреобразователя давления с пневмоусилителем;

созданы лабораторные образцы статических и динамических тензопреобразователей и датчиков давления на основе исследуемых образцов и структур, отличающихся большим коэффициентом тензочувствительности по сравнению с промышленными тензодатчиками.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением обоснованных современных экспериментальных методов исследования

тензопроводимости материалов, вольт-амперных и высокочастотных вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур, правильным выбором объектов исследований, сопоставлением некоторых экспериментальных результатов с литературными.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов работы заключается в расширении представлений о явлениях, происходящих в компенсированном кремнии и в структурах на его основе при воздействии изотропной и анизотропной деформации.

полученные экспериментальные результаты позволяют создать современные датчики давления, тензочувствительность которых больше чем у существующих тензодатчиков

Внедрение результатов исследования. В результате исследования тензостимулированных явлений и их физических механизмов в кремнии легированном примесями Au, Mn и Zn и в структурах на его основе:

экспериментальные результаты, полученные при исследовании тензо-эффекта, их физических механизмов и наблюдаемые изменения высоты потенциального барьера и определение его барического коэффициента в компенсированном кремнии и в структурах $Au-Si < B, Mn > -Sb$ использованы при выполнении зарубежного гранта на тему: «Transporte Mono-y Bipolar en Estructuras Semiconductoras» при изучении влияния деформации на ВАХ структур и объяснении причины изменения тока в них. (Справка № 6171 Национальный исследовательский институт Мексики от 2 мая 2018 года). Использование научных результатов позволило объяснить физические процессы происходящие в поверхностно-барьерных структурах при воздействии изотропной деформации;

полученные результаты при изучении влияния статического и переменного давления на вольт-амперные характеристики диодных структур и установленные факты изменения под давлением прямого и обратного токов структуры в зависимости от напряжения использованы при выполнении научного гранта ОТ-Ф2-077 «Динамика деформационных эффектов полупроводниковых плёнок и воздействие электромагнитных волн на токи, возникающие в полупроводниковых плёнках» для изучения влияния деформации на фототоки и фотоэдс полупроводниковых структур. (2007-2011), (Справка №89-03-2128 Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 31 мая 2018 года). Использование научных результатов позволило им создать фазовый портрет деформационных эффектов в полупроводниковых структурах;

на основе барьера Шоттки типа $Au-Si < B, Mn > -Sb$ структур был создан универсальный тензопреобразователь, позволяющий измерять давление в широком интервале, который используется в акционерном обществе «ФОТОН» (Справка №02-1330 АО «Узэлтехсаноат» от 14 июня 2018 года) в технологических процессах научно-исследовательских работ. Использование научных результатов позволило повысить стабильность физических параметров производимых полупроводниковых структур к различным видам

деформации.

разработана установка, которая позволяет исследовать тензoeffект в полупроводниках и структурах на их основе при всестороннем гидростатическом давлении, которая используется в акционерном обществе «ФОТОН» (Справка №02-1330 АО «Узэлтехсаноат» от 14 июня 2018 года) в технологических процессах научно-исследовательских работ. Использование научных результатов позволило исследовать тензoeffект в полупроводниках и структурах на их основе при всестороннем гидростатическом давлении.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных и 8 республиканских научно - практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 30 научных трудов, из них 11 статей в научных журналах, в том числе 6 статей в зарубежных международных реферируемых журналах и 19 работ в трудах научных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, 3 приложений и содержит 190 страниц текста, включает 61 рисунок и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность проблемы и темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения о внедрении результатов исследования.

В первой главе «Тензoeлектрические свойства полупроводников и полупроводниковых структур» диссертационной работы приведен обзор литературных данных по исследованиям влияния как всестороннего гидростатического, так и одноосного упругого сжатия на тензoeлектрические свойства полупроводников и характеристики полупроводниковых диодных структур.

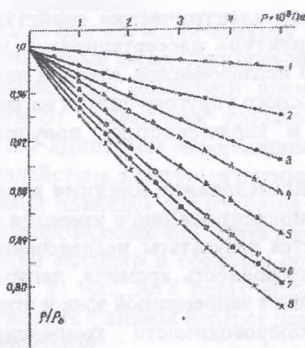
Во второй главе «Исследование влияния изотропного давления на электропроводность компенсированного кремния и ВАХ ПБД структур на его основе» приводятся результаты исследования влияния изотропной деформации на электропроводность кремния, легированного Au , Mn и Zn создающие глубокие уровни в запрещенной зоне и структурах на его основе.

Исследования тензопроводимости компенсированных и сильно-компенсированных образцов $Si < Au >$ при всестороннем гидростатическом сжатии показали, что с увеличением давления до $P = (0 \div 6) \cdot 10^8 \text{ Па}$ ток в данных образцах сначала увеличивается и после выдержки в течение 20 сек постепенно уменьшается до начального значения ($P = \text{const}$). Такое поведение тензопроводимости в данных образцах возможно связано с временным опустошением уровней атомов золота и переходом электронов в зону проводимости под действием давления. Однако этот процесс

продолжается не более 20 секунд и электроны возвращаются на исходные уровни атомов золота и начинается спад тока. Измерения тензосопротивления при условиях статического воздействия ВГС в контрольных и компенсированных образцах $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ показали, что удельное сопротивление (ρ) во всех образцах с ростом ВГС уменьшается, причём наибольшие изменения ρ наблюдаются в сильно компенсированных и наименьшие изменения в слабо компенсированных и контрольных образцах (рис.1).

Исследование эффекта Холла в данных образцах при статическом режиме ВГС показали, что концентрация носителей тока в исходных и контрольных образцах не меняется, а концентрация во всех остальных образцах с ростом ВГС увеличивается, причём с ростом их удельного сопротивления скорость изменения концентрации также возрастает.

Полученные зависимости $n(P)$ в исходных и контрольных образцах согласуются с теорией тензоэффекта, так как мелкие примесные уровни в кремнии являются полностью опустошёнными, а глубокие примесные уровни могут быть частично ионизованными. При воздействии давления изменение степени заполнения глубоких уровней приводит к изменению концентрации носителей заряда в разрешённых зонах. Исследованиями установлено, что значения подвижности основных носителей в исходных, контрольных и компенсированных образцах $p-Si < Mn >$ и $n-Si < Zn >$ незначительно возрастает с ростом ВГС, а в перекомпенсированных образцах $n-Si < Mn >$ с удельным сопротивлением $\rho = 4,96 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ подвижность электронов с ростом ВГС наоборот уменьшается.



- 1- исходные и контрольные $p-Si < B >$, $\rho = 4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 2- $p-Si < Mn >$
 $\rho = 2,62 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 3- $p-Si < Mn >$ $\rho = 8 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 4- $n-Si < Zn >$
 $\rho = 3,4 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 5- $n-Si < Zn >$ $\rho = 4,35 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 6- $p-Si < Mn >$
 $\rho = 4,95 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 7- $n-Si < Mn >$ $\rho = 4,3 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 8- $p-Si < Mn >$
 $\rho = 3,62 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

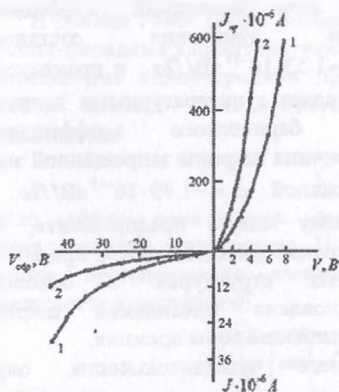
Рис. 1. Тензосопротивление в образцах $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ при статических ВГС

Небольшое изменение величины подвижности носителей в $p-Si < B >$ $p-Si < P >$ и слабокомпенсированных образцах при ВГС, возможно, связано с изменением энергии носителей заряда вследствие смещения краев зоны проводимости и валентной зоны. Уменьшение подвижности электронов в компенсированных образцах $Si < Mn >$ при ВГС, объясняется с увеличением концентрации рассеивающих ионизованных центров Mn и потенциальной энергии взаимодействия носителей заряда с этими центрами.

Из температурных зависимостей концентрации были определены энергия ионизации ГУ Mn , Zn , Au и коэффициенты давления её изменения: $E_{Mn} = E_c - 0.51$ эВ, $E_{Zn} = E_c - 0.53$ эВ, $E_{Au} = E_v + 0.36$ эВ, и $\alpha_{Mn} = 1.82 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па, $\alpha_{Zn} = 1.44 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па, $\alpha_{Au} = 1.96 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па.

В данной главе также приводятся результаты исследования влияния изотропного давления на ВАХ диодных структур $Sb-Si < Mn > -Au$ полученных на основе компенсированного $Si < Mn >$ (рис. 2) при значениях ВГС $P=0$ (крив.1) и $P=5 \cdot 10^8$ Па (крив.2) в статическом режиме воздействия. Из рисунка видно, что ток как в прямом, так и в обратном напряжениях смещения растёт пропорционально давлению. Токовая чувствительность к ВГС данных структур при одинаковых приложенных напряжениях в прямом направлении больше, чем в обратном.

На рис.3 приведены зависимости прямого тока структуры в относительных единицах от приложенного давления в диапазоне $P=0 \div 5 \cdot 10^8$ Па при напряжениях смещения $U=0.5, 1, 2$ и 3 В и зависимость $J_p/J_0 = f(U)$ при $P=5 \cdot 10^8$ Па.



1- $P=0$; 2- $P=5 \cdot 10^8$ Па

Рис. 2 ВАХ ПБД структур $Sb-Si < Mn > -Au$

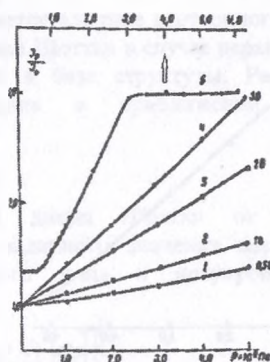


Рис.3. Зависимость относительного изменения тока прямой ветви ВАХ ПБД $Sb-Si < Mn > -Au$ от статического ВГС (1-4) и напряжения (5).

Видно, что тензотоки данных ПБД сильно зависят от приложенного напряжения смещения U , при этом относительное значение токов

J_p/J_0 возрастают с ростом U (крив.1-4). Из кривой 5 видно, что в зависимостях $J_p/J_0 = f(U)$ наблюдаются три характерных участка. В диапазоне напряжений до 0,5 В токовая чувствительность структуры постоянна и $J_p/J_0 = 1.36$.

Плотность тока при малых значениях напряжения ($U \leq 0.5$ В) через идеальный поверхностно-барьерный диод можно определить из выражения:

$$J = J_0 [\exp(qU/kT - 1)] \quad (1)$$

где J_0 - плотность тока насыщения для термоэлектронной эмиссии:

$$J_0 = A^* T^2 \exp(-q\phi_n/kT) \quad (2)$$

В области малых токов, когда ($U \leq 0.5$ В) ВАХ ПБД можно описывать выражением (1), и вычислить высоту потенциального барьера с помощью выражения:

$$\phi_{n,0} = \frac{kT}{q} \ln \frac{A^* T^2}{J_n} \quad (3)$$

где $A^* = 79.2$ - постоянная Ричардсона для дырок, J_0 - ток насыщения, определялась линейной экстраполяцией прямой ветви ВАХ ($U < 0.5$ В) к $U = 0$. Расчеты показали, что постоянная Ричардсона при всестороннем сжатии до $P = 5,5 \cdot 10^8$ Па изменяется всего на $\sim 0,98$ %. На рис.4 приведена зависимость высоты потенциального барьера от значения приложенного ВГС в диапазоне давлений $P = 0 \div 6 \cdot 10^8$ Па и при $T = 293$ К, вычисленная по формуле (3). Видно, что значение высоты потенциального барьера при $P = 0$, $\phi_{n,0} = 0.74$ В и она линейно уменьшается с ростом ВГС.

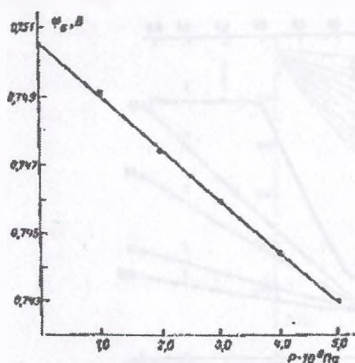


Рис.4 Зависимость высоты потенциального барьера ПБД структур $Sb-Si < Mn > -Au$ от статического ВГС.

Токовые чувствительности, определённые согласно $\gamma = J_0^{-1} dJ/dP$ и $\gamma = q(kT)^{-1} d\phi_s/dP$, в области малых токов составили соответственно $6,57 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ и $7,27 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, что позволяет предположить о том, что при малых смещениях ($U \leq 0.5$ В)

При этом барический коэффициент этого изменения составляет $\alpha = -1,53 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па}$ и практически совпадает с литературными данными для барического коэффициента изменения ширины запрещённой зоны Si равной $\alpha = -1,49 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па}$. И поэтому можно предположить, что изменение высоты барьера при ВГС в данных структурах в основном обусловлено изменением ширины запрещённой зоны кремния.

Токовые чувствительности, определённые согласно $\gamma = J_0^{-1} dJ/dP$ и $\gamma = q(kT)^{-1} d\phi_s/dP$, в области малых

токовое изменение связано в основном с изменением высоты потенциального барьера.

С дальнейшим увеличением напряжения до $U=3$ В отношение J_p/J_0 линейно растёт. Установлено, что к дальнейшему увеличению токовой чувствительности существенным является вклад перераспределения напряжения между базой и барьером в области БШ. С увеличением тока через диод падение напряжения на базе диода возрастает $U_\sigma = JR_\sigma$ и приложенное напряжение перераспределяется между базой и барьером Шоттки (БШ): $U = U_0 + U_{\sigma m}$, где $U_{\sigma m} = kT \ln(J/J_0 + 1)/q$, так как база использованных ПБД является компенсированной и увеличение напряжения на барьере приводит к увеличению тока структуры.

Этот участок ВАХ ($0.5 < U < 1$ В), где значение прямого тока под всесторонним давлением растёт, описывается выражением:

$$J = J_0 \left[\exp \frac{U - JR_\sigma}{kT} - 1 \right] \quad (4)$$

Затем должен быть участок, соответствующий переходу от низкого к высокому уровню инжекции ($1 \leq U \leq 3$ В). С дальнейшим увеличением напряжения ($U \geq 3$ В) токовая чувствительность исследуемых структур не изменяется и отношение $J_p/J_0 \approx 3$. Можно предположить, что при больших прямых напряжениях основным механизмом переноса тока является инжекция носителей заряда, обусловленная увеличением дрейфовой компоненты тока, которая становится много больше диффузионной или термоэмиссионной.

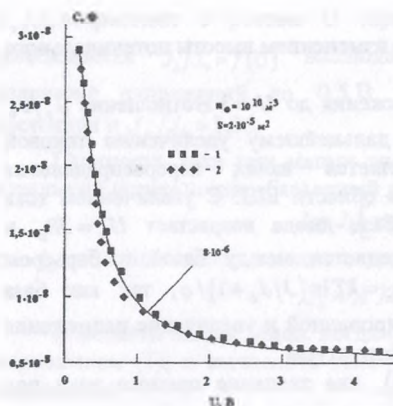
В данной главе также рассматривается влияние изотропного давления на вольт-фарадные характеристики барьера Шоттки в случае неравномерного распределения концентрации примеси в базе структуры. Рассматривая емкость контакт металл-полупроводник в приближении плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{L} \quad (5)$$

можно найти зависимость емкости диода Шоттки от величины прикладываемого напряжения U для заданного значения параметра a . Глубина проникновения электрического поля в полупроводнике L определяется выражением:

$$L = \left[a \cdot \left[\exp \left(- \frac{2\epsilon \epsilon_0 (\phi_K + U)}{en_0} \right) - 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

где n_0 — концентрация примеси в полупроводнике на границе раздела с металлом, $a = \text{const}$, ϕ_K — контактная разность потенциала.



- 1- контрольные диоды
2- диоды подвергнутые воздействию давления в 6 кБар.

Рис. 5. Экспериментальные C-U зависимости для диодов Шоттки

На рисунке 5 приведены экспериментальные вольт-фарадные (усредненные по 5 образцам) зависимости диодов, типа Au-n Si, изготовленных на основе полупроводника n-типа проводимости.

Сплошная зависимость соответствует расчетной вольт-фарадной характеристике для параметра $a = 8 \cdot 10^{-6}$. Видно, что экспериментальная зависимость хорошо совпадает с расчетной зависимостью, что подтверждает справедливость используемого при расчете закона распределения примеси. Из экспериментальных C-U зависимостей для диодов Шоттки следует, что после воздействия давления, вольт - фарадная характеристика

(в области прикладываемых напряжений 0,5-1,5 В), смещается в левую сторону. Такое смещение характеристики приводит к увеличению значения dC/dU в этой области и к повышению чувствительности варактора определяемой по выражению:

$$S = \frac{dC}{C} \frac{U}{dU} \frac{1}{n+2} \quad (7)$$

где n - показатель степени в выражении, $N(x) = N_0 x^n$ описывающем распределение примеси по толщине области пространственного заряда полупроводника. Следовательно, при изготовлении варакторов для улучшения C-U характеристик структур целесообразно использовать всестороннее гидростатическое сжатие.

В третьей главе «Исследование тензорелаксационных явлений в компенсированном кремнии и структурах на его основе» приводятся результаты исследования динамической тензопроводимости и ее физические механизмы при адиабатическом воздействии ВГС в компенсированных образцах $Si < B, Mn >$ и $Si < P, Zn >$ в зависимости от степени их компенсации, типа проводимости и структурах типа барьеров Шоттки $Sb-Si < B, Mn > -Au$ в диапазоне давлений $P = (0 \div 6) \cdot 10^8$ и температур $T = 273 \div 330$ К.

Исследования показали, что при воздействии импульсного всестороннего давления и при её снятии в компенсированных образцах наблюдаются релаксационные процессы изменения тока, связанные с термическими ионизациями и барьерными смещениями ГУ и рекомби-

нациями неравновесных носителей заряда. При этом динамическая тензочувствительность компенсированных образцов кремния намного превосходит их статические значения.

Непосредственное измерение температуры образцов и анализ полученных экспериментальных данных при импульсном воздействии ВГС показали, что наблюдаемые релаксационные изменения тока в образцах сопровождаются с синхронными изменениями их температуры. Для определения вклада температуры (термоэффект) и импульсного давления (тензорелаксационный эффект) в тензопроводимости были исследованы изменения тока в образцах при воздействии импульсного давления и при непосредственном изменении их температуры при статическом режиме воздействия ВГС. На рис.6 приведена кинетика зависимости тока протекающего через образец $Si < Mn >$ с удельным сопротивлением $\rho = 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при воздействии импульсного давления со скоростью $\frac{\partial P}{\partial t} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{Па}}{\text{сек}}$ и при изменении температуры с помощью нагревателя. При изменении давления до $P = 2,5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ и $P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ температура образца увеличивается на $(4 \div 5)^\circ\text{C}$ и $(8 \div 9)^\circ\text{C}$ соответственно. Анализ полученных результатов показывает, что при давлении $P = 2,5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ вклад тензостимулированного изменения тока незначителен, т.е. при меньших давлениях ток изменяется в основном за счет изменения температуры. Однако с увеличением амплитудного значения давления доля тензостимулированного эффекта $k = \frac{I_{\text{max}} - I_T}{I_{\text{max}} - I_{\text{ст}}}$ увеличивается (рис.7).

Динамический тензорезистивный эффект в полупроводниковых материалах характерен, в основном, для полупроводников, содержащих примесные центры, которые создают глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника. В связи с этим является целесообразным изучение механизмов проявления тензоэффекта в кристаллическом кремнии, содержащем примесные центры, создающие глубокие энергетические уровни.

Исследования показали, что при воздействии переменного давления, (ПД) температура образца увеличивается на некоторую величину ΔT .

Тогда, с учетом воздействия переменного давления концентрацию носителей заряда можно определить по выражению:

$$n = n_0 \exp \left(- \frac{E_i - \alpha P}{k(T + \Delta T)} \right) \quad (8)$$

где n_0 - начальная концентрация, E_i - энергия ионизации примесных центров, T - температура образца, k - постоянная Больцмана, α - барический коэффициент смещения ГУ, P - приложенное давление.

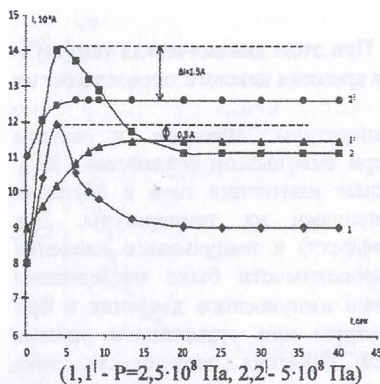


Рис.6. Кинетика зависимости тока $I=f(t)$ в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$ с удельным сопротивлением $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при импульсном гидростатическом давлении и при изменении температуры с помощью нагревателя.

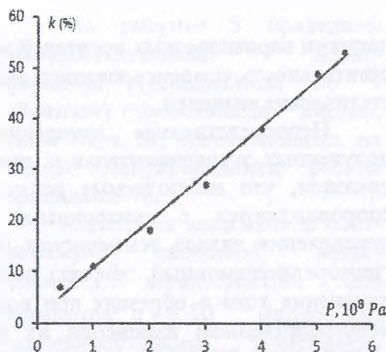


Рис.7. Зависимость доли тензорелаксационных эффектов от амплитудного значения давления в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$ с удельным сопротивлением $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

Общую концентрацию носителей заряда при воздействии динамического гидростатического давления можно представить в виде:

$$n = n_d + n_{st} \quad (9)$$

где, n_d - динамическая часть изменения концентрации, n_{st} - общая концентрация носителей при статическом давлении.

Полную концентрацию носителей заряда при воздействии динамического гидростатического давления можно записать так:

$$n = n_d + n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{kT}\right) \quad (10)$$

Приравнявая (8) и (9) получим выражение, описывающее динамическую часть изменения концентрации носителей заряда при ПД.

$$n_d = n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{k(T + \Delta T)}\right) - n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{kT}\right) \quad (11)$$

или в виде:

$$n_d = n_{st} \left(\exp\left(\frac{\Delta E}{kT} \frac{\Delta T}{T + \Delta T}\right) - 1 \right) \quad (12)$$

Относительное изменение температуры, обусловленное воздействием давления, обозначим как

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta T}{T + \Delta T} \quad (13)$$

Поскольку ΔT зависит от амплитудных значений импульсного давления и от свойств самого полупроводника, то при одинаковых значениях

и скоростях изменения давления можно предположить, что ε_T зависит от начальной температуры T . Значит чем меньше T тем больше ε_T .

С учетом (13) выражение (12) можно записать так:

$$n_d = n_{cl} \left(\exp \left(\varepsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT} - 1 \right) \right) \quad (14)$$

Примем, что при низких значениях температуры $\exp \left(\varepsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT} \right) \gg 1$.

Тогда выражение (14) примет вид:

$$n_d = n_{cl} \exp \left(\varepsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT} \right) \quad (15)$$

С учетом (15), получим выражение, описывающие плотность тока, протекающего через полупроводник, при воздействии переменного давления:

$$J = e \mu n_{cl} \left(\exp \left(\varepsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT} \right) - 1 \right)$$

Из полученного выражения видно, что при наличии переменного давления, токи, протекающие через полупроводник, зависят от концентрации носителей заряда, генерированных воздействием давления. При этом, чем меньше начальная температура, тем больше динамическая часть изменения концентрации носителей заряда.

Импульсному ВГС подвергались и структуры $Sb-Si < Mn > -Au$. Экспериментальными исследованиями установлено, что картина тензорелаксационных изменений тока в данных структурах внешне сходны с релаксационными процессами проводимости в компенсированных кристаллах $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$, но в случае структуры с поверхностным барьером разность максимальных и статических значений тока зависит от диодного напряжения.

Температура структуры была изменена импульсным давлением амплитудой $P = 5$ кбар и скоростью изменения $dP/dt \sim 10^8$ Па/с. Измерениями установлено, что при малых напряжениях смещения максимальные значения прямого тока, соответствующие максимумам температуры, заметно превосходят их статические значения при постоянном давлении. Ход зависимости $J(t)$ при воздействии переменного импульсного давления в этом случае (малые токи) определяется температурной зависимостью тока поверхностно барьерного диода. При дальнейшем увеличении напряжения на диод вклад температуры в изменение тока при воздействии переменного импульсного давления начинает компенсироваться. При $U \sim 5$ В прямой динамический ток диода совпадает со статическим током, т.е. вклад температуры в ход $J(T)$ полностью "подавляется".

В области напряжений $U \geq 3$ В (где существенную роль играет инжекция носителей в базу) увеличение числа инжектированных носителей тока через пониженный под давлением потенциальный барьер, по видимому,

компенсирует температурный вклад в изменение тока. Проведённые исследования показали, что температурный ход обратного тока при импульсном воздействии ВГС на диод в широком диапазоне напряжения (до 20 В) существенно не зависит от значения обратного напряжения и отношение $J_{\max} / J_{cm} \approx 1.36$.

На основе экспериментальных данных по тензопроводимости были проведены вычисления и сравнения коэффициентов статической и динамической тензочувствительности, S_D компенсированных образцов

$Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ по формулам: $S_{cm} = \frac{E^* \Delta \rho}{P \rho_0}$, $S_{\infty} = \frac{E^* \Delta J}{P I_0}$ и соответственно.

Динамическая тензочувствительность S_D рассчитана по максимумам $J_{\max}$ изменения токов $J(t)$.

Проведённые исследования показали, что в отличие от исходных образцов кремния в компенсированных образцах $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ статическая и динамическая тензочувствительности к ВГС увеличиваются с ростом их удельного сопротивления. Увеличение статической тензочувствительности образцов $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ с ростом их удельного сопротивления и понижением температуры связано с повышением эффективности вклада в изменения проводимости избыточных носителей тока, генерируемых при ВГС.

При малых значениях скорости нарастания импульса давления (10^6 Па/с) значение коэффициента динамической тензочувствительности образцов $Si < Mn >$ совпадает со значением коэффициента S_{cm} в этих образцах.

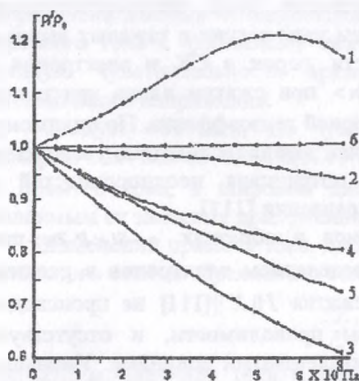
С увеличением скорости нарастания импульса давления значение коэффициента S_D сильно возрастает и при $dP/dt \sim 10^8 \text{ Па/с}$ за счёт дополнительной тензо-термической ионизации глубоких уровней Mn в образцах $Si < Mn >$ отношение S_D / S_{cm} становится в $7 \div 8$ раз больше. Аналогичные в качественном отношении результаты были получены и для компенсированных образцов $Si < Zn >$.

Результаты и методика данных исследований позволяют создать простые по своей конструкции тензопреобразователи изменения изотропных давлений, а также определить значения энергии ионизации, барических коэффициентов и другие параметры глубоких уровней в полупроводниках.

В четвертой главе «Исследование электрофизических свойств компенсированного кремния при одноосной упругой деформации» приведены результаты исследования тензоэффекта и механизма его проявления в компенсированных и термообработанных образцах $Si < B, Mn >$, $Si < P, Zn >$ и $Si < TO >$ при одноосной упругой деформации. Исследования тензопроводимости в данных образцах проводились при условиях сжатия $I \parallel X \parallel [111]$ и $I \parallel X \parallel [100]$ в интервале $X = 0 \div 6 \cdot 10^8 \text{ Па}$ при комнатной температуре. Проведенные исследования показали, что удельное

сопротивление исходных, компенсированных, сильно компенсированных и перекомпенсированных образцов уменьшается с ростом величины сжатия X в направлении кристаллографической оси $[111]$. Относительно сильный тензoeffект наблюдается в исходных образцах $p-Si < B >$. Увеличение степени компенсации ослабляет эффект тензосопротивления в исследуемых образцах, т.е. с ростом удельного сопротивления скорость изменения проводимости уменьшается.

Из рис.8 видно, что удельное сопротивление образцов $p-Si < B, Mn, Zn >$ (кривая 6), легированных последовательно цинком и марганцем, почти не изменяется с ростом величины сжатия X .



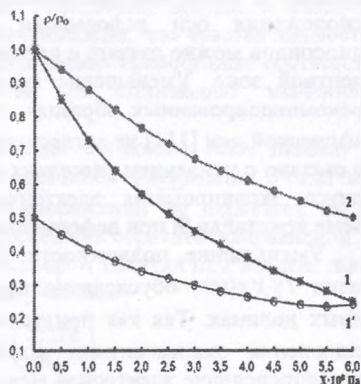
$I \parallel X \parallel [100]$ 1- $n-Si < P, Zn >$ $I \parallel X \parallel [111]$

2- $n-Si < P, Zn >$ 3- $p-Si < B >$

4- $n-Si < B, TO >$, 5- $p-Si < B, Zn >$

6- $p-Si < B, Mn, Zn >$

Рис.8 Удельное сопротивление компенсированного кремния в зависимости от величины одноосной деформации.



1-термообработанный- $p-Si < B >$,
2-исходный $p-Si < B >$, $\rho = 4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

Рис.9 Тензосопротивление образцов $p-Si < B >$ при одноосном сжатии и $T=293K$.

Удельное сопротивление термообработанных образцов $p-Si < B >$ ($\rho = 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) уменьшается с ростом давления, а при снятии сжатия в зависимостях $\rho(X)$ наблюдается гистерезис, т.е. после снятия одноосного давления конечное значение ρ уменьшается по сравнению с его начальным значением (рис.9 кривые 1,1'). Экспериментальные исследования (рис.8) показали, что с увеличением величины сжатия X вдоль кристаллографической оси $[100]$ удельное сопротивление компенсированных образцов $n-Si < P, Zn >$ (кривая 1) вначале растет. Начиная с $X > 5$ кбар в

зависимостях $\rho(X)$ наблюдается замедление роста, далее удельное сопротивление образцов уменьшается с ростом X .

Для выявления механизма тензoeffекта в исследуемых образцах, при тех же условиях сжатия, был исследован эффект Холла.

Исследования показали, что концентрация дырок в исходных и контрольных образцах $p-Si < B >$ во всем диапазоне сжатия остаётся постоянной так как мелкие примесные уровни при комнатной температуре являются полностью опустошёнными. В компенсированных и перекомпенсированных образцах $Si < B, Mn >$, $Si < P, Zn >$ концентрация электронов и дырок увеличивается с ростом X , что возможно связано с изменением степени заполнения глубоких уровней Mn и Zn в Si за счет изменения их энергии ионизации при одноосном сжатии.

Подвижность дырок в исходных и слабокомпенсированных образцах увеличивается, а подвижность электронов в перекомпенсированных образцах $n-Si < B, Mn >$ уменьшается с ростом сжатия X . Рост подвижности дырок в исходных и слабо компенсированных образцах в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов можно связать с расщеплением зоны легких и тяжелых дырок в валентной зоне. Уменьшение подвижности дырок в СК и электронов в перекомпенсированных образцах $Si < B, Mn >$ при сжатии вдоль кристаллографической оси $[111]$ не согласуется с теорией тензoeffекта. По видимому, это связано с усилением рассеяния носителей заряда вследствие увеличения радиуса экранирования электрического потенциала неоднородностей в объёме кристалла Si при деформации в направлении $[111]$.

Уменьшение подвижности электронов в образцах $n-Si < P, Zn >$ при сжатии $I \parallel X \parallel [100]$ обусловлено перераспределением электронов в расщепленных долинах. Так как при условиях сжатия $I \parallel X \parallel [111]$ не происходит расщепления эквивалентных долин зоны проводимости, и отсутствует перераспределение электронов между эквивалентными долинами. Уменьшение подвижности электронов с ростом X в образцах $n-Si < P, Zn >$ обусловлено ростом поперечной эффективной массы электронов из-за наличия сдвиговых деформаций. Наблюдаемые аномальные эффекты увеличения подвижности электронов в $p \rightarrow n$ конвертированных образцах $n-Si < B, TO >$, постоянство и уменьшение подвижности дырок соответственно в образцах $p-Si < B, Zn >$ и $p-Si < B, Mn, Zn >$ с ростом X при сжатии $I \parallel X \parallel [111]$ возможно также связано с изменением их рассеяния на неоднородностях, связанных с примесными центрами Zn и Mn за счет изменения потенциального рельефа. При снятии сжатия в зависимости $\mu(X)$ дырок в термообработанных образцах $p-Si < B >$ с удельным сопротивлением $\rho = 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ наблюдается гистерезис и конечное значение подвижности дырок возрастает. В данном случае изменение подвижности дырок в термообработанных образцах при их одноосном сжатии в

направлении [111] можно связать с проявлением эффекта барического распада нейтральных примесных скоплений и микродефектов в объеме кремния, который приводит к увеличению подвижности дырок и гистерезису в зависимостях $\rho(X)$ и $\mu(X)$. Одноосной упругой деформации подвергались поверхностно-барьерные диодные структуры, изготовленные на основе компенсированного $p-Si < B, Mn >$ с удельным сопротивлением $\rho = 297 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Плоскость поверхностного барьера (Шоттки) была перпендикулярна к кристаллографическому направлению [111]. Проведенные исследования показали, что прямой ток с ростом одноосного сжатия X сначала монотонно возрастает и, начиная с $X > 6 \cdot 10^4 \text{ Па}$, в зависимости $J(X)/J_0$ наступает участок замедления и насыщения, при этом максимальное изменение прямого тока при 2 В составляет 2,5 раза.

Следует отметить, что токовая чувствительность при прямом смещении $U > 2 \text{ В}$ не зависит от приложенного напряжения.

Проведенные измерения в обратно смещенных диодах в области напряжения, далеких от напряжения пробоя показали, что чувствительность обратного тока к одноосному сжатию значительно превосходит соответствующую чувствительность прямого тока при одинаковых значениях приложенного напряжения.

Следует отметить, что чувствительность обратного тока, диодов с барьером Шоттки $Sb-Si < B, Mn > -Au$ к одноосной деформации в отличие от прямого тока, в широком диапазоне напряжений не перестает быть зависимым от значения приложенного напряжения в обратном направлении.

Изменение прямого тока, диодов с барьером Шоттки при воздействии одноосного сжатия обусловлено согласно выражению

$$\frac{J_x}{J_0} = \frac{\mu_0}{\mu_x} \exp\left(\frac{q\Delta\phi_s}{kT}\right)$$

(где J_x , μ_x - значения тока и подвижности дырок при $X \neq 0$) встречным изменением подвижности носителей тока в базе и высоты потенциального барьера.

Анализ и сравнение экспериментальных данных показывает, что изменение прямого тока через данный поверхностно-барьерный диод $Sb-Si < B, Mn > -Au$ обусловлено изменением подвижности дырок, высоты потенциального барьера, а также перераспределением напряжения между базой и барьером. Увеличение обратного тока данной структуры при одноосном сжатии, по видимому, связано с генерацией неравновесных носителей и увеличением концентрации дырок как в области пространственного заряда, так и в базе данных диодных структур вследствие изменения степени населенности глубокого уровня Mn . Увеличение токовой чувствительности с повышением приложенного напряжения в обратном направлении объясняется с усилением электрического поля и следовательно, дрейфовой скорости носителей заряда в области пространственного заряда.

В пятой главе «Использование деформационных эффектов в областях электронной измерительной техники» описана конструкция предложенной нами нового типа тензопреобразователя, тензочувствительность которого в несколько раз выше по сравнению с тензочувствительностью существующих тензопреобразователей. Это достигается использованием пневмоусилителя, который даёт возможность повышать тензочувствительность в несколько раз. В качестве тензочувствительного элемента используются структуры с барьером Шоттки, изготовленные на основе кремния, компенсированного глубокими примесными уровнями. Если в качестве тензочувствительного элемента использовать структуру с БШ на основе $\text{Si} \langle \text{Mn} \rangle$ с удельным сопротивлением $10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, то общая тензочувствительность конструкции составляет примерно $S_k = 6 \cdot 10^5$. При этом, чувствительность тензочувствительного элемента составляет $S_{\text{тэ}} = 600$. Значит, тензочувствительность конструкции на три порядка больше чем, тензочувствительность самих структур. Тензопроводимость ТЧЭ, т.е. $\text{Au} - \text{Si} \langle \text{Mn} \rangle - \text{Sb}$ имеет линейный характер во всем диапазоне измеряемого давления и имеет воспроизводимость $96 \pm 97\%$.

Создан универсальный тензопреобразователь, позволяющий измерять давления в широком интервале, в котором тензочувствительным элементом является структура с барьером Шоттки типа $\text{Au} - \text{Si} \langle \text{Mn} \rangle - \text{Sb}$. Коэффициент тензочувствительности конструкции в интервале давлений $P = 0 \div 10^6 \text{ Па}$ равен $S = 1 \cdot 10^6 \div 3.4 \cdot 10^{-3} \text{ В/Па}$.

На основе тензостимулированного эффекта в сильнокомпенсированных образцах $\text{Si} \langle \text{Mn} \rangle$, создан динамический тензопреобразователь импульсных давлений типа удар, взрыв и др. Динамический коэффициент тензочувствительности в предлагаемой конструкции тензопреобразователя равен $(2 \div 3) \cdot 10^5$ в интервале импульсных давлений $P = 10^4 \div 10^8 \text{ Па}$.

В приложении диссертации подробно описана установка гидростатического давления с пневмоусилителем, позволяющая исследовать комбинированные эффекты тензосопротивления, тензо-термо-Холл эффекты, процессов расщепления скопления примесных атомов в полупроводниках при статическом и динамическом режимах воздействий давления и температуры в диапазонах $P = (0 \div 10) \cdot 10^8 \text{ Па}$ и $T = 280 \div 530 \text{ К}$ соответственно. Для исследований тензoeлектрических свойств компенсированного кремния и структур с барьером Шоттки типа $\text{Au} - \text{Si} \langle \text{Mn} \rangle - \text{Sb}$ при одноосном сжатии была использована универсальная установка, позволяющая исследовать тензoeлектрические характеристики полупроводников в широком интервале температур $130 \div 430 \text{ К}$ и давления $0 \div 9 \cdot 10^8 \text{ Па}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований тензостимулированных явлений и их физических механизмов в легированном кремнии с примесями Au, Mn и Zn и в структурах на его основе сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что изменение удельного сопротивления в образцах $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ в статическом режиме воздействия изотропного давления связано в основном с изменением концентрации основных носителей тока вследствие их термической генерации и изменения энергии ионизации глубоких примесей Mn и Zn в Si под действием давления..

2. Показано, что увеличение тока при прямом смещении ПБД $Sb-Si < Mn >-Au$ при всестороннем сжатии связано, в основном с изменением высоты потенциального барьера, а в области напряжений $0.5 < U < 3$ В увеличение тока связано, в основном с перераспределением напряжения между базой и барьером при ВГС.

3. Установлено, что релаксация тока в исследуемых образцах $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ связаны с аналогичной релаксацией их температуры, обусловленные тензостимулированным эффектом вызванным ударным давлением.

4. Показано, что динамическая тензопроводимость и коэффициент тензочувствительности образцов $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ усиливаются с ростом удельного сопротивления образцов, амплитудного значения и скорости нарастания переменного давления.

5. Установлено, что релаксационное изменение проводимости в образцах $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ в адиабатическом режиме воздействия изотропного давления связано, в основном с аналогичной релаксацией концентрации основных носителей тока вследствие их термической генерации и барического смещения энергетических уровней Mn и Zn в Si.

6. Определены энергия ионизации ГУ Mn, Zn, Au и коэффициенты давления её изменения.

7. Установлено, что при больших амплитудах импульсного давления вклад тензостимулированного эффекта в изменение тока в исследуемых образцах доминирует над соответствующим вкладом температуры.

8. Установлено, что удельное сопротивление в образцах $p-Si < B, Mn >$ и $p-Si < P, Zn >$ при ориентированном сжатии вдоль кристаллографической оси [111] уменьшается с увеличением одноосного сжатия, в результате изменения концентрации и подвижности носителей тока обусловленной изменением соответственно степени заполнения ГУ и потенциальной энергии взаимодействия носителей заряда с примесными и дефектными микрообъединениями в объеме Si.

9. Показано, что эффект тензосопротивления в исходных и термообработанных образцах $p-Si < B, TO >$ в условиях одноосного сжатия $I \parallel X \parallel [111]$ обусловлен только изменением подвижности основных носителей тока.

10. Установлено, что чувствительность по току исследуемых ПБД диодов к одноосному сжатию при обратном напряжении больше, чем при прямом смещении.

11. На основе компенсированного кремния создан тензопреобразователь давления с пневмоусилителем, тензочувствительность которого составляет $S_k = 6 \cdot 10^5$, а на основе структуры с барьером Шоттки типа $Au-Si < Mn > -Sb$ изготовлено универсальное тензопреобразовательное устройство, позволяющее измерять давление в широком интервале.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREE
DSc.28.02.2018.FM.60.01 AT ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

TURSUNOV IKROMJON GULAMJONOVICH

**TENSOSTIMULATED PHENOMENA IN COMPENSATED SILICON
AND SURFACE - BARRIER DIODE STRUCTURES BASED ON IT**

01.04.10- Physics of semiconductors

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF SCIENCE (DSc)
IN PHYSICS AND MATHEMATICS**

ANDIJAN - 2018

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website of scientific council (www.adu.uz) and the «Ziyonet» Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor:	Mamatkarimov Odiljon Okhundaevich Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Official opponents:	Karimov Abdulaziz Vahitovich Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor Otajonov Salimjon Madrahimov Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor Nuriddinov Izatillo Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor
Leading organization:	Karakalpak state university

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Andijan state university (is registered under № 336). Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu_info@edu.uz.

Abstract of dissertation sent out on « 14 » 11 2018
(Registry record № 0 on « 14 » 11 2018)



S.Zainabidinov
Chairman of scientific council on award of
scientific degree, DSc in physics and
mathematics Akademik

A.O. Kurbanov
Scientific secretary of scientific council on
award of scientific degree, PhD in physics
and mathematics

LN Karimov
Chairman of scientific Seminar under
Scientific Council on award of scientific
degree, DSc in physics and mathematics

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Actuality and demand for the thesis's subject. Today all electronic devices almost are being developed and designed on the basis of the advances in physics of semiconductors and semiconductor devices. Semiconductor devices are widely in use in all electronic products intended for various fields of human activities starting from medicine concluding space investigations. Conventional approach to control of the semiconductor material's properties is based on using the impurity doping processes that lead to rise some electron levels in band-gap. Because of complicated physical processes there are open questions in investigations the characteristic properties of the tensostimulated phenomena by deformation influence and in revealing their physical mechanism in doped semiconductors. Therefore investigating the tensoelectrical properties of the compensated silicon, that is most used material in production of electronical tools, doped by deep level impurities and based on it the structures by isotropic and anisotropic deformations is today's topical task.

The aim of research work is investigating the tensostimulated phenomena in doped silicon with impurity atoms and the structures based on it.

The objects of the investigation are silicon samples doped gold, zinc, manganese impurities and structures on them.

Scientific novelty of the research work are:

the tensostimulated electrical conduction in $Si < Au >$, $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ samples at static mode of isotropic elastic deformation influence has been investigated and revealed that the changing the electrical conduction of the samples under consideration mainly due to change the concentration of the main current carriers because of change of the ionization energy DLL (deeplying levels) Au, Mn и Zn в Si by pressure;

the ionization energies DL (deep levels) Mn, Zn and pressure coefficient of their change has been defined to be equal;

the influence of the static OHP (overall hydrostatic pressure) on VAC (volt-ampere characteristics) of the surface-barrier diode structures of $Sb - p - Si < Mn > - Au$ type has been investigated. It's shown that sensitiveness of the direct currents as well as reverse one to OHP is connected on the voltage in diode that is the sensitiveness increases with increasing voltage used;

it has been revealed that the tensorelaxation change of the $Si < Au >$, $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ samples current at pulsed mode influence of OHP is connected with synchronous relaxation of their temperature due to the strain-heat effect stimulated by impact pressure;

the physical mechanisms of the dynamical tensoconductivity effect in $Si < Au >$, $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$ samples has been found. It is revealed that the electrical conductivity change in the samples mainly due to change the concentration of the main current carriers because of their thermal generation and energy level shift of Au, Mn и Zn by pressure in silicon band-gap;

it is revealed that at high amplitude of the pulsed pressure the contribution of the tensostimulated effect to current change in the samples under consideration is dominated above the corresponding temperature contribution;

the pulsed pressure influence on VAC of $Sb-p-Si < Mn > -Au$ has been investigated and it is shown that the relation between dynamical and statical direct current is connected also to diod voltage used;

the strain effect in compensated $Si < P, Au >$, $Si < P, Zn >$, $Si < B, Mn >$ samples at uniaxial compression $X \parallel J \parallel [100]$ and $X \parallel J \parallel [111]$ conditions has been investigated. It is shown that the strain effect in the samples is due to cross changing the concentration and mobility of the current carriers;

it has been revealed that the strain sensitive effect in the heat treated samples mainly due to the change of the main current carriers mobility and the uniaxial deformation along the crystallographical direction $[111]$ results to disintegration of the noncontrolable impurities clusters, microcompounds in Si volume at HT (heat treatment) because of the pressure;

the uniaxial elastic deformation influence on VAC of the barrier diod structures $Sb-p-Si < B, Mn > -Au$ has been investigated and it has been revealed that the current sensitiveness of the structures to the uniaxial deformation at reverse shift is greater than at the direct one and it increases with increasing the voltage used.

Implementation of the research results. On the basis of the results obtained from investigations of the isotropic and anisotropic deformation influence on the electrical-physical properties of the semiconductors and semiconductor structures:

Experimental results obtained from the investigations of the strain effect and its physical mechanisms as well as investigating the change of the potential barrier height, finding its pressure coefficient in compensated silicon and in $Au-Si < B, Mn > -Sb$ structures were used by carrying out of international project on the topic: «Transporte Mono- y Bipolar en Estructuras Semiconductoras» by investigating the deformation influence on VAC of the structure and by explanation of the current change mechanism in them (see Mexican National Research Institute № 6171, 2 May 2018 year). The results obtained are allowed to explain the physical processes that take place in the surface-barrier structures at the influence of the isotropic deformation.

The results obtained by investigating the influence of the statical pulsed pressure on VAC of PBD structure and revealed facts about the direct and reverse current of the structure is changing under pressure and this changing related on the voltage used were used by performing the project OT-F2-077 "Dynamics of the deformation effects of semiconductor layers and the influence of the electrical-magnetic waves to currents that appear in semiconductor layers" for investigating the deformation influence on photocurrents and photovoltage of the semiconductor structures (see №89-03-2128 Ministry of high and secondary education of the Republic of Uzbekistan 31 May 2018 year). Using the scientific results is allowed them to create phase portrait of the deformation effects in the semiconductor structures.

on the basis of Schottky barrier of $Au-Si < B, Mn > -Sb$ type structure there was created universal strain converter that allows to measure the pressure in wide range and constructed strain converter it is using at joint-stock company "FOTON" (see №02-1330 АО «Узэлтэхсаноат» 14 June 2018 year) in technological processes for scientific research works. Using the scientific results is allowed to increase the stability of the physical parameters of semiconductor structures produces to various types of deformations.

an equipment that allows to investigate the strain effect in semiconductors and structures based on them at overall hydrostatical pressure has been designed that is using by "FOTON" joint-stock company (see №02-1330 АО «Узэлтэхсаноат» 14 June 2018 year) in a technological processes for scientific research works. The use of the scientific results allowed to investigate the strain effect in semiconductors and structures based on them at overall hydrostatical pressure.

The structure and volume of the thesis. The thesis consists an introduction, five parts, conclusion, list of literature, 3 appendix and includes 190 pages of text with 61 pictures and 3 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Зайнобидинов С.З., Маматкаримов О.О., Турсунов И.Г., Туйчиев У. Изучение влияния внешних воздействий на поведение примеси золота в кремнии. Физика и техника полупроводников, т. 34, вып. 6. стр. 641-644, 2000. (№11. Springer, IF:0.602)

2. Зайнобидинов С.З., Маматкаримов О.О., Турсунов И.Г. Тензочувствительность компенсированного кремния при импульсном гидростатическом давлении. Журнал. Россия. Известия ВУЗов серия "Материалы электронной техники". вып.2. стр.30-35, 2002. (№11. Импакт-фактор РИНЦ, IF:0.124)

3. Турсунов И.Г. Влияние переменного давления на концентрацию носителей заряда в полупроводнике с глубокими энергетическими уровнями. Доклады Академии Наук РУз. №3, стр.26-28, 2016. (01.00.00. №7)

4. Турсунов И.Г. Исследование влияния давления на электрофизические свойства кремния, легированного золотом. Научный вестник (СамГУ), вып.5, стр. 49-53, 2016. (01.00.00. №2).

5. Zainabidinov S., Mamatkarimov O., Tursunov I.G., Khimmatkulov O. The influence of impurities on the deep level strain electrical properties of monocrystalline silicon. Ukrainian Journal of Physics, vol.62, №11, pp.957-960, 2017. (№51, CiteScore IF:0.358).

6. Tursunov I.G. Investigations of the deep-level parameters in semiconductors. Ukrainian Journal of Physics, vol.62, №12, pp.1041-1043, 2017. (№51, CiteScore IF: 0.358).

7. Турсунов И.Г. Релаксационные эффекты в кремнии, легированном никелем. Вестник НУУз. (2/2), стр. 214-218, 2017. (01.00.00. №8)

8. Zainabidinov S., Tursunov I.G., Khimmatkulov O. Influence of isotropic pressure on the current-voltage characteristics of surface-barrier diodes $Sb-p-Si < Mn > -Au$. Semiconductors. vol.52, №8, pp.1027-1030, 2018. (№11. Springer, IF:0.68)

9. Зайнобидинов С.З., Турсунов И.Г., Химматкулов О. Физические механизмы динамической проводимости в компенсированных образцах $Si < Mn >$ и $Si < Zn >$. Uzbek Journal of Physics. Vol.20 (№1), pp.32-36, 2018. (01.00.00. №5)

10. Зайнобидинов С., Турсунов И.Г., Химматкулов О. Электропроводность кремния, легированном марганцем и цинком, в условиях гидростатического давления. Доклады Академии Наук РУз. №1, стр.24-28, 2018. (01.00.00. №7)

11. Tursunov I.G. Deformation effect in compensated silicon. Journal of Scientific and Engineering Research, volume 4, issue 10, pp.489-492, 2017. (№5 GIF, IF:0.543).

II бўлим (II часть, part II)

12. Tursunov I.G. The effect of pulsed all-round compression on the current-voltage characteristics of surface-barrier diodes $Sb-p-Si < Mn > -Au$. International Scientific Journal "Science and World" №11 (51), vol.1, pp.14-16, 2017.

13. Маматкаримов О.О., Турсунов И.Г., Туйчиев У. Исследование влияния гидростатического давления на Au в Si. Сборник трудов Международной конференции "Прикладные проблемы физики полупроводников". Ташкент. 1999. Стр. 14-15.

14. Турсунов И.Г., Туйчиев У. Релаксационные явления в полупроводниках. ТошДУ тўпламлари, 1999, 31-34 бетлар.

15. Абдураимов А., Зайнобидинов С.З., Маматкаримов О.О., Турсунов И.Г., Химматкулон О. Исследования тензoeffекта в диодах с барьером Шоттки $Au-Si < Mn > Sb$ Межд.науч.-тех.конференция «Физические аспекты надёжность» методы и средства диагностирования интегральных систем, Воронеж, 19-20 май, 1993, с.49

16. Зайнобидинов С.З., Маматкаримов О.О., Турсунов И.Г., Жабборов Р., Туйчиев У., Мавлянов А. Релаксационные эффекты в структурах с барьером Шоттки на основе кремния с примесями Ni и Mn. Сборник трудов Международной конференции "Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах". Ташкент. 2007. стр. 69-70.

17. Турсунов И.Г. О механизмах влияния одноосной упругой деформации на монокристаллы кремния с глубокими уровнями. АндДУ "Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари" мавзусида Республика илмий-амалий анжумани. 4-5 декабрь, 50-51 бет, 2015.

18. Гулямов Г., Дадамирзаев М.Г., Турсунов И.Г. Коэффициент неидеальности ВАХ несимметричного $p-n$ -перехода в СВЧ поле. Вестник НУУз, 2/2, стр152-155, 2016. (01.00.00. №8)

19. Гулямов Г., Дадамирзаев М.Г., Турсунов И.Г. Влияние реактивной фотоздс на фотонапряжения, генерируемой в тонких полупроводниковых пленках и сравнение ее объемной фотоздс. Вестник НУУз, 2/2, стр148-151, 2016. (01.00.00. №8)

20. Турсунов И.Г. Особенности релаксационные эффекты кремния, легированного золотом при импульсном гидростатическом давлении. НамДУ, "Конденсатланган мухитлар физикаси ва физика ўқитишнинг долзарб муаммолари" Халқаро иштирокчилар билан Республика илмий-амалий анжумани, 8-9 июль, 120-121- бет, 2016.

21. Tursunov I.G. Effect of hydrostatic pressure to compensate gold on silicon. International Symposium "New Trends of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects" Tashkent, 10-11 November, p.223-224, 2016.

22. Маматкаримов О.О., Турсунов И.Г. Тензoeffекта кремния, легированного золотом при анизотропном давлении. Научный вестник, (Анд.ГУ). №1, стр.26-29, 2017.

23. Маматкаримов О.О., Химматкулов О. Турсунов И.Г. Тензoeлектрические явления в кремнии с микро и нано объединениями примесных атомов. НУУз. «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах» Рес. науч. конф. Ташкент, стр.42-43, 2017.

24. Турсунов И.Г., Химматкулов О. Механизм прохождения тока в контактно-барьерных диодах $Sb-p-Si < B, Mn > -Au$ при одноосной упругой деформации. НУУз. «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах» Рес. науч. конф. Ташкент, стр.118-119, 2017.

25. Гулямов Г., Дадамйрзаев М.Г., Турсунов И.Г. Влияние деформации на ВАХ p-n-перехода в СВЧ поле. НУУз. «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах» Рес. науч. конф. Ташкент, стр.119-121, 2017.

26. Зайнабидинов С.З., Маматкаримов О.О., Химматкулов О., Турсунов И.Г. Влияние импульсного всестороннего сжатия в адиабатическом режиме на ВАХ поверхностно - барьерных диодных структур. ТерДУ, "Замоновий физиканинг долзарб муаммолари" VII-Республика илмий - назарий анжуман. 19-20 май, стр.11-12, 2017.

27. Zainabidinov S., Mamatkarimov O., Khimmatkulov O., Tursunov I.G. Relaxation effects in silicon with a deep level. International conference «Fundamental and applied problems of physics» June 13-14, pp. 16-20. Tashkent, 2017.

28. Зайнабидинов С.З., Маматкаримов О.О., Химматкулов О., Турсунов И.Г. Тензочувствительность кремния, легированного марганцем. УзМУ, "Физиканинг долзарб муаммолари" республика илмий-амалий конференцияси, 14 октябрь, стр.67-69, 2017.

29. Зайнабидинов С.З., Маматкаримов О.О., Химматкулов О., Турсунов И.Г. Тензостимулированное изменение тока через поверхностно-барьерных диодных структур $Sb-p-Si < B, Mn > -Au$ при изотропном давлении. АндДУ "Яримутказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантириш-нинг замоновий муаммолари" мавзусида Республика илмий - амалий анжумани. 20-21 апрель, 328-333 бет, 2018.

30. Маматкаримов О.О., Турсунов И.Г. Изучение влияние профиля распределения примеси на параметры варактора под действием давления. XIX Международная научно-практическая конференция «Научный форум: технические и физико-математические науки» Россия, Москва. 2018.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Ўзбекистон Миллий университетидаги «УзМУ хабарлари» журналин
тақририятида тақрирланган бўлиб
(«01» ноябрь 2018 йил)

Босилиш рухсати олинди 10.11.2018. Ҳажми 3,75 босма табоқ.
Бичими 60×84 1/8. Алдири 80 нуска. Буюртма 201.
М. Улугбек номидagi Ўзбекистон Миллий Университети
босмахонасида чоп этилди.