

**ЎЗР ФА ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

УРҒАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

АТАМУРАТОВА ЗУХРА АТАБЕКОВНА

**ДИЭЛЕКТРИКДАГИ ВА ДИЭЛЕКТРИК – ЯРИМЎТКАЗГИЧ
ЧЕГАРАСИДАГИ ЗАРЯД НОТЕКИС ТАҚСИМОТИНИНГ МДЯ
ТРАНЗИСТОР ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА ТАЪСИРИНИ
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2023

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

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

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

Атамуратова Зухра Атабековна

Диэлектрикдаги ва диэлектрик – яримўтказгич чегарасидаги заряд
нотекис тақсимотининг МДЯ транзистор характеристикаларига
таъсирини моделлаштириш..... 3

Атамуратова Зухра Атабековна

Моделирование влияния неравномерного распределения заряда в
диэлектрике и на границе диэлектрик-полупроводник на
характеристики МДП транзистора..... 19

Atamuratova Zukhra Atabekovna

Simulation of influence of nonuniform distribution of the charge trapped
in dielectric layer and at dielectric-semiconductor interface to
characteristics of MOSFET..... 35

Эълон қилинган илмий ишлар рўйхати

Список опубликованных научных работ
List of published research works..... 40

**ЎЗР ФА ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

УРҒАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

АТАМУРАТОВА ЗУХРА АТАБЕКОВНА

**ДИЭЛЕКТРИКДАГИ ВА ДИЭЛЕКТРИК – ЯРИМЎТКАЗГИЧ
ЧЕГАРАСИДАГИ ЗАРЯД НОТЕКИС ТАҚСИМОТИНИНГ МДЯ
ТРАНЗИСТОР ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА ТАЪСИРИНИ
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2023

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.2.PhD/FM614 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Урганч давлат университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

Юсупов Аҳмед

физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Каримов Иброҳим Набиевич

физика-математика фанлари доктори

Ёдгорова Дилбара Мустафаевна

техника фанлари доктори, профессор

Етақчи ташкилот:

Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Физика-техника институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2023 йил «___» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Ўзбекистон, Ташкент ш., Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй, Тел.: (+99871) 235-93-61, факс: (+99871)235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net)

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (_____ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй. Тел.: (+99871) 235-93-61; e-mail: ftikans@uzsci.net).

Диссертация автореферати 2023 йил «___» _____ куни тарқатилди.

(2023 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

Х.К. Олимов

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

Ж.С. Ахатов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д., к.и.х.

Ш.Н. Усмонов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф-м.ф.д., к.и.х.

КИРИШ (Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Жаҳонда ҳозирги вақтда металл-диэлектрик-яримўтказгич (МДЯ) транзисторларнинг хоссаларини ўрганиш дунёнинг кенг илмий жамиятининг эътиборини жалб қилиб келмоқда. Жумладан, 2019 йилда яримўтказгичлар бозори сегментининг 32,4 фоизи тармоқлар ва алоқа қурилмаларига тўғри келади. 2021 йилда яримўтказгичларнинг глобал бозори 469,4 миллиард долларни ташкил этган бўлиб, унинг йиллик ўсиш суръати 8,4 фоизни ташкил этиши ва 2027 йилга келиб, 726,73 миллиард долларга етиши кутилмоқда¹. Бу борада микрометр ва нанометр ўлчамлардаги МДЯ асбобларнинг характеристикаларига ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасининг хоссаларига турли ташқи таъсирларни ўрганиш, ушбу асбобларнинг ташқи таъсирларга бардошлилигини ошириш, стабил ва юқори ишончли ҳамда турли стрессларга чидамли транзисторларни ишлаб чиқиш замонавий яримўтказгичлар микро- ва наноэлектроникасининг долзарб масалаларидандир.

Дунёда сўнгги йилларда МДЯ тузилмалар турли замонавий электроника қурилмаларида, жумладан яримўтказгич хотира элементларида, мобил алоқа қурилмаларида, турли тиббий имплантант датчикларда, телекоммуникация қурилмаларида ҳамда космик саноат техникаларида асосий ташкилий элемент сифатида кенг қўлланилмоқда. Бу борада, бугунги кунда металл-оксид-яримўтказгич (МОЯ) структураларга турли ташқи таъсирларнинг ва улар асосидаги транзисторларга таъсир эффектларини ўрганишнинг долзарблиги бу таъсирлар механизмларининг тўлиқ ўрганилмаганлиги билан боғлиқдир. Жумладан, субмикрометр ва нанометр ўлчамдаги МОЯ транзисторлар параметр ва характеристикалари стабиллигига ва фаолият кўрсатиш ишончлигига турли сабабдан диэлектрик қатламига ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасига кириб қолган локал зарядларнинг таъсир механизмлари тўлиқ аниқланмаган. Шу нуқтаи назардан, ушбу соҳадаги муҳим масалалардан бири бу диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги нуқсонларни назорат қилиш ва чегара ёнида зарядлар тақсимотини тадқиқ қилиш усулларини такомиллаштиришдир.

Ўзбекистон Республикасида кенг миқёсда қаттиқ жисмлар физикаси, хусусан яримўтказгичлар ва яримўтказгич асбоблар физикаси соҳасида тадқиқотлар олиб борилмоқда. Республика олимлари томонидан янги яримўтказгич материаллар, улар асосида структуралар олиш ва уларнинг характеристикаларига турли таъсирларни ўрганиш бўйича муҳим натижалар олинган. Ўзбекистон Республикасини 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан «Иқтисодиётни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда «Яшил иқтисодиёт» технологияларини барча соҳаларга фаол жорий этиш, иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш»² бўйича вазифалар белгиланган. Бу борада турли ташқи таъсирларга чидамли янги электрон техника материаллари

¹ Жаҳон яримўтказгичлар савдоси статистикаси маълумотлари (<https://www.wsts.org/>)

² Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тарққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони.

ва улар асосидаги тузилмаларни ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг параметрларини назорат қилишнинг самарали усулларини яратиш муҳим масалалардан ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2019 йил 30 майдаги ПҚ-4348-сонли «Электротехника саноатини ривожлантириш учун қулай шарт-шароитлар яратиш ва тармоқнинг инвестициявий ҳамда экспорт салоҳиятини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида» ва 2018 йил 14 июлдаги ПҚ-3855-сон «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга муайян даражада хизмат қилади. Кўрилаётган ишнинг амалиётга тадбиқи металл-диэлектрик-яримўтказгич структураларни қўллайдиган яримўтказгичли нанотехнологиялар ва наноэлектрониканинг ривожланишида хизмат қилиши мумкин.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши-нинг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот иши Ўзбекистон Республикасининг фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги кунга қадар диэлектрик-яримўтказгич чегараси хоссаларига ва улар асосидаги асбоблар чиқиш ва ўтиш вольт-ампер характеристикаларига, кириш вольт-фарад характеристикаларига, турли таъсирлар натижасида диэлектрикда ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида тўпланган зарядларнинг таъсирларини ўрганиш билан чекланилган, ва шу зарядларнинг нотекис тақсимотининг транзистор ён ўтишларининг вольт-ампер ва вольт-фарад характеристикаларига таъсири деярли ўрганилмаган.

Корея Республикасидан Dong Myong Kim ва унинг ҳамкасблари томонидан, асбобга зарар етказмайдиган, изоляцияланган завторли майдоний транзистор диэлектрик-яримўтказгич чегарасида нуқсонлардаги заряднинг канал бўйлаб тақсимотини, затвор-исток ўтишининг сифимини ўлчашга асосланган усул билан аниқлаш таклиф қилинган ва натижалар моделлаштириш натижалари билан таққосланган. Бельгиянинг Халқаро микроэлектроника марказидан G. Groeseneken ва ҳамкасблари металл-диэлектрик-яримўтказгич транзистор диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги зарядларнинг канал бўйлаб тақсимотини аниқлаш учун заряд дамлаш усулини таклиф қилган. Россиялик олим И. Старков томонидан МОЯ транзистор диэлектрик қатлами ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги зарядларнинг транзистор характеристикаларига таъсирларини ажратиш усулларини таклиф қилган. Ҳозирги кунгача оксид-яримўтказгич чегарасида заряд тўпланиши бўйича барча тажриба натижаларини тўлиқлигича тушунтирадиган ягона модел

мавжуд эмас. Россия олимлари (В.Я. Урицкий, Е.А. Ладыгин, В.А. Гуртов ва б.) нурланиш таъсирида диэлектрик қатламида ва оксид-яримўтказгич чегарасида нуқсонлар концентрацияси ва зарядлар тақсимотини, ток ташувчилар ҳаракатчанлиги деградациясини асосан затвор, сток (исток) ёки таглик орқали ўтадиган ток ва кириш вольтфарад характеристикасини ўлчаш орқали ўрганишган.

Ўзбекистон олимлари С.З. Зайнабидинов, С.И. Власов, И.Н. Каримов, Х.С. Далиев, А. Юсупов, А. Атамуратовлар томонидан ҳам МДЯ асбоблар характеристикалари ўрганилган. Жумладан, С.И. Власов томонидан МДЯ структуралардаги диэлектрик-яримўтказгич чегараси хоссаларини ўрганиш учун модификацияланган C-V усуллар ривожлантирилган. И.Н. Каримов МДЯ структуралар чегара ҳолатларига турли ташқи таъсирларни ўрганган. А.Атамуратов ва А.Юсуповлар томонидан МДЯ транзисторлар хоссаларига, диэлектрик қатламга киритилган, локал зарядларнинг таъсири ўрганилган. Аммо бу ишларда МДЯ транзисторлар характеристикалари ва параметрларига оксид қатламидаги ва чегарадаги зарядлар канал бўйлаб тақсимотининг таъсири деярли ўрганилмаган.

МДЯ асбобларда диэлектрик қатламида ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида заряд тўпланиш жараёнини ўрганиш бўйича тадқиқотлар сони жуда кўп эканлигига қарамасдан ҳозирги кунгача диэлектрик қатламида ва чегарада турли электр стресслар таъсирларида заряд тўпланиш механизмини тушунтирадиган яқунланган модель яратилмаган. Микро- ва нанометр ўлчамлардаги МДЯ транзистор диэлектрик қатлами ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги локал зарядни, унинг канал бўйлаб тақсимотини аниқлашга қаратилган экспресс ва содда усуллар яратиш бўйича тадқиқотлар жуда кам.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Урганч давлат университети фундаментал илмий-тадқиқотлар режасининг ОТ-Ф2-67 «Оксид-яримўтказгич чегарасидаги нуқсонлар табиати ва ён томон бўйлаб тақсимотини тадқиқ қилиш усулига янгича ёндашиш» (2017-2020 й.й.) ва Урганч давлат университети илмий кенгаши томонидан тасдиқланган (28.12.2016 даги 4-сонли баённомаси) «Яримўтказгичлар ва яримўтказгич асбобларда физик жараёнларни моделлаштириш» мавзулари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади МДЯ транзисторнинг диэлектрикга ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасига киритилган локал заряднинг канал бўйлаб нотекис тақсимотининг транзисторнинг ён ўтишлар вольт-ампер ва вольт-фарад характеристикаларга таъсирини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

металл-нитрид-оксид-яримўтказгич ва металл-оксид-яримўтказгич транзисторлар структураларини ва характеристикаларини моделлаштириш учун физик моделларини TCAD Sentaurus дастурида тузиш;

металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзисторнинг нитрид қатламга киритилган локал заряднинг ён исток-база ўтиш вольт-фарад характеристикаларига таъсирини ўрганиш;

наноўлчамли металл-оксид-яримўтказгич транзисторнинг оксид қатламига киритилган локал заряднинг транзистор ён ўтишлари сифимига таъсирини ойдинлаштириш;

металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзисторнинг нитрид қатламига киритилган локал заряднинг ён исток-база ўтиш вольт-ампер характеристикасига таъсирини аниқлаш;

металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзисторнинг нитрид қатламига қамралган иккита локал заряднинг ён исток-база ўтиш вольт-фарад характеристикаларига таъсирини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти металл-оксид-яримўтказгич транзистори, металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзисторларидан иборат.

Тадқиқотнинг предмети металл-оксид-яримўтказгич транзисторнинг ён ўтишлари вольт-ампер ва вольт-фарад характеристикаларига турли таъсирлар натижасида диэлектрик қатламида ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида канал бўйлаб нотекис тўпланган заряднинг таъсир жараёнидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқотда электрон транспорти жараёнларини компьютерда сонли моделлаштириш ҳамда назарий-аналитик ҳисоблаш усулларидан фойдаланилган. Вольт-ампер характеристикаларни моделлаштиришда изотермик диффузион-дрейф транспорт моделидан фойдаланилган. Вольт-фарад характеристикаларни ҳисоблашда кичик ўзгарувчи сигнал усули қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

металл-оксид-яримўтказгич транзисторнинг диэлектрик қатламига киритилган локал зарядланган соҳа маркази истокдан канал бўйлаб узоқлашганда, канал марказида яримўтказгич сиртига яқин соҳада асосий заряд ташувчилар концентрациясининг ортиши сабабли, бўсаға кучланишининг ортиши кўрсатилган;

металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзисторнинг нитрид қатламига локал заряд киритилганда, силжитиш кучланишининг маълум қийматларидан бошлаб, исток-таглик ён ўтиши сифимининг таглик легирланиш даражаси $N_{\text{sub}} \leq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ бўлганда кескин сакраб ортиши ва $N_{\text{sub}} > 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ бўлганда кескин сакраб камайиши аниқланган;

металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзистори ён исток-таглик ўтишининг вольт-фарад характеристикасида, нитрид қатламига киритилган локал заряд таъсирида юзага келадиган сифим сакрашига мос келадиган кучланишнинг локал зарядланган соҳа чизиқли ўлчами ортиши билан монотон ортиши кўрсатилган;

нанометр ўлчамлардаги металл-оксид-яримўтказгич планар транзистори оксид қатламининг стокга яқин соҳасида локал заряднинг қамралиши ва қамралган локал зарядли соҳанинг чизиқли ўлчами d ортиши билан сток-таглик ён ўтиш сифими максимал ўзгаришининг чизиқли ортиши ва зарядли соҳа ўлчами ярим канал узунлигидан орта бошлаганда унинг тўйинишга эришиши ва унданг сўнг камайиб бошлаши аниқланган;

металл-нитрид-оксид-яримўтказгич планар транзисторининг нитрид қатламига локал зарядларнинг киритилиши ва унинг истокдан канал бўйлаб

узоқлашиши исток-таглик ўтишидаги сизиш токининг ортишига олиб келиши кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

планар металл-оксид-яримўтказгич транзистори диэлектрик қатламида тўпланган заряднинг ён ўтишлар сиғимига таъсирини ўрганиш натижаларида исток-таглик ва сток-таглик ўтишлар сиғимлари нисбатининг қамралган заряд тақсимотининг канал бўйлаб максимуми жойлашишига боғлиқлиги аниқланиб, амалиётда МОЯ транзистор оксид қатламида, электр стресс таъсирида инжекцияланиб қамралган заряднинг канал бўйлаб тақсимотини, истоктаглик ва стоктаглик ён ўтишларда барьер сиғими учун вольт-фарад характеристикаларини ўлчаш орқали баҳолашга имкон бериши кўрсатилган;

планар МОЯ транзистор бўсаға кучланишининг оксид қатламига киритилган локал заряднинг истокдан канал бўйлаб вазиятига боғлиқлиги аниқланиб, амалиётда МОЯ транзистор бўсаға кучланишининг ўзгаришига қараб оксид қатламида қамралган заряд тақсимотини аниқлаш имконини бериши аниқланган;

планар МОЯ транзистор исток-таглик ва сток-таглик ён ўтишлардаги сизиш токини оксид қатламида қамралган локал заряднинг канал бўйлаб вазиятига боғланиши аниқланиб, амалиётда МОЯ транзистор оксид қатламида жойлашган локал заряд вазиятини баҳолашга имкон бериши аниқланган;

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги диссертация ишида вольт-ампер ва вольт-фарад характеристикаларини моделлаштиришда стандарт дастурлардан фойдаланиш ва уларда қўлланилган физик моделлар нашрларда эълон қилинган тажриба натижалари асосида калибровка қилинганлиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти наноўлчамдаги металл-оксид-яримўтказгич транзисторларнинг ён ўтишлар вольт-ампер ва вольт-фарад характеристикаларига турли таъсирлар туфайли диэлектрикда ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида тўпланган зарядларнинг таъсирларини ўрганиш натижасида шу зарядларнинг нотекис тақсимотининг транзистор ён ўтишларининг вольт-ампер ва вольт-фарад характеристикаларига таъсири тўғрисидаги янги тасаввурларнинг яратилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти аниқланган металл-диэлектрик-яримўтказгич транзисторнинг ён ўтишлар вольт-ампер ва вольт-фарад характеристикаларининг диэлектрик қатламида ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида қамралган заряд тақсимоти билан боғланиши транзисторни олиш технологик жараёнида керакли параметрларни танлашда ва топилган ён ўтишлар сиғимининг оксид қатламида қамралган заряд тақсимотига боғланишидан оксид қатламини ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасини экспресс диагностика қилишда фойдаланиш мумкинлиги билан белгиланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Планар изоляцияланган затворли металл-диэлектрик-яримўтказгич транзисторнинг диэлектрик қатламида истокдан турли масофаларда, турли ўлчамларда қамралган локал

заряднинг ва турли тақсимот билан канал бўйлаб киритилган заряднинг транзистор турли характеристика ва параметрларига таъсирини моделлаштириш асосида:

турли электр стресслар натижасида оксид қатламида тўпланадиган заряднинг МДЯ транзистор ён ўтишлар характеристикаларига таъсирини моделлаштириш бўйича олинган натижалар Испаниянинг Сантиаго де Компостелла университетининг Компьютер Архитектураси бўлимида бажарилган «юқори даражада мукамал ҳисоблашлар учун Техник ва дастурий ускуналар» ва «юқори даражада мукамал ҳисоблашлардаги янги муаммолар ечимлари» лойиҳаларида илгариланган майдоний транзисторларни моделлаштиришда қўлланилган (Компьютер Архитектураси бўлими директорининг 28 июль 2022 йилдаги маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш наноўлчамдаги майдоний транзисторларни, хусусан планар майдоний транзисторларнинг характеристикаларининг электр стресслар натижасидаги деградациясини моделлаштириш имконини берган;

МОЯ транзистор бўсаға кучланишига, металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзистор ён исток-таглик ўтишининг вольт-фарад характеристикасига диэлектрик қатламга киритилган локал заряднинг таъсири бўйича олинган натижалар ва хулосалар асосида «FOTON» АЖ акционерлик жамиятида намуналар ишлаб чиқилган («UZELTEXSANOAT» уюшмасининг 14 ноябрь 2022 йилдаги 311-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот ишлари натижаларини технологик жараёнга қўллаш яримўтказгичли диод ва майдоний транзисторларнинг вольт-ампер характеристикаларига технологик жараёнларининг таъсирини ва ташқи таъсирларни башоратлаш ҳамда асбобларнинг бардошлиги ва ишончлилигини ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари Урганч давлат университети, Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти илмий семинарларида ҳамда илмий анжуманларда, жумладан 3 та халқаро ва 8 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 17 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола, жумладан, 3 та хорижий ва 2 та республика журналларида чоп этилган. Интеллектуал мулк агентлиги томонидан ЭҲМ да қўлланиладиган 2 та дастурий маҳсулот учун гувоҳномалар олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация иши жами 108 саҳифалардан иборат бўлиб, таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 58 та расм, 2 та жадвал ва 2 та иловани ўз ичига олган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқот мавзусининг республикада фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши ҳақида маълумотлар берилган.

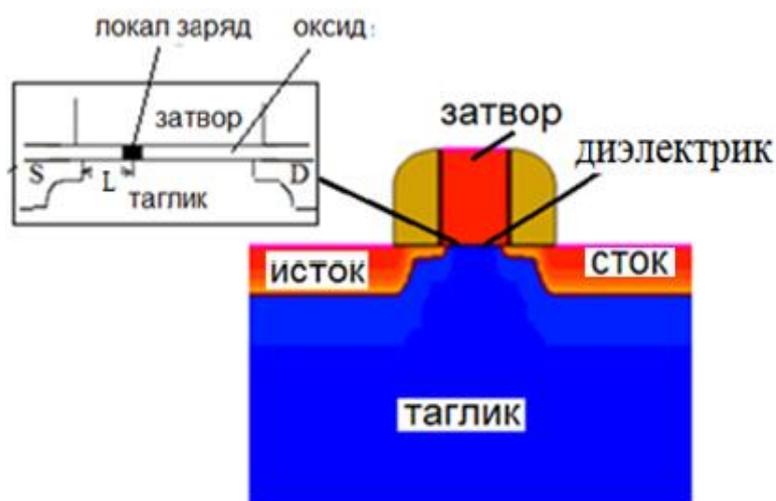
Диссертациянинг «**изоляцияланган затворли майдоний транзистор-лар ривожланиши ҳолати**» деб номланган **биринчи бобида** адабиётларда берилган маълумотлар таҳлили асосида планар металл-оксид-яримўтказгич транзисторлар ва уларнинг турлари ҳақида маълумотлар келтирилган. Металл-диэлектрик-яримўтказгич транзисторларда ташқи таъсирлар натижасида диэлектрик қатламида заряд тўпланиши механизмлари кўриб чиқилган. Наноўлчамли изоляцияланган затворли майдоний транзисторлар ишончлигига муаммолари таҳлил қилинган. Адабиётлар шарҳидан келиб чиқиб мавзунинг долзарблиги асосланиб, диссертациянинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

«**Планар металл-диэлектрик-яримўтказгич транзистори асосий параметр ва характеристикаларини моделлаштириш усуллари**» деб номланган **иккинчи бобда** металл-диэлектрик-яримўтказгич транзистори ён ўтишларининг хусусиятлари, ночизиқли қаршилиқ ва сифимларни аниқлаш учун кичик ўзгарувчи сигнал усули, TCAD Sentaurus дастури ёрдамида МДЯ транзистори ён ўтишлари вольт-фарад характеристикаларини моделлаштириш усули баён қилинган, моделлаштиришда қўлланилган транспорт ва ҳаракатчанлик моделлари кўриб ўтилган.

Диссертациянинг «**Планар металл-диэлектрик-яримўтказгич транзистори бўсаға кучланиши ва ён ўтиш вольт-ампер характеристикаларига диэлектрик қатламидаги локал заряднинг таъсири**» деб номланган **учинчи бобида** планар металл-оксид-яримўтказгич транзистори бўсаға кучланишининг диэлектрик қатламидаги локал заряднинг вазиятига ва ўлчамларига боғланиши, планар металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзистори ён ўтиш вольт-ампер характеристикасига, сток токига диэлектрик қатламидаги локал заряднинг ва унинг тақсимотининг таъсири ўрганилган.

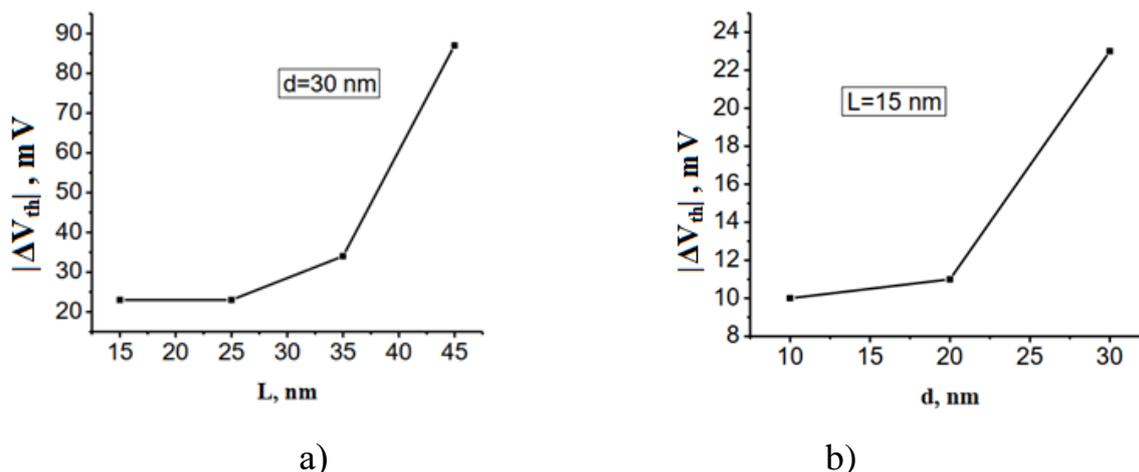
Ушбу ишда планар n-МОЯ транзисторларда (1-расм) бўсаға кучланишининг диэлектрик қатламидаги локал заряднинг ўлчамлари ва вазиятига боғланиши моделлаштирилган. Моделлаштириш натижалари оксид қатламига мусбат локал заряднинг киритилиши бўсаға кучланишининг камайишига олиб келишини, ва бу ўзгариш локал заряднинг истокга нисбатан вазиятига ва ўлчамига боғлиқ эканлигини кўрсатади (расм 2 а,б). Оксид қатламига киритилган локал заряд истокдан канал бўйлаб узоқлашганда унинг бўсаға кучланиши ортинининг асосий сабаби локал заряднинг таъсирида канал

марказида яримўтказгич сиртида асосий заряд ташувчилар концентрациясининг ортишидадир.



1-расм. Моделлаштирилган МОЯ транзистори тузилиши ва локал заряд жойлашиши

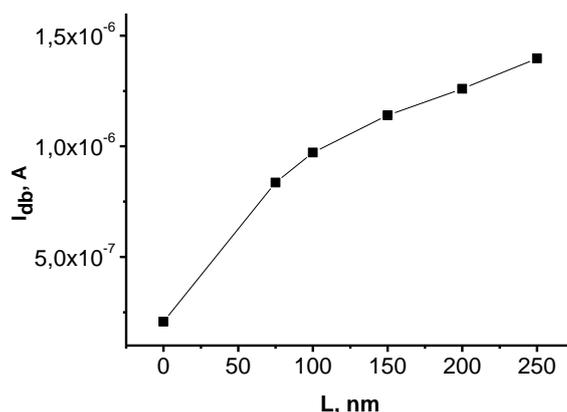
Ушбу ишда МНОЯ транзисторининг нитрид қатламига киритилган локал заряднинг канал бўйлаб турли вазиятида исток-база ўтиш тескари токига (сизиш токига) таъсири ҳам кўриб чиқилган. Моделлаштириш натижалари шуни кўрсатадики, локал зарядларнинг киритилиши исток-таглик ўтишининг I_{sb} сизиш токининг L масофага боғлиқ равишда ортишига олиб келади. 3-расмда ўтишга берилган тескари кучланиши, масалан, 7В бўлганда сизиш токининг нитрид қатламига киритилган локал заряднинг хар хил L масофаларга боғланиши келтирилган.



2-расм. МОЯ транзистор бўсага кучланишининг локал заряднинг истокдан масофа L га (a) ва чизикли ўлчами d га боғланиши (b)

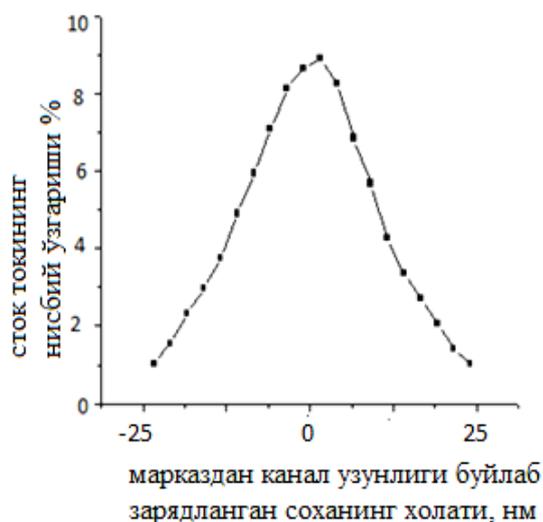
Кузатилаётган сизиш токининг ортиши локал заряднинг исток-таглик ўтиш камбағаллашган соҳаси кенглигига таъсири билан тушунтирилиши мумкин.

Ишда нанометр ўлчамдаги металл-оксид-ярымўтказгич транзисторлар оксид-ярымўтказгич чегарасида зарядланган нуқсонлар нотекис тақсимланишининг сток токига таъсири моделлаштириш орқали ўрганилган.

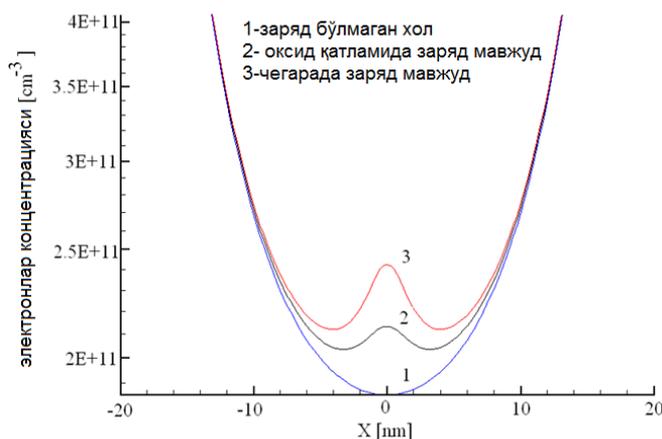


3-расм. Исток-таглик ўтиши сизиш токининг оксид қатламига киритилган локал заряднинг истокдан вазияти L га боғланиши. $V_{db}=7V$

Моделлаштириш натижалари шуни кўрсатадики сток токи нуқсонларнинг канал бўйлаб йўналишда тақсимотига, яъни локал заряднинг вазиятига боғлиқ. Сток токининг энг катта ўзгариши заряд канал бўйлаб марказда жойлашган холида кузатилади. Ва бу сток тоқларининг ўзгаришлари асосан затворнинг бўсагадан паст соҳасида кузатилади. Натижалардан кўришиб турибдики, бўсага ости сток токи чегарага киритилган заряднинг вазиятига катъий боғлиқдир. Сток токида максимал ўзгариш заряд чегара текислигининг канал бўйлаб марказида локализация килинганида содир бўлади (4-расм). Бундай хусусият транзистор каналидаги ташувчилар концентрациясининг канал бўйлаб тақсимоти билан боғлиқ (5-расм).



4-расм. Сток токининг локал заряднинг чегара бўйлаб жойлашишига боғлиқ равишда сток токидаги нисбий ўзгаришлар



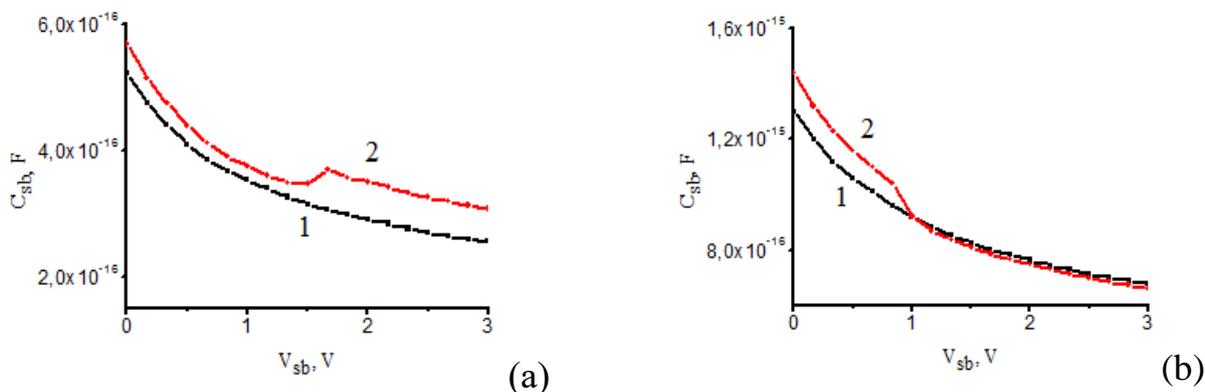
5-расм. Қамралган заряд бўлмаган ва бўлган холларда оксид-яримўтказгич чегарасидан 1 нм чуқурликда канал бўйлаб электронлар концентрациясининг тақсимоти. Зарядланган соҳа узунлиги 2 нм бўлиб у канала марказида жойлашган.

Расмдан кўришиб турибдики локал заряд марказда жойлашганда концентрациянинг энг катта ўзгариши кузатилади.

«Металл-диэлектрик-яримўтказгич транзистори ён ўтишлари вольт-фарад характеристикаларига диэлектрик қатламидаги локал заряднинг таъсири» деб номланган тўртинчи бобда планар металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзистори ён ўтишлар сиғимига нитрид қатламига киритилган локал заряднинг таъсир механизми таҳлил қилинган, ён ўтишлар вольт-фарад характеристикасининг нитрид қатламидаги локал зарядланган соҳа чизиқли ўлчамига ва канал бўйлаб вазиятига боғланиши ўрганилган ва нитрид қатламига иккита локал заряднинг киритилган холи кўрилган. Бундан ташқари нанометр ўлчамдаги металл-оксид-яримўтказгич транзистори диэлектрик қатламига киритилган локал заряднинг ён ўтиш сиғимига таъсири ва электр стресс таъсирида диэлектрик қатламида тўпланган заряднинг ён ўтишлар сиғимига таъсири моделлаштирилган.

Тагликнинг акцепторлар билан легирланиш даражаси $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ва $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ бўлган холларда ва нитрид қатламига локал заряд киритилганда, 2D моделлаштириш орқали, металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзистори исток-таглик ўтишининг C-V характеристикаси ўрганилган. Моделлаштириш TCAD Sentaurus дастури ёрдамида амалга оширилган. Транзистор ишчи соҳаларининг чизиқли ўлчамлари субмикрометр масштабларда бўлганлиги учун диффузион-дрейф транспорт модели қўлланилган ва ҳаракатчанлик моделида Шокли-Рид-Холл рекомбинацияси эътиборга олиниб, ҳаракатчанликнинг кучли майдонларда тўйиниши ва майдоннинг нормал ташкил этувчисининг таъсири ҳисобга олинган. Вольт-фарад характеристикасини аниқлашда 1 МГц частотада кучсиз ўзгарувчан сигнал усулидан фойдаланилган.

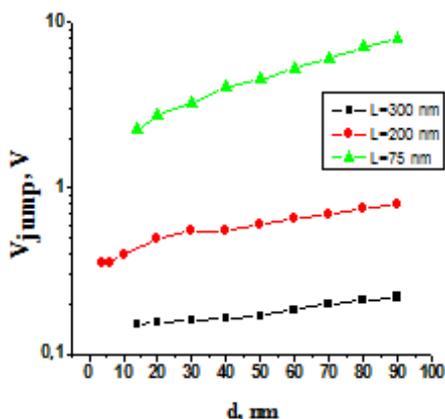
Моделлаштириш натижаларидан кўринадикки, локал заряднинг киритилиши исток-таглик ўтиши C-V характеристикасининг, маълум бир силжиш кучланиши V_{jump} дан бошлаб, аномал сакраб ўзгаришига олиб келади. Легирланиш даражаси $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ва ундан кичик бўлганда сиғимнинг сакраб ортиши (6-расм, а), $N_{\text{sub}} 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ дан катта бўлганда унинг сакраб камайиши кузатилади (6-расм, б). Бу ходиса нитрид қатламига киритилган локал заряднинг таъсирида канал сиртига яқин соҳада ташувчиларнинг қайта тақсимланиши ва силжитиш кучланишининг маълум қийматларида исток-таглик ўтишининг камбағаллашган соҳасининг эффектив кенглигининг адекват бўлмаган ўзгаришларига олиб келиши билан боғлиқ.



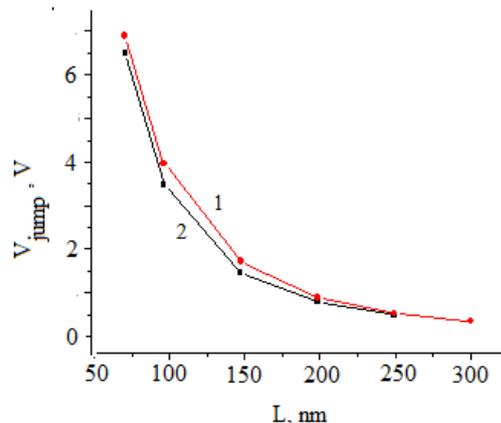
6-расм. МНОП транзистор исток-таглик ўтиши сиғимининг кучланишга, нитрид қатла-мига локал заряд киритилмаган (1) ва истокдан $L = 150 \text{ нм}$ масофада киритилган (2) холдаги боғланиши. Тагликнинг легирланиш даражаси $N_{\text{sub}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (a) ва 10^{17} см^{-3} (b).

МНОП транзисторнинг нитрид қатламига истокдан турли масофаларда турли чизиқли ўлчамларда киритилган локал, мусбат заряд вазияти ва чизиқли ўлчамлари билан, ён ўтишлар вольт-фарад характеристикаси ўзгаришини ифодалайдиган сакраш кучланиши V_{jump} нинг боғланиши кўриб чиқилди. Локал заряднинг истокдан масофаси 75, 200 ва 300 нм бўлган холлар учун моделлаштириш натижалари, V_{jump} нинг локал зарядланган соҳанинг чизиқли ўлчамлари d ортиши билан монотон ортишини кўрсатади (7-расм). V_{jump} нинг d камайиши билан деярлик чизиқли камайиб бориши, локал зарядланган соҳанинг ўлчамлари камайганда унинг истокга энг яқин чегараси истокдан узоқлашиши билан боғлиқ.

Моделлаштириш орқали V_{jump} кучланиш қийматлари локал заряднинг нитрид қатламида ва нитрид-оксид чегарасида, истокга нисбатан турли вазиятлар L да қамралганда ҳам аниқланган (8-расм). Бунда нитрид-оксид чегарасидаги заряд зичлиги $4 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$ қилиб олинган. Расмдан кўриниб турибдики локал заряднинг истокдан масофаси L ортиши билан сакраш кучланиши V_{jump} монотон камаяди.



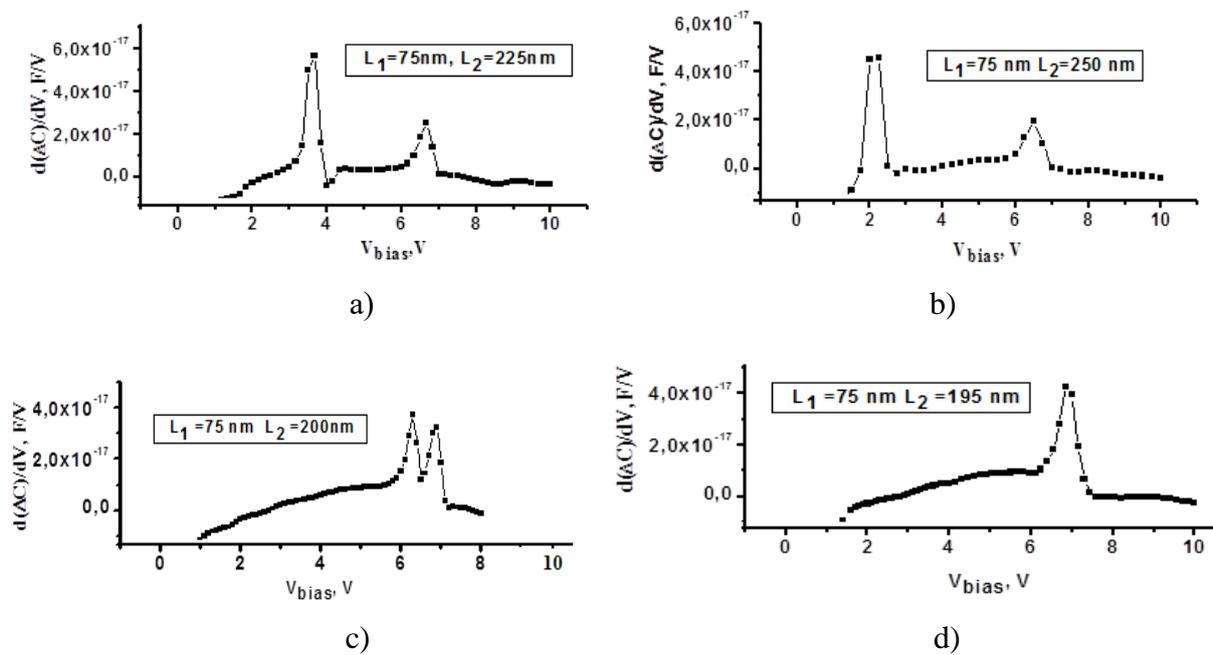
7-расм. V_{jump} нинг киритилган зарядланган соҳа узунлиги d га боғлиқлиги



8-расм. Сакраш кучланиши V_{jump} нинг локал заряд марказидан канал бўйлаб истокгача масофасига боғланиши. 1-локал заряд нитрид қатламида, 2-локал заряд нитрид-оксид чегарасида бўлган хол. $d=80$ нм.

МДЯ транзистор оксид қатламида бир вақтнинг ўзида бир нечта локал заряд жойлашганда уларни аниқлаш учун ён ўтишлар сиғимлари усулларнинг ажрата олиш қобилиятини аниқлаш муҳим вазифадир. Шу сабабли ушбу ишда 2D моделлаштириш орқали металл-нитрид-оксид-яримўтказгич транзисторининг нитрид қатламига истокдан ҳар хил L масофаларда канал бўйлаб жойлашган иккита локал заряднинг исток-таглик ўтиш вольт-фарад характеристикасига таъсири ўрганилди. Кўрилатган транзисторда поликремнийли затвор узунлиги 800нм, SiO_2 ва нитрид қатлам қалинлиги мос равишда 3нм ва 50 нм ни ташкил этади. p-таглик соҳасида акцепторлар концентрацияси 10^{16}см^{-3} , исток ва сток n-соҳаларда донорлар концентрацияси 10^{20}см^{-3} қилиб олинган. Зарядланган локал соҳада заряд зичлиги $8 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ ва зарядланган соҳа канал бўйлаб узунлиги 80 нм қилиб олинган. Моделлаштириш TCAD Sentaurus дастури ёрдамида олиб борилди.

Моделлаштиришни амалга ошириш мақсадида бир вақтнинг ўзида нитрид қатламига истокдан турли L_1 ва L_2 масофаларда иккита локал зарядлар киритилди. Шу иккита локал заряднинг биргаликдаги исток-таглик ён ўтиш вольт-фарад характеристикасига таъсири кўрилди. Сигимнинг сакрашини сигим ўзгаришининг кучланиш бўйича хосиласи $d(\Delta C)/dV$ нинг силжитиш кучланишига боғланишини аниқлаш орқали кузатиш, натижани аниқроқ акслантириши мумкин (9- расм).



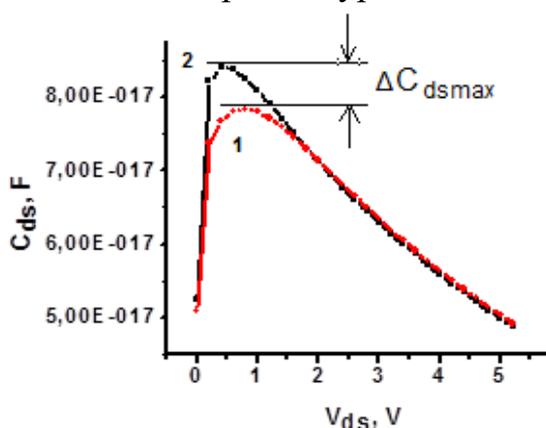
9-расм. Нитрид қатламида бир вақтнинг ўзида истокдан турли масофаларда иккита локал заряд жойлашганда $(\Delta C)/dV$ нинг силжитиш кучланиши V_{bias} га боғланиши.
 а) $L_1=75 \text{ nm}$ $L_2=250 \text{ nm}$, б) $L_1=75 \text{ nm}$ $L_2=225 \text{ nm}$ в) $L_1=75 \text{ nm}$ $L_2=200 \text{ nm}$ д) $L_1=75 \text{ nm}$ $L_2=195 \text{ nm}$

Натижалардан кўриниб турибдики, локал зарядлар узунликлари 80 нм ва улардаги зичликлар $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ бўлса, иккита локал заряднинг таъсирлари $d(\Delta C)/dV$ нинг кучланишига боғланишида ажратилиши мумкин экан. Кўриниб, турибдики иккита локал заряднинг ажратилиши мумкин бўлган энг яқин масофа 120-125 нм оралиқда ётибди.

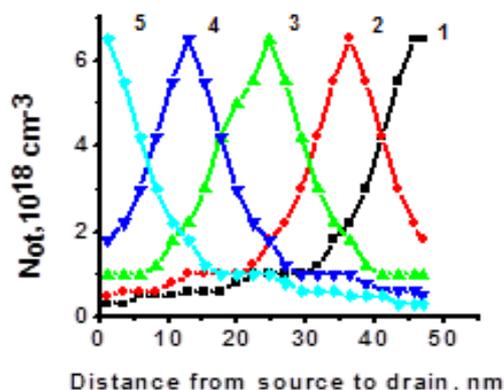
Диссертацияда нанометр ўлчамдаги металл-оксид-яримўтказгич транзистори диэлектрик қатламига киритилган локал заряднинг ён ўтиш сигими таъсири хам кўрилган. Бу таъсирнинг хусусияти шундан иборат эканки, бундай транзисторларда оксид қатламидаги локал заряд таъсирида ён ўтишлар сигимининг ўзгариши асосан кичик силжитиш кучланишларида кузатилади (10-расм). Бундай ходиса кичик кучланишларда, катта кучланишлардагига қараганда, ён ўтишнинг канал билан контактда бўлган чегара қисмининг эгрланиши ва мос равишда шу билан боғлиқ бўлган сигим C_{swc} , ён томоннинг канал билан контактда бўлмаган ва асос қисмлари билан боғлиқ бўлган чегара қисмлари (ва мос равишда шулар билан боғлиқ бўлган сигимлар C_{swb} ва C_{bw}) га нисбатан сезиларли бўлиши билан тушунтирилади.

Диссертация ишида моделлаштириш орқали ён сигимлар усулини наноўлчамли планар МОЯ транзистор затвор ости диэлектрик қатламига инъекцияланган ва чегарада ушланган қайноқ ташувчиларнинг канал бўйлаб

тақсимотини баҳолаш учун фойдаланиш имкониятири ўрганилган. Моделлаштиришда қамралган заряднинг канал бўйлаб, 11-расмда келтирилган тақсимотлари учун, сток-таглик ўтиши барьер сифимига таълуқли C-V боғланишлари ҳам ўрганилган.



10-расм. Нанометр ўлчамдаги планар МОЯ транзисторларда оксид қатламидаги локал заряд таъсирида ён ўтишлар сифими ўзгариши



11-расм. Оксид қатламига инжекцияланиб қамралган заряд концентрациясининг моделлаштиришда кўрилган канал бўйлаб истокдан стокга йўналишида тақсимотлари.

Бу холда ҳам сифим ўзгаришлари асосан кичик силжитиш кучланишларида кузатилади. Ва бундай ходиса асосан ён ўтиш чегарасининг канал билан контактда бўлган қисмининг ўзгаришлари билан тушунтирилади.

ХУЛОСАЛАР

Изоляцияланган затворли планар металл-диэлектрик-яримўтказгич транзисторлар характеристикаларига турли таъсирлар натижасида диэлектрик қатламида қамралиши мумкин бўлган нотекис тақсимланган заряднинг таъсирини моделлаштиришлар ва назарий таҳлиллар қилиш бўйича олинган натижалар асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. n-МОЯ транзисторнинг оксид қатламига киритилган локал заряд истокдан канал бўйлаб узоқлашганда унинг бўсаға кучланишининг ортиши аниқланди. Бунинг асосий сабаби локал заряднинг таъсирида канал марказида яримўтказгич сиртига яқин соҳада асосий заряд ташувчилар концентрациясининг ортишидадир.

2. Моделлаштириш натижаларидан МНОЯ транзисторнинг нитрид қатламига локал зарядларни киритилиши ва унинг истокдан канал бўйлаб узоқлашиши исток –таглик ўтиши сизиш токи I_{sb} нинг ортишига олиб келиши кўрсатилди. Кузатилаётган сизиш токининг ортиши локал заряднинг исток-таглик камбағаллашган соҳаси кенгилгини камайтириши билан тушунтирилади.

3. Моделлаштириш натижаларидан, планар МНОЯ транзисторнинг нитрид қатламига локал заряд киритилганда, исток–таглик ўтиш вольт-фарад характеристикасида, кучланишнинг қандайдир аниқ бир қиймати V_{jump} да, сифимнинг сакраши кўрсатилди ва кучланишининг V_{jump} қийматларидан бошлаб, таглик легирланиш даражаси $N_{sub} \leq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ бўлганда исток-таглик

ён ўтиши сифимининг кескин сакраб ортиши ва $N_{\text{sub}} > 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ бўлганда кескин сакраб камайиши аниқланди.

4. Планар МНОЯ транзисторнинг нитрид катламига канал бўйлаб истокдан турли масофаларда киритилган ва турли узунликларга эга локал заряднинг таъсирини моделлаштириш натижаларидан, V_{jump} нинг локал заряднинг вазиятига ва чизикли ўлчамлари d га боғлиқлиги ва d ортиши билан монотонн ортиши кўрсатилди.

5. V_{jump} кучланиш локал заряднинг планар МНОЯ транзисторнинг нитрид қатламида ва нитрид-оксид чегарасида қамралганда, истокга нисбатан канал бўйлаб масофаси L ортиши билан сакраш кучланиши V_{jump} нинг монотонн камайиши кўрсатилди.

6. Диэлектрик қатламига киритилган локал заряднинг ён ўтиш сифимига таъсирини ифодаловчи ҳосила $d(\Delta C)/dV$ нинг кучланишга боғланишдаги амплитудаси локал заряд ўлчамларининг ортиши билан ортиб бориб тўйинишга эришиши кузатилди. Бу эффект локал заряд миқдорининг ортиши натижасида канал сиртидаги ташувчилар концентрациясига таъсир қиладиган майдоннинг кучайиши ва унинг ўз навбатида таглик сиртидаги ташувчилар концентрациянинг қайта тақсимланишига олиб келиши билан тушунтирилади.

7. Нанометер ўлчамлардаги МОЯ транзисторда завтор ости оксид қатламининг стокга яқин соҳасида локал заряднинг қамралиши ва қамралган локал зарядланган соҳа чизикли ўлчами d ортиши билан исток-таглик ён ўтиш сифими ўзгариши ΔC_{ssmax} нинг чизикли ортиши ва заряд ўлчами ярим канал узунлигидан ортиб бошлаганда унинг тўйинишга эришиши ва унданг сўнг яна d ортиши билан кескин ортиши кузатилади. Оксид қатлами стокдан истокгача заряд билан тўлик қопланганда ΔC_{dsmax} ва ΔC_{ssmax} ларнинг бир бирига тенг бўлиши кўрсатилди.

8. Моделлаштириш натижалари исток-таглик ва сток-таглик ён ўтишлар сифимларининг нисбати оксидда қамралган заряд тақсимотининг мақсумуми жойлашишига боғлиқ эканлигини кўрсатади. Қамралган заряд тақсимот амплитудаси канал марказига нисбатан исток томонида локаллашганда $C_{\text{sbt}} / C_{\text{dbt}} > 1$ бўлади, ва сток томонида локаллашганда $C_{\text{sbt}} / C_{\text{dbt}} < 1$ бўлади. Нисбатнинг $C_{\text{sbt}} / C_{\text{dbt}} = 1$ қиймати амплитуданинг канал марказида локаллашганлигига мос келади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc02/27.02.2020.FM/T.110.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ АН РУз**

УРГЕНЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АТАМУРАТОВА ЗУХРА АТАБЕКОВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИКЕ И НА ГРАНИЦЕ
ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП
ТРАНЗИСТОРА**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2021.2.PhD/FM614.

Диссертация выполнена в Ургенчском государственном университете.

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

Научный консультант: **Юсупов Ахмед**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Каримов Иброхим Набиевич**
доктор физико-математических наук, профессор
Ёдгорова Дилбара Мустафаевна
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: Тошкентский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «__» _____ 2023 года в __ часов на заседании Научного совета DSc02/27.02.2020.FM/T.110.01 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском Физико-техническом институте Академии наук Республики Узбекистан (Адрес: 100084, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Чингиз Айтматов, дом 2Б. Тел: (+99871) 235-93-61, факс (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net).

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № _____) по адресу: 100084, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Чингиз Айтматов, дом 2Б. Тел: (+99871) 235-93-61

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2023 г.
(реестр протокола рассылки № _____ от «__» _____ 2023 г.).

Х.К. Олимов

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

Ж.С. Ахатов

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., с.н.с.

Ш.Н. Усмонов

Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., с.н.с.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Во всем мире в настоящее время изучение свойств транзисторов металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) привлекает внимание широкой мировой научной общественности. В частности, в 2019 году 32,4 процента сегмента рынка полупроводников приходится на сети и устройства связи. Ожидается, что мировой рынок полупроводников достигнет 469,4 млрд долларов в 2021 году и, как ожидается, достигнет 726,73 млрд долларов к 2027 году при среднегодовом темпе роста 8,4%¹. Исследование влияния различных внешних воздействий на характеристики и свойства границы раздела диэлектрик-полупроводник МДП приборов микрометровых и нанометровых размеров является актуальной задачей современной полупроводниковой наноэлектроники. Из них, в ряду самых актуальных задач можно отметить исследование влияния ионизирующего радиационного излучения, электрического поля, инжекции заряда на границу раздела диэлектрик-полупроводник микро и наноразмерных структур металл-диэлектрик-полупроводник. Наряду с радиационной стойкостью, важность задач такого типа связана с развитием стабильных, надежных и стойких к электрическим стрессам транзисторов.

В последние годы МДЯ-структуры находят широкое применение в различных современных электронных устройствах, включая полупроводниковые элементы памяти, устройства мобильной связи, различные медицинские имплантируемые датчики, телекоммуникационные устройства, оборудование космической отрасли в качестве основного организационного элемента.

Актуальность изучения эффектов различных внешних воздействий на структуры металл-оксид-полупроводник (МОП) и транзисторов на его основе связана с неизученностью до конца механизмов таких воздействий. В частности, не полностью определены механизмы влияния на стабильность и функциональную надежность параметров и характеристик субмикрометровых и нанометровых МОП транзисторов локального заряда, встроенного под действием различных причин в оксидный слой и на границу диэлектрик-полупроводник. С этой точки зрения одной из важных задач является совершенствование методов контроля дефектов на границе диэлектрик-полупроводник и исследование распределения зарядов около границы.

В нашей Республике уделяется большое внимание развитию науки, в частности особое внимание уделяется развитию физики полупроводниковых приборов и электронной отрасли. В этом плане учеными республики получены важные результаты по получению новых полупроводниковых материалов, различных структур на их основе и по изучению влияния различных внешних воздействий на их характеристики. В стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2022-2026 годы², в частности, определены

¹ Данные Всемирной полупроводниковой торговой статистики (<https://www.wsts.org/>)

² Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы».

задачи по «Непрерывному обеспечению экономики электрической энергией и активному внедрению технологий «Зеленой энергетики» во все сферы, повышению энергетической эффективности экономики на 20 процентов». В этом аспекте, одной из важных задач является разработка новых материалов электронной техники и структур на их основе, стойких к различным воздействиям и эффективные методы контроля их параметров.

Данное диссертационное исследование в определённой степени служит реализации задач, обозначенных в постановлениях Президента Республики Узбекистан ПП–60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 года, «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли» от 30 мая 2019 года, ПП-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности» от 14 июля 2018 года, а также в других нормативно-правовых документах, относящихся к данной сфере.

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

Степень изученности проблемы. До настоящего времени учёные ограничивались исследованием влияния заряда накопленного в диэлектрике и на границе диэлектрик-полупроводник под действием различных внешних воздействий, на свойства границы диэлектрик-полупроводник и на выходные и переходные вольт-амперные характеристики, а также входные вольт-фарадные характеристики приборов на их основе и практически не исследовано влияние распределения этих зарядов на вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики боковых переходов транзисторов.

Dong Myong Kim и его сотрудниками из Республики Корея предложено исследовать распределение заряда на дефектах на границе диэлектрик-полупроводник вдоль канала в полевом транзисторе с изолированным затвором, неразрушающим методом, основанным на измерении емкости перехода затвор-исток, и результаты сравнены с результатами моделирования. G. Groeseneken и сотрудники из Международного центра микроэлектроники в Бельгии предложили метод накачки для определения распределения вдоль канала заряда встроенного на границе диэлектрик-полупроводник транзистора металл-диэлектрик-полупроводник. Российский ученый И. Старков предложил метод разделения влияния на характеристики транзистора заряда в диэлектрическом слое и на границе диэлектрик-полупроводник.

На сегодняшний день не существует единой модели, полностью объясняющей все экспериментальные результаты накопления заряда на границе оксид-полупроводник. Российскими учеными (В.Я. Урицкий, Е.А. Ладыгин, В.А. Гуртов и др.) под действием радиации увеличивается концентрация

дефектов и распределение зарядов в диэлектрическом слое и границе оксид-полупроводник, ухудшается подвижность носители тока, в основном затворные, стоковые (стоковые) или изучаемые путем измерения тока через базу и входной вольтфарадной характеристики.

Учеными Узбекистана С.З. Зайнабидиновым, С.И. Власовым, И.Н. Каримовым, Х.С. Далиевом, А. Юсуповым, А. Атамуратовым и другими проводились исследования характеристик МДП структур и полевых транзисторов на основе этих структур. В частности, С.И. Власовым развиты усовершенствованные методы C-V характеристик для исследования границы раздела диэлектрик-полупроводник в МДП структурах. И.Н. Каримовым исследовались различные внешние влияния на граничные состояния в МДП структурах. А. Атамуратовым и А. Юсуповым моделировались влияния на характеристики МДП транзисторов локальных зарядов в диэлектрическом слое. Но в этих работах не достаточно рассматривались влияние неравномерного распределения оксидного и граничного заряда на характеристики и параметры МОП транзисторов.

Несмотря на очень большое число исследований по изучению процесса накопления заряда в диэлектрическом слое и на границе диэлектрик-полупроводник в МДП приборах, к настоящему времени, все ещё не разработана целостная законченная модель, объясняющая механизм накопления заряда в диэлектрическом слое и на границе под действием различных электрических стрессов. Очень мало исследований направленных на развитие экспрессных и простых методов определения локального заряда в диэлектрическом слое и на границе диэлектрик-полупроводник и его распределения вдоль канала микро- и нанометрового МДП транзистора.

Связь исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках планов фундаментальных научных исследований Ургенчского государственного университета по темам: ОТ-Ф2-67 «Новый подход к методу исследования природы и латерального распределения дефектов на границе диэлектрик-полупроводник» (2017-2020) и «Моделирование физических процессов в полупроводниках и полупроводниковых приборах», утвержденной ученым советом Ургенчского государственного университета (протокол № 4 от 28.12.2016).

Целью исследования является установление влияния неравномерного распределения вдоль канала локального заряда, встроенного в диэлектрическом слое и на границе диэлектрик-полупроводник, на вольтамперные и вольтфарадные характеристики боковых переходов МДП транзистора.

Задачи исследования:

разработать физические модели в программе TCAD Sentaurus для моделирования характеристик транзисторных структур металл-нитрид-оксид-полупроводник и металл-оксид-полупроводник;

изучить влияние локального заряда, встроенного в нитридном слое транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник, на вольтфарадные характеристики бокового перехода исток-база;

выяснить влияния на емкости боковых переходов наноразмерного транзистора металл-оксид-полупроводник локального заряда, встроенного в оксидном слое;

определить влияние локального заряда, встроенного в нитридном слое, на вольтамперную характеристику бокового перехода исток-база транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник;

исследовать влияние на вольтфарадные характеристики бокового перехода исток-база двух локальных зарядов, встроенных в нитридном слое транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник.

Объектом исследования являются транзисторы металл-оксид-полупроводник и металл-нитрид-оксид-полупроводник.

Предметом исследования являются процессы влияния на вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики боковых переходов МОП транзистора заряда, неравномерно встроенного в диэлектрическом слое и на границе диэлектрик-полупроводник, под влиянием различных воздействий.

Методы исследований. В исследовании использованы методы численного компьютерного моделирования и теоретико-аналитических расчетов электронных процессов электронного транспорта. При моделировании вольтамперных характеристик использована изотермическая диффузионно-дрейфовая модель. При моделировании вольтфарадных характеристик использовался метод слабого переменного сигнала.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

показано, что пороговое напряжение транзистора металл-оксид-полупроводник увеличивается при удалении от истока вдоль канала центра заряженной локальной области, из-за увеличения концентрации основных носителей заряда в центра канала на поверхности полупроводника;

определено, что при введении локального заряда в нитридный слой транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник, ёмкость бокового перехода исток-подложка, начиная с определенных значений напряжения смещения, при степени легирования подложки $N_{\text{sub}} \leq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, скачкообразно увеличивается, а при $N_{\text{sub}} > 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ скачкообразно уменьшается;

показано, что напряжение, соответствующее скачку емкости в вольтфарадной характеристике бокового перехода исток-подложка, вызванного локальным зарядом встроенным в нитридный слой транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник, монотонно увеличивается с увеличением линейного размера локальной заряженной области вдоль канала;

выяснено, что максимальное изменение емкости перехода сток-подложка, вызванного встраиванием в оксидный слой около стока локального заряда, линейно увеличивается с увеличением линейного размера этой заряженной области, и достигает насыщения при длине заряженной области равной длине половины канала, а затем начинает уменьшаться;

показано, что встраивание локального заряда в нитридный слой транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник и его удаление от истока вдоль канала приводит к увеличению тока утечки перехода исток-подложка.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

выявлена зависимость отношения емкостей переходов исток-подложка и сток-подложка от положения максимума распределения встроенного заряда в результате исследования влияния встроенного в оксидном слое заряда на емкости боковых переходов планарного транзистора металл-оксид-полупроводник, и показана возможность, оценки распределения заряда, инжектированного под действием электрического стресса и встроенного в оксидном слое, посредством измерения вольтфарадных характеристик для барьерной емкости боковых переходов исток-подложка и сток-подложка;

определена зависимость порогового напряжения от положения локального заряда вдоль канала от истока, и показана возможность определения, на практике, распределения встроенного в оксидном слое заряда по изменениям порогового напряжения планарного МОП транзистора;

определена зависимость тока утечки в боковых переходах от положения вдоль канала локального заряда встроенного в оксидном слое, и определена возможность, по этой зависимости, оценки положения локального заряда в планарном МОП транзисторе.

Достоверность результатов исследования обосновывается использованием в диссертационной работе стандартной программы TCAD Sentaurus, в которой используемые физические модели калибровались с данными опубликованных в периодических изданиях экспериментальных результатов, а также применением общепризнанных современных подходов и законов теоретической физики полупроводников.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования определяется формированием новых представлений о влиянии неоднородного распределения заряда на вольтамперные и вольтфарадные характеристики боковых переходов транзистора из результатов изучения влияния заряда в диэлектрическом слое и на границе диэлектрик-полупроводник, накопленного при различных воздействиях, на вольтамперные и вольтфарадные характеристики боковых переходов наноразмерного транзистора металл-оксид-полупроводник.

Практическая значимость полученных результатов исследования определяется тем, что установленная связь вольтамперных и вольтфарадных характеристик боковых переходов с распределением встроенного заряда в оксидном слое и на границе раздела диэлектрик-полупроводник МДП транзистора, может быть использована для выбора необходимых параметров при технологическом процессе его получения, а также возможностью использования при экспрессной диагностике оксидного слоя и границы раздела диэлектрик-полупроводник, выявленной зависимости емкости боковых переходов от формы распределения заряда в оксидном слое.

Внедрение результатов исследования.

Результаты, полученные при моделировании влияния локального заряда встроенного в диэлектрическом слое на различных расстояниях от истока, с различными размерами и различным распределением вдоль канала на различные характеристики и параметры планарного транзистора с

изолированным затвором металл-диэлектрик-полупроводник были использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

Результаты, полученные при моделировании влияния встроенного, из за различных электрических стрессов, в оксидном слое заряда на характеристики боковых переходов МДП транзистора были использованы в проектах «Технические устройства и программные обеспечения для вычислений высокого уровня сложности» и «решение новых проблем в расчетах высокого уровня сложности» в отделе Компьютерная архитектура университета Сантьяго Де Компостелла Испании при моделировании продвинутых полевых транзисторов (справка директора Компьютерной архитектуры от 28 июля 2022 года). Использование научных результатов позволило моделировать деградацию наноразмерных полевых транзисторов, в частности планарных полевых транзисторов, вызванных в результате электрического стресса.

На основе результатов и выводов исследования влияния локального заряда, введенного в диэлектрический слой, на пороговое напряжение МОП транзистора и вольт-фарадную характеристику бокового перехода исток-подложка транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник в акционерном обществе АО «FOTON» получены образцы (Справка от Ассоциации «UZELTEXSANOAT» №311 от 14 ноября 2022 года). Применение результатов научного исследования в технологическом процессе создаёт возможность предсказывать влияние технологических процессов и внешних воздействий на вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов и полевых транзисторов, а также увеличить стойкость и надежность приборов.

Апробация результатов исследований. Результаты данного исследования обсуждались на семинарах Ургенчского государственного университета, и докладывались на 3 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них 5 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, и которые полностью отражают содержание диссертации, 3 статьи в зарубежных и 2 статьи в республиканских научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы, 2 приложений, 108 страниц основного текста, включая 58 рисунка и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, а также объект, предмет и методы исследования, определена связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего учебного заведения, где выполнена диссертация, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием «Состояние развития полевых транзисторов с изолированным затвором» на основе анализа литературных данных приведена информация о транзисторах металл-диэлектрик-полупроводник и его типах. Рассмотрены механизмы накопления заряда при различных внешних воздействиях в транзисторах металл-диэлектрик-полупроводник. Проанализированы проблемы надежности наноразмерных полевых транзисторов с изолированным затвором. Исходя из обзора литературы обоснована актуальность и сформулированы цели и задачи диссертации.

Во второй главе под названием «Методы моделирования основных параметров и характеристик планарных транзисторов металл-диэлектрик-полупроводник» описаны особенности боковых переходов транзистора металл-диэлектрик-полупроводник, метод слабого переменного сигнала для определения нелинейного сопротивления и емкости, метод моделирования вольтфарадной характеристики боковых переходов с помощью программы TCAD Sentaurus, рассмотрены транспортные модели и модели подвижности, примененные при моделировании.

В третьей главе диссертации с названием «Влияние локального заряда в диэлектрическом слое на пороговое напряжение и вольтамперные характеристики боковых переходов планарного транзистора металл-диэлектрик-полупроводник» исследована зависимость порогового напряжения от размеров и положения локального заряда в диэлектрическом слое транзистора металл-оксид-полупроводник и влияние локального заряда и его распределения в диэлектрическом слое транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник на вольтамперную характеристику бокового перехода и ток стока.

В этой работе моделирована зависимость порогового напряжения n-МОП транзистора от размеров и положения локального заряда в диэлектрическом слое (рис.1). Результаты моделирования показывают, что введение в оксидный слой положительного локального заряда приводит к увеличению порогового напряжения и, что это изменение зависит от положения локального заряда от истока и его размеров (рис. 2 а,б). Увеличение порогового напряжения с удалением локального заряда от истока связано с увеличением концентрации основных носителей заряда в центре канала.

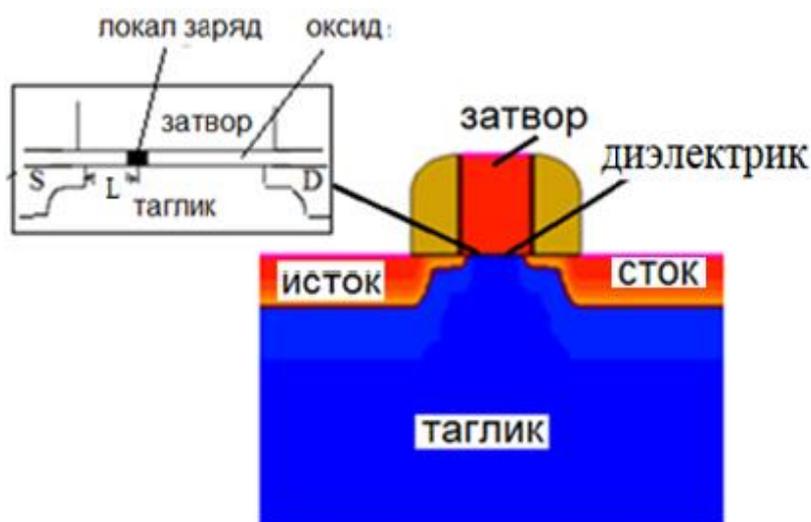


Рис.1 Смоделированная структура транзистора МОЯ и расположение локального заряда

Рассматривалось также влияние локального заряда введенного в нитридный слой МНОП транзистора, при его различных положениях вдоль канала, на обратный ток перехода исток-подложка. Результаты моделирования показывают, что введение локального заряда приводит к увеличению тока утечки I_{sb} перехода исток-подложка с увеличением расстояния L от истока. На рис.3 приведена зависимость тока утечки, к примеру при обратном напряжении 7В на переходе, от расстояния L локального заряда от истока, введенного в нитридный слой.

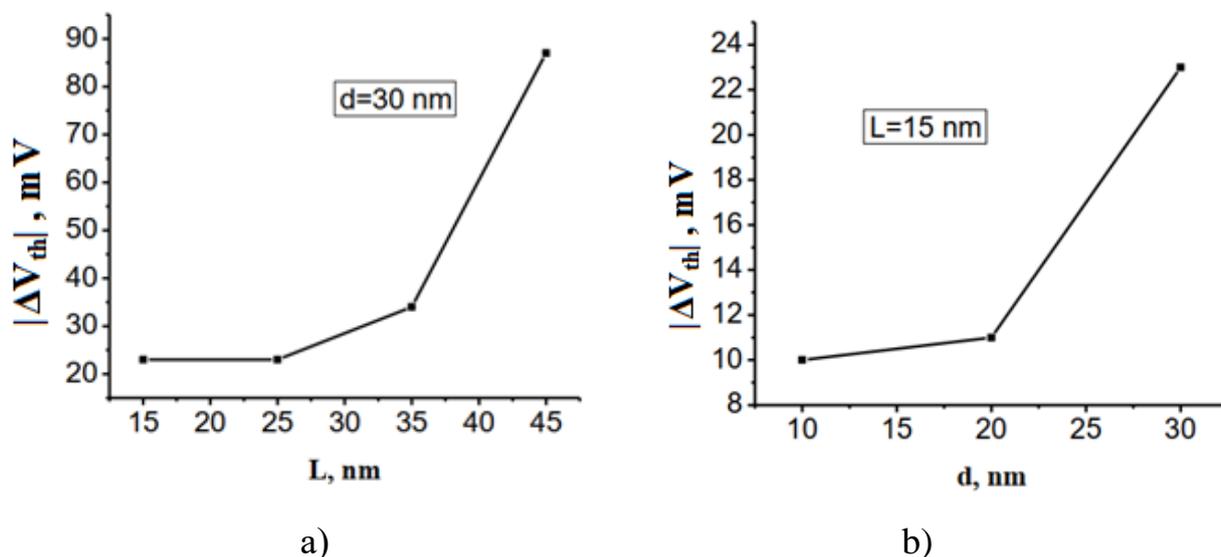


Рис.2. Зависимость изменения порогового напряжения от размеров локального заряда d (a) и его расстояния от стока L (b).

Наблюдаемое увеличение тока утечки может быть объяснено влиянием локального заряда на ширину обедненной области перехода исток-подложка. В работе, посредством моделирования, изучалось влияние на ток стока неравномерного распределения заряженных дефектов на границе оксид-полупроводник в нанометровых транзисторах металл-оксид-полупроводник.

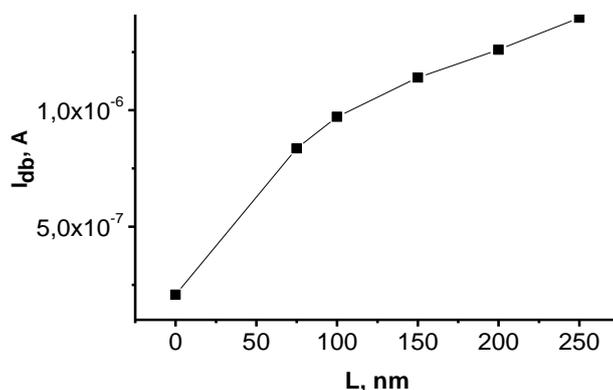


Рис.3 Зависимость тока утечки перехода исток-база от расстояния локального заряда L от истока при напряжении на переходе 7В.

Результаты моделирования показывают, что ток стока зависит от распределения дефектов вдоль канала, то есть от положения локального заряда. Наибольшее изменение тока стока наблюдается при расположении локального заряда в центре вдоль канала. Эти изменения тока стока в основном наблюдаются в подпороговой области. Из результатов видно, подпороговый ток стока строго зависит от положения граничного заряда. Максимальное изменение тока стока происходит при локализации заряда на граничной плоскости в центре вдоль канала (рис.4). Такое поведение связано с распределением вдоль канала концентрации носителей в канале (рис. 5).

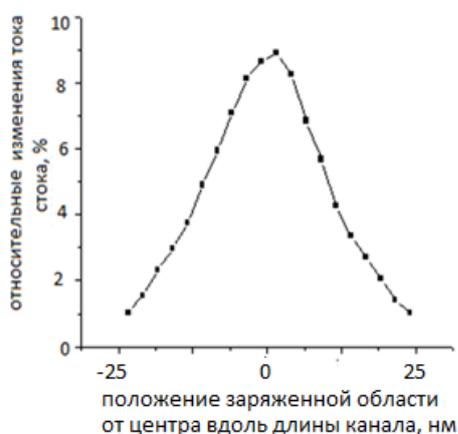


Рис.4 Относительные изменения стокового тока в зависимости от положения локального заряда вдоль границы.

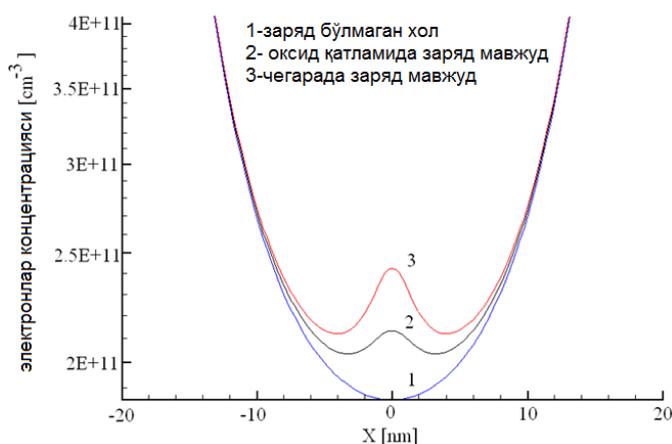


Рис.5 Распределение концентрации электронов вдоль канала на глубине 1 нм от границы оксид-полупроводник с захваченным зарядом и без него. Заряженное поле имеет длину 2 нм и расположено в центре канала.

Из рисунка видно, что наибольшее изменение концентрации наблюдается при расположении локального заряда в центре вдоль канала.

В четвертой главе диссертации под названием «Влияние локального заряда в диэлектрическом слое транзистора металл-диэлектрик-полупроводник на вольтфарадные характеристики боковых переходов» проанализирован механизм воздействия локального заряда введенного в нитридный слой транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник на емкости

боковых переходов, изучена связь вольтфарадной характеристики боковых переходов от линейных размеров и положения вдоль канала локального заряда в нитридном слое и рассмотрен случай встраивания одновременно двух локальных зарядов в нитридном слое. Кроме этого моделировано влияние встроенного в диэлектрическом слое локального заряда и заряд накопленного вследствие электрического стресса на емкость боковых переходов нанометрового транзистора металл-оксид-полупроводник.

С помощью двумерного моделирования изучена C-V характеристика перехода исток-подложка транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник при введении локального заряда в нитридный слой и уровнях легирования подложки акцептором $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Моделирование проведено с помощью программы TCAD Sentaurus. Так как линейные размеры рабочей области транзистора имеют субмикрометровые масштабы при моделировании была использована диффузионно-дрейфовая модель транспорта и в модели подвижности принята модель Шокли-Рида-Холла для учета рекомбинации, учтены насыщение подвижности в сильном электрическом поле и влияние нормального электрического поля. При вычислении вольтфарадной характеристики использован метод слабого переменного сигнала при частоте сигнала 1 МГц.

Из результатов моделирования видно, что введение локального заряда, начиная с определенного значения прилагаемого напряжения V_{jump} , приводит к аномальному скачку C-V характеристики перехода исток-подложка. При уровне легирования подложки $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и меньше наблюдается скачкообразное увеличение (Рис.6, а), а при концентрациях больших $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ скачкообразное уменьшение емкости (рис.6, б). Это явление связано с перераспределением концентрации носителей около поверхности канала и неадекватным изменением эффективной ширины обедненной области перехода исток-подложка при определенных напряжениях смещения под влиянием локального заряда введенного в нитридный слой.

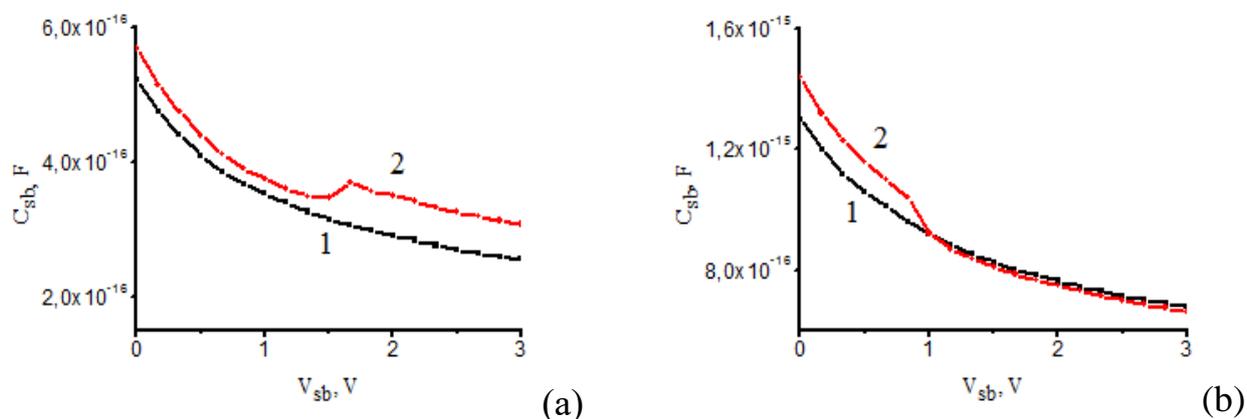


Рис. 6 Зависимость емкости на переходе исток –подложка от напряжения для МНОП – транзистора без встроенного заряда (1) и со встроенным в нитридном слое локальным зарядом на расстоянии $L = 150 \text{ нм}$ от истока (2), при уровнях легирования в подложке $N_{\text{sub}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (а) и 10^{17} см^{-3} (б).

Рассмотрена связь между расстоянием и линейными размерами локального заряда введенного в нитридный слой МНОП транзистора на разных расстояниях от истока и с различными линейными размерами и напряжением V_{jump} , характеризующим изменение вольтфарадной характеристики боковых переходов. Результаты моделирования полученные при расстояниях от локального заряда до истока 75, 200 и 300 нм, показывают монотонное увеличение V_{jump} с увеличением линейного размера локального заряда d (рис.7). Почти линейное уменьшение V_{jump} с уменьшением d связано с удалением ближней к истоку границы локального заряда от истока при уменьшении линейных размеров.

С помощью моделирования определены значения V_{jump} при различных положениях L от истока локального заряда встроенного в нитридном слое и на границе нитрид-оксид (рис.8). В этом случае плотность заряда на границе нитрид-оксид выбрана равной $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Из рисунка видно, с увеличением расстояния L от истока напряжение скачка V_{jump} монотонно уменьшается.

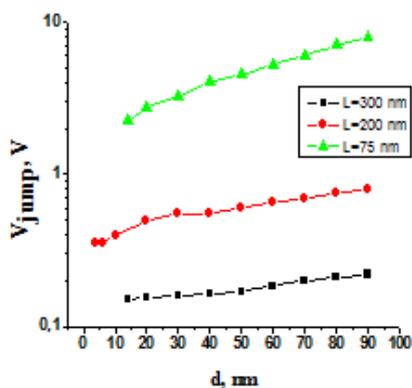


Рис. 7 Зависимость V_{jump} от длины введенного заряженного поля d .

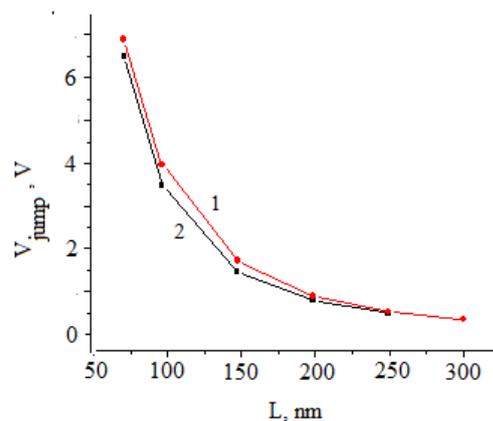


Рис. 8 Зависимость V_{jump} от L при встраивании заряда в нитриде (1) и на границе раздела нитрид – оксид. $d=80$ нм.

При встраивании одновременно нескольких локальных зарядов в оксидном слое МДП транзистора, важной задачей является определение разрешающей способности емкостного метода используемого для детектирования этих зарядов. В связи с этим, с помощью двумерного моделирования, исследовалось влияние на вольтфарадную характеристику бокового перехода исток-подложка двух локальных зарядов расположенных на различных расстояниях L от истока в нитридном слое транзистора металл-нитрид-оксид-полупроводник. В рассматриваемом транзисторе длина поликремниевого затвора составляет 800 нм, толщина SiO_2 и нитридного слоя составляют соответственно 3 и 50 нм. Концентрация акцепторов в р-подложке равна 10^{16} см^{-3} , а концентрация доноров в n-областях истока и стока взята равной 10^{20} см^{-3} . Плотность заряда в локализованной области и длина этой области взяты равными $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и 80 нм соответственно. Моделирование проводилось с помощью программы TCAD Sentaurus. Для проведения моделирования в нитридный слой одновременно встраивались два локальных заряда на различных расстояниях от истока L_1 и L_2 соответственно. Рассматривалось одновременное влияние этих двух

зарядов на вольтфарадную характеристику бокового перехода исток-подложка. Для более ясной визуальности можно рассмотреть зависимость производной изменения емкости по напряжению $d(\Delta C)/dV$ от прилагаемого напряжения смещения (рис.9).

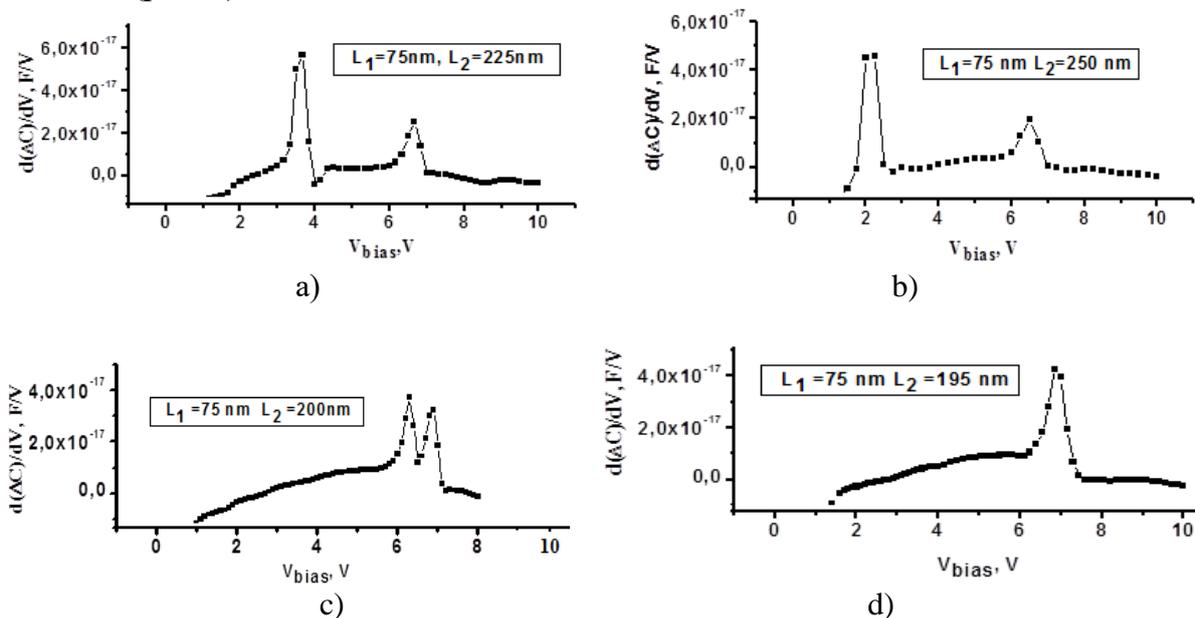


Рис. 9 Взаимные расположения пиков $d(\Delta C)/dV$ при одновременном встраивании двух локальных зарядов в нитридном слое на различных расстояниях от истока.
 а) $L_1=75 \text{ nm}$ $L_2=250 \text{ nm}$, б) $L_1=75 \text{ nm}$ $L_2=225 \text{ nm}$ в) $L_1=75 \text{ nm}$ $L_2=200 \text{ nm}$ д) $L_1=75 \text{ nm}$ $L_2=195 \text{ nm}$

Из результатов видно, что при длине локальных зарядов 80 нм и плотности $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ влияние этих двух локальных зарядов может быть разрешено в зависимости $d(\Delta C)/dV$ от напряжения. И видно, что наименьшее расстояние между локальными зарядами которое может быть разрешено составляет 120-125 нм.

Рассматривалось также влияние локального заряда, встроенного в диэлектрический слой, на емкость бокового перехода наноразмерного транзистора металл-оксид-полупроводник. Особенность этого влияния заключается в том, что в таких транзисторах изменение емкости боковых переходов, под действием локального заряда в оксидном слое, наблюдаются в основном при малых напряжениях смещения (Рис.10). Это явление связано с сравнительно большим искривлением части границы бокового перехода находящегося в контакте с каналом и соответственно емкости связанной с ним, чем искривление частей границы не контактирующей с каналом и нижней границы (и соответственно связанных с ними емкостей C_{swb} и C_{bw}) при малых напряжениях смещения, чем при больших.

В диссертационной работе, с помощью моделирования, изучалась возможность использования метода боковых емкостей для оценки распределения инжектированных в диэлектрический слой и захваченных на границе горячих носителей в наноразмерном МОП транзисторе. С помощью моделирования изучались также $C-V$ зависимости для барьерной емкости перехода сток-подложка при распределениях встроенного вдоль канала заряда приведенных на рис. 11. В этих случаях также изменения емкости наблюдаются

при малых смещениях. И это явление объясняется, в основном, изменениями части границы бокового перехода находящегося в контакте с каналом.

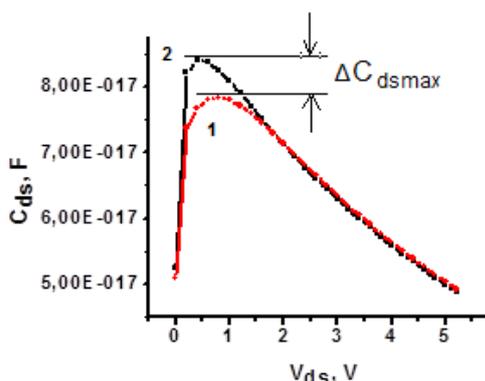


Рис.10 Изменение емкости бокового перехода под действием локального заряда в оксидном слое в нанометровых планарных транзисторах МОЯ

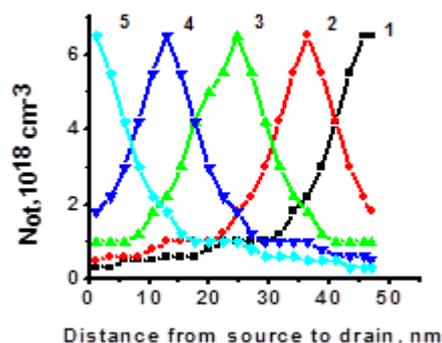


Рис.11 Рассмотренные при моделировании распределения концентрации инжектированного заряда, встроенного в оксидный слой вдоль канала от истока в направлении стока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов полученных путём моделирования и теоретического анализа влияния на характеристики планарного транзистора металл-диэлектрик-полупроводник с изолированным затвором, неравномерно распределенного заряда, который может быть захвачен в диэлектрическом слое в результате различных воздействий, сделаны следующие выводы:

1. Найдено, что пороговое напряжение n-МОП транзистора увеличивается с удалением локального заряда введенного в оксидный слой от истока вдоль канала. Основной причиной этого является увеличение концентрации основных носителей в центре канала около поверхности полупроводника.

2. Показано, что удаление вдоль канала от истока локального заряда введенного в нитридный слой МНОП транзистора приводит к увеличению тока утечки перехода исток-подложка I_{sb} . Наблюдаемое увеличение тока утечки объясняется уменьшением ширины обеднённой области перехода исток-подложка под действием локального заряда.

3. Показано, что при введении локального заряда в нитридный слой МНОП транзистора в вольтфарадной характеристике перехода исток-подложка, при определенном значении напряжения V_{jump} , наблюдается скачок ёмкости и определено, что начиная с значения напряжения V_{jump} при уровне легирования подложки $N_{sub} \leq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ наблюдается скачкообразное увеличение, а при $N_{sub} > 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ скачкообразное уменьшение ёмкости.

4. Из результатов моделирования влияния локального заряда введенного в нитридный слой МНОП транзистора на разных расстояниях от истока и различной длины показано, что V_{jump} зависит от положения и длины локального заряда d и монотонно увеличивается с увеличением d .

5. Показано, что напряжение V_{jump} монотонно уменьшается с увеличением расстояния L от истока локального заряда, введенного в нитридный слой, и на границе нитрид-оксид планарного МНОП транзистора.

6. Наблюдается увеличение и достижение насыщения амплитуды зависимости производной $d(\Delta C)/dV$ от напряжения, отражающего влияние локального заряда в диэлектрическом слое на ёмкость бокового перехода, с увеличением размеров локального заряда, введенного в диэлектрический слой. Этот эффект объясняется усилением поля локального заряда, вызванного увеличением его количества, влияющего на концентрацию носителей на поверхности и, в свою очередь, приводящего к перераспределению концентрации носителей.

7. Наблюдается, что встраивание локального заряда в подзатворном оксидном слое около стока и увеличение его линейного размера d в нанометровом МОП транзисторе приводит к линейному увеличению изменения ёмкости бокового перехода ΔC_{ssmax} , достижению его насыщения при удлинении до середины канала, и резкому увеличению изменения ёмкости с дальнейшим увеличением линейного размера d заряженной области. Показано, что при полном покрытии оксидного слоя от стока до истока заряженной областью величины ΔC_{dsmax} и ΔC_{ssmax} становятся равными.

8. Результаты моделирования показывают, что отношение ёмкостей боковых переходов исток-подложка и сток-подложка зависит от положения максимума распределения заряда, встроенного в оксидном слое. При локализации максимума распределения встроенного заряда в истоковой стороне относительно центра канала $C_{sbt} / C_{dbt} > 1$, а при локализации в стоковой стороне $C_{sbt} / C_{dbt} < 1$. Значение $C_{sbt} / C_{dbt} = 1$ соответствует локализации амплитуды распределения в центре канала.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING ACADEMIC DEGREES
DSc02/27.02.2020.FM/T.110.01 AT PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE
ACADEMY SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**

URGANCH STATE UNIVERSITY

ATAMURATOVA ZUKHRA ATABEKOBNA

**SIMULATION OF INFLUENCE OF NONUNIFORM DISTRIBUTION OF
THE CHARGE TRAPPED IN DIELECTRIC LAYER AND AT DIELECTRIC-
SEMICONDUCTOR INTERFACE TO CHARACTERISTICS OF MOSFET**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2023

The theme of the Philosophy doctor dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2021.2.PhD/FM614.

The dissertation has been carried out at the Urganch State University.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.fti.uz and on the website of «ZiyoNet» Information and Educational Portal at www.ziyo.net.uz.

Scientific consultant: **Yusupov Ahmed**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents: **Karimov Ibroxim Nabievich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Yodgorova Dilbara Mustafaevna
Doctor of Technical Sciences, professor

Leading organisation: Tashkent technical University

The defense of the doctoral dissertation will be held on «_____» _____ 2023, at _____ at the meeting of the Scientific Council No. DSc02/27.02.2020.FM/T.110.01 at the Scientific Research Physical and technical institute of the Academy sciences of the Republic of Uzbekistan (Address: 2B Chingiz Aytmatov str., 100084 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 235-93-61, fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net)

The dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under №.____). Address: 2B Chingiz Aytmatov str., 100084 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 235-93-61, e-mail: ftikans@uzsci.net

The abstract of the dissertation was distributed on «_____» _____ 2023.

(Registry record No. _____ dated «_____» _____ 2023).

Kh. K. Olimov

Chairman of the Scientific Council for the award of academic degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

J. S. Akhatov

Scientific Secretary of the Scientific Council for the award of scientific degrees, Doctor of technical sciences

Sh. N. Usmonov

Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, Doctor of Physics and Mathematics

INTRODUCTION (abstract of doctor of philosophy dissertation)

Relevance and relevance of the dissertation themes. At present, the study of the properties of metall-dielectric-semiconductor (MDS) transistors attracts the attention of the world's scientific community. The study of the influence of various external influences on the characteristics and properties of the dielectric-semiconductor interface of MIS devices of micrometer and nanometer sizes is an urgent task of modern semiconductor nanoelectronics. Of these, among the most urgent problems, one can note the study of the effect of ionizing radiation, electric field, charge injection on the dielectric-semiconductor interface of micro and nanoscale metal-insulator-semiconductor structures. Along with radiation resistance, the importance of problems of this type is associated with the development of stable, reliable and resistant to electrical stress transistors.

The relevance of studying the effects of various external influences on metal-oxide-semiconductor (MOS) structures and transistors based on it is associated with the lack of full understanding of the mechanisms of such influences. In particular, the mechanisms of influence on the stability and functional reliability of the parameters and characteristics of submicrometer and nanometer MOS transistors of a local charge embedded under the influence of various reasons into the oxide layer and at the dielectric-semiconductor interface have not been fully determined. From this point of view, one of the important tasks is the improvement of methods for monitoring defects at the dielectric-semiconductor interface and studying the distribution of charges near the interface.

In our Republic, much attention is paid to the development of science, in particular, special attention is paid to the development of the physics of semiconductor devices and the electronic industry. In this regard, scientists of the republic have obtained important results in obtaining new semiconductor materials, various structures based on them, and in studying the influence of various external influences on their characteristics. The action strategy for the further development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021 specifies the tasks of stimulating research and innovation activities, the widespread introduction of energy-saving technologies into production, and the expansion of the use of renewable energy sources. In this aspect, one of the important tasks is the development of new materials of electronic engineering and structures based on them, resistant to various influences and effective methods for controlling their parameters.

This dissertation research to a certain extent serves to implement the tasks outlined in the resolutions of the President of the Republic of Uzbekistan PP-4348 "On additional measures to create favorable conditions for the further development of the electrical industry and increase the investment and export potential of the industry" dated May 30, 2019, PP-3855 " On additional measures to improve the efficiency of commercialization of the results of scientific and scientific and technical activities" dated July 14, 2018 and PP-2789 "On measures to further improve the activities of the Academy of Sciences, organization, management and financing of research activities" dated February 17, 2017, as well as in other legal documents related to this area.

The aim of the dissertation work the effect of changes in the channel shape, geometric dimensions, which can occur as a result of technological fluctuations, on the characteristics, short-channel effects and random telegraph noise of nanoscale vertical isolated three-gate junctionless field-effect transistors based on silicon-on-insulator technology.

Research objectives: Develop physical models in the TCAD Sentaurus program for modeling the characteristics of MNOS and MOS transistor structures;

Study of the influence of the local charge of the MNOS transistor built into the nitride layer on the capacitance-voltage characteristics of the side source-base junction;

study of the influence of the local charge of the nanosized MOS transistor built into the oxide layer on the capacitance of the side junctions;

study of the influence of the local charge of the MNOS transistor built into the nitride layer on the current-voltage characteristics of the side source-base junction;

Investigation of the effect of two local charges simultaneously embedded in the nitride layer of the MNOS transistor on the capacitance-voltage characteristics of the side source-base junction.

The object of research are metal-oxide-semiconductor and metal-nitride-oxide-semiconductor transistors.

The subject of research is the processes of influence on the current-voltage and capacitance-voltage characteristics of the side transitions of the MOS transistor of a charge unevenly embedded in the dielectric layer and at the dielectric-semiconductor interface under the influence of various influences.

Research methods. In the study, methods of numerical computer modeling and theoretical and analytical calculations of electronic processes of electronic transport were applied. When modeling the current-voltage characteristics, an isothermal diffusion-drift model was used and the concentration dependence of the mobility and saturation of the carrier velocity at high fields were taken into account. When modeling the capacitance-voltage characteristics, the weak variable signal method was used.

The scientific novelty of the research; revealing the influence of the position and linear size of the local charge built into the dielectric layer on the threshold voltage of the MOS transistor;

study of the influence of the substrate doping degree, the linear size of the local charge built into the nitride layer and its position along the channel on the capacitance-voltage characteristic of the source-substrate lateral transition of a metal-nitride-oxide-semiconductor transistor;

revealing the dependence of the voltage corresponding to the capacitance jump in the capacitance-voltage characteristic of the lateral source-substrate transition, caused by a local charge built into the nitride layer of the metal-nitride-oxide-semiconductor transistor, on the linear size and position of the local charge along the channel;

study of the capacitance-voltage characteristic of the lateral transition of a metal-nitride-oxide-semiconductor transistor with the simultaneous incorporation of two local charges in the nitride layer;

studying the dependence of the maximum change in the capacitance of the drain-substrate junction, caused by the action of the local charge built into the oxide layer, on the linear size and position of the local charge along the channel of the nanometer MOS transistor;

study of the influence of a local charge built in a dielectric layer on the drain current and current-voltage characteristics of a metal-nitride-oxide-semiconductor transistor and a MOS transistor.

Implementation of research results.

The results obtained when modeling the influence of a local charge built in a dielectric layer at different distances from the source, with different sizes and different distribution along the channel, on various characteristics and parameters of a planar metal-dielectric-semiconductor insulated gate transistor were used in the following research works:

The results obtained when modeling the effect of the charge built-in due to various electrical stresses in the oxide layer on the characteristics of the side transitions of the MIS transistor were used in the projects «Hardware and software for high-level calculations» and «Solving new problems in high-level calculations» in the Department of Computer Architecture of the University of Santiago De Compostella of Spain in modeling advanced field-effect transistors (Certificate of the Director of Computer Architecture dated July 28, 2022). The use of scientific results made it possible to simulate the degradation of nanoscale field-effect transistors, in particular, planar field-effect transistors caused by electrical stress.

Approbation of research results. The results of this study were discussed at the seminars of the Urgench State University, and reported at 3 international and 8 republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. 17 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, of which 6 articles are in scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations and which fully reflect the content of the dissertation, 3 articles in foreign and 2 article in republican scientific journals.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of cited literature, 1 appendix, 108 pages of the main text, including 58 figures and 2 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Atamuratova Z.A., Yusupov Ahmed, Jean Chamberlain Chedjou, Kyandoghere Kyamakwa . Capacitance Method for Identifying Degradation due to Electrical Stress in MOSFETs//e-Journal of Surface Science and Nanotechnology. 20, 7 June, pp. 202-206 (2022); doi:10.1380/ejsnt. 2022-034 (Scopus IF=1.200)

2. Atamuratov Atabek E., Yusupov Ahmed, Atamuratova Zukhra A., Jean Chamberlain Chedjou and Kyamakwa Kyandoghere. Lateral Capacitance–Voltage Method of NanoMOSFET for Detecting the Hot Carrier Injection. // Appl. Sci.pp.1-9, (2020), 10(21), 7935; doi:10.3390/app10217935. (Scopus IF= 2.679)

3. Atamuratova Z.A., Yusupov A., Khalikberdiev B.O., and Atamuratov A.E.. Anomalous Behavior of Lateral C–V Characteristic of an MNOS Transistor with an Embedded Local Charge in the Nitride Layer. // Technical Physics Letters, 2019, Vol. 64, No. 7, pp. 1006–1009. (Scopus IF=0.791)

4. Атамуратов А.Э., Атамуратова З.А., Юсупов А. Идентификация положения локального заряда в нитридном слое МНОП транзистора. // ДАН Руз, 2018, № 4, сс. 21-25. (01.00.00, №7)

5. Atamuratov A.E., Abdikarimov A., Atamuratova Z.A., Xolillaev M., Yusupov A. Influence of non-uniform lateral interface defects distribution to the current-voltage characteristic of mosfet.// Collection of papers (Urgench state university). Actual problems of modern science, education and training in the region. N1, 2017, pp. 8-12 (01.00.00, №10).

II бўлим (II часть, part II)

6. Атамуратова З. А. Идентификация деградации, обусловленной электрическим стрессом в моп транзисторах по поведению боковой ёмкости. // Материалы международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 7-8 апреля, сс. 121-123, 2022 г.)

7. Atamuratov A.E., Atamuratova Z.A., Yusupov A.. Capacitance method for estimation lateral distributions of hot carriers injected in the gate oxide of nanometer MOSFET. // IX International Scientific Conference. Actual Problems of Solid States Physics. Minsk, Belarus, 2021. 22-26, November, Book of Abstracts, p.83

8. Атамуратова З.А., Юсупов А., Атамуратов А.Э. Зависимость емкости бокового перехода сток-база от размера и положения локального заряда в оксидном слое МОП транзистора. // Сборник материалов международной онлайн конференции «Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения, перспективы», 15 Мая, 2020, Ташкент, сс.335-340.

9. Атамуратова З. А., Садуллаев С. Влияние линейных размеров локального нитридного заряда на боковую вольтфарадную характеристику МНОП транзистора. // ОЎМТВ микёсида ўтказилган «Ёш олимлар тадқиқотларида инновацион ғоялар ва технологиялар ўрни» анжумани материаллари, Ташкент, 27 апрель 2018 г. сс. 10-13.

10. Атамуратов А.Э., Атамуратова З.А., Жуманиязов М.Ю., Юсупов А. Моделирование боковой емкости МНОП транзистора с зарядом локализованным в нитридном слое. // «Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари» Республика илмий-амалий анжумани материаллари. Андижон, 2018 йил 20-21 апрель. б.40-42.

11. Атамуратова З.А., Юсупов А., Атамуратов А.Э. Аномальное поведение боковой вольт-фарадной характеристики МНОП транзистора при встраивании локального заряда в нитридный слой. // Материалы Республиканской конференции Роль одаренной молодежи в развитии физики, 11-12 май 2018. г.Ташкент.с.22-23

12. Атамуратов А.Э., Атамуратова З.А., Жуманиязов М.Ю., Юсупов А. Метод идентификации латерального положения локального заряда в нитридном слое МНОП транзистора. // Материалы IV Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах, 25-26 мая, 2018 г. Фергана, сс. 309-311

13. Атамуратова З.А., Нуруллаев Н., Атамуратов А.Э. Влияние локального заряда встроенного в нитридном слое МНОП транзистора на ток утечки перехода исток-база. // Сборник материалов международной конференции «Перспективы интенсивного подхода к инновационному развитию», Наманган, 10-11 июля 2018 г. сс. 220-222.

14. Атамуратова З.А., Юсупов А., Нуруллаев Ш. Н., Садуллаев С., Атамуратов А.Э. Влияние локального заряда встроенного в нитридном слое МНОП транзистора с различным уровнем легирования базы на ток утечки перехода исток-база. // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Инновационные технологии в науке и образовании» 20-21 ноября 2018 года, сс.85-87.

15. Matyakubov N., Atamuratova Z. A., Abdikarimov A., Halillaev M., Atamuratov A.E. The method of estimation of single trapped charge position in nanometer MNOSFET oxide layer and Si-SiO₂ interface. // Materials of International conference Fundamental and Applied Problems of Physics November 14-16, 2013, Tashkent, pp. 85 -87.

16. Atamuratov A.E., Granzner R., Kittler M., Atamuratova Z., Halillaev M., Schwierz F.. Simulation of Random Telegraph Noise in nanometr nMOSFET induced by interface and oxide trapped charge. // NATO Advanced Research Workshop on Low Dimensional Functional Materials, October 15-19, 2012, pp. 17-20, Tashkent.

17. Atamuratov A.E., Atamuratova Z., Halillaev M., Ghione G.. Simulation of carrier distribution in nanometr MNOSFET with single charge trapped in oxide and at SiO₂-Si₃N₄ interface. Materials of International conference Low dimensional nanoscale systems: quantum effects, particle transport and advanced materials. November 6-7, 2012, Tashkent.

18. Атамуратов А.Э., Абдикаримов А.Э. Халиллоев М.М., Атамуратова З.А. Майдоний транзисторлар диэлектрик қатламига локал заряд киритилган ҳолда ён вольт-фарад характери-касида сакраш кучланишини ҳисоблаш учун ЭҲМ дастури патент гувоҳнома // Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлиги «Расмий ахборотнома» блотени. DGU 06238.Ташкент 12.04.2019 йил.

19. Атамуратов А.Э., Абдикаримов А.Э. Халиллоев М.М., Атамуратова З.А. Изоляцияланган затворли майдоний транзисторларда диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги холатлар зичлигини чегарадаги зарядланган нуксонлар ҳисобига ўзгаришини ҳисоблаш учун ЭҲМ дастури // Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлиги «Расмий ахборотнома» бютени. Ташкент, DGU 06277. 12.04.2019 йил.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«Тил ва адабиёт таълими» таҳририясида таҳрирдан ўтказилди.
(06. 04.2023 йил)

Босишга рухсат этилди: _____ 2023 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 4. Адади: 100. Буюртма: № _____.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68.

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.