

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ ФИЗИКА-
ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР
БЕРУВЧИ DSc.02/27.02.2020.FM/Т.110.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**
УРГАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ХАЛИЛЛОЕВ МАҲКАМ МУХАММАДШАРИФОВИЧ

**ЎТИШСИЗ НАНОЎЛЧАМЛИ МАЙДОНИЙ ТРАНЗИСТОРЛАРНИНГ
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА ТЕХНОЛОГИК
ФЛУКТУАЦИЯЛАРНИНГ ТАЪСИРИНИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2022

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

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

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

Халиллоев Маҳкам Мухаммадшарифович

Ўтишсиз наноўлчамли майдоний транзисторларнинг
характеристикаларига технологик флуктуацияларнинг таъсирини
моделлаштириш..... 3

Халиллоев Маҳкам Мухаммадшарифович

Моделирование влияния технологических флуктуаций на
характеристики безпереходного наноразмерного полевого транзистора 18

Khalilloev Mahkam Muxammadsharifovich

Simulation of influence of technological fluctuations to characteristics of
nanometer junctionless field effect transistors..... 33

Эълон қилинган илмий ишлар рўйхати

Список опубликованных научных работ
List of published research works 38

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ ФИЗИКА-
ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР
БЕРУВЧИ DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**
УРГАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ХАЛИЛЛОЕВ МАҲКАМ МУХАММАДШАРИФОВИЧ

**ЎТИШСИЗ НАНОЎЛЧАМЛИ МАЙДОНИЙ ТРАНЗИСТОРЛАРНИНГ
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА ТЕХНОЛОГИК
ФЛУКТУАЦИЯЛАРНИНГ ТАЪСИРИНИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2022

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.1.PhD/FM201 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси 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.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Атамуратов Атабек Эгамбердиевич
физика-математика фанлари доктори, доцент

Расмий оппонентлар:

Каримов Иброхим Набиевич
физика-математика фанлари доктори, проф

Ёдгорова Дилбара Мустафаевна
техника фанлари доктори, проф

Етакчи ташкилот:

Тошкент ахборот технологиялари университети

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Физика-техника институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/27.02.2020.FM/Т.110.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 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 2022 йил «___» _____ кунни тарқатилди. (2022 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 фан, техника ва технологияларнинг, жумладан электрониканинг ривожланиши кундан кунга жадаллашиб бормоқда. Бу ўз навбатида электроникада қўлланиладиган элементларга қўйиладиган талабларни кучайишига олиб келмоқда. Улар ичида энг асосийлари қаторига уларнинг энергия тежамкорлик даражасини, тезчанлигини ва функционаллигини ошириш киради. Қўйилган талабларни амалга ошириш электрон қурилмаларни ташкил этувчи элементларни ўлчамларини наноўлчамларга етказиш билан тўғридан тўғри боғлиқдир. Ҳозирги вақтда электрон қурилмаларнинг асосий элементлари қаторига изоляцияланган затворли металл-оксид-яримўтказгич (МОЯ) майдоний транзисторлар ҳам киради. МОЯ транзисторлар ўлчамларини наномасштабларга етказиб, улар асосидаги интеграл схемаларнинг интеграция даражасини ошириш ва энергия истеъмолини камайтиришга эришиш мумкин. Шу сабабли наноўлчамли МОЯ тузилмалар ва улар асосидаги транзисторлар хоссаларини ўрганиш ҳозирги замон яримўтказгичлар физикасининг долзарб вазифаларидан ҳисобланади.

Дунёда бугунги кунда МОЯ транзисторлар, ўлчамларини наноўлчамларга етказганда юзага келадиган турли деградацион эффектларнинг транзистор характеристикаларига таъсирини очиб беришга катта эътибор қаратилмоқда. Шу сабабли МОЯ транзистор, жумладан вертикал ўтишсиз МОЯ транзистор (JL FinFET) геометрик ўлчамларининг тасодифий ўзгаришларининг транзистор электрофизик параметрларига, характеристикаларига, қисқа каналли эффектларга таъсири қонуниятларини аниқлаш яримўтказгичли асбоблар физикасининг муҳим вазифаларидан бири ҳисобланади. Нанометр ўлчамлардаги, жумладан вертикал ўтишсиз МОЯ транзисторлардаги салбий эффектлардан бири бу тасодифий телеграф шовқинидир. Тасодифий телеграф шовқини амплитудасини ўрганиш билан боғлиқ ишларнинг аксарияти планар МОЯ транзисторларга бағишланган. Аммо уч затворли транзисторлар, хусуан ўтишсиз FinFET транзисторларда ТТШ амплитудаси, деярлик ўрганилмаган.

Республикамизда илм-фан ривожига, жумладан яримўтказгичли асбоблар физикаси ва электроника соҳасини ривожлантиришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада мамлакатимиз олимлари томонидан янги яримўтказгич материаллар, улар асосида турли тузилмалар олиш ва уларнинг характеристикаларига ташқи омиллар таъсирларини ўрганиш бўйича муҳим натижалар олинган. Ўзбекистон Республикасини 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан “Иқтисодий электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда “Яшил иқтисодий” технологияларини барча соҳаларга фаол жорий этиш, иқтисодийнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш”¹ бўйича

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тарққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони.

вазифалар белгиланган. Бу борада турли ташки таъсирларга чидамли янги электрон техника материаллари ва улар асосидаги тузилмаларни ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг параметрларини назорат қилишнинг самарали усуллари 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-сонли «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисидаги» қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга мазкур диссертация тадқиқоти маълум даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг 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. Шу кунга қадар изоляцияланган уч затворли вертикал ўтишсиз майдоний транзисторлар турли тузилишлари, унинг характеристика ва параметрларига технологик флукутацияларнинг, қисқа каналли эффектларнинг деградацион таъсирларини ўрганиш билан боғлиқ тадқиқотларда асосан қисқа канал эффектларнинг транзистор тузилишига боғланиши, канал шаклининг транзистор турли электрофизик параметрларига таъсирини ўрганиш билан чекланган, ва транзисторни турли қатлам ўлчамларининг ва канал шаклини қисқа каналли эффектларга таъсири деярлик ўрганилмаган. Япония олимлари D.Hisamoto, T.Kaga, Y.Kawamoto ва E.Takeda томонидан наноўлчамларда изоляцияланган затворли майдоний транзисторларда қисқа каналли эффектлар таъсирини камайтириш учун планар тузилишга эга бўлган транзистор ўрнига янги вертикал тузилишли майдоний транзистор таклиф қилинган. Бу вертикал транзисторларнинг технологиясини янада соддалаштириш мақсадида Ирландия олимлари J.P. Colinge ва ҳамкасблари томонидан таклиф қилинган янги тузилишдаги транзистор уч затворли бўлиб, унда исток-канал ва сток-канал ўтишлари мавжуд эмас. Корея Республикаси университети олимлари So Jeong Park, Dae-Young Jeon, Gu-Taе Kim вертикал ўтишсиз майдоний транзистор канал шаклининг ва легирланиш даражасининг транзистор характеристикаларига таъсирини ўрганганлар. Хитойнинг Ханджоу Дианжи университети олимлари Wei-Feng Lü, Liang Dai ўтишсиз майдоний транзисторлар характеристикаларига затвор материалининг чиқиш ишининг таъсири кўриб чиқилган ва аналог схемаларда қўллашдаши таъсири ўрганилган. Буюк Британиянинг Глазго

университети олимлари А. Asenov ва ҳамкасблари томонидан вертикал ўтишсиз майдоний транзистордаги тасодифий телеграф шовқини ўрганилиб бошқа турдош транзисторлардаги шовқинлар билан таққосланган. Украинанинг яримўтказгичлар физикаси институти олимлари томонидан кўп затворли ўтишсиз майдоний транзистор характеристикаларини аккумуляция режимида ишлайдиган транзисторлар характеристикалари билан таққосланган. Аммо изоляцияланган уч затворли ўтишсиз вертикал транзисторнинг вольт-ампер характеристикаларига, қисқа каналли эффектларига канал шаклининг, турли қатламларининг геометрик ўлчамларининг, оксид-яримўтказгич чегараси ва оксид қатламида қамралган якка заряднинг таъсири деярлик ўрганилмаган.

Ўзбекистон олимлари С.З. Зайнабидинов, С.И.Власов, И.Н.Каримов, Х.С.Далиев, А.Юсупов, А. Атамуратов ва бошқалар томонидан ҳам майдоний изоляцияланган затворли тузилмалар ва транзисторлар характеристикалари ўрганилган. Жумладан, С.И. Власов томонидан МОЯ тузилмалардаги оксид-яримўтказгич чегараси хоссаларини ўрганиш учун такомиллаштирилган С-V усуллар модификацияланган, С.З. Зайнабидинов ва И.Н. Каримовлар томонидан МДЯ тузилмалар чегара ҳолатларига турли ташқи омиллар таъсири ўрганилган, Х.С. Далиев томонидан МДЯ структуралар характеристикаларига турли ишлов бериш технологиялари таъсири аниқланган. А. Э. Атамуратов ва А. Юсупов томонларидан МДЯ транзисторлар хоссаларига диэлектрик қатламига киритилган локал зарядларнинг таъсири моделлаштирилган. Аммо бу ишларда наноўлчамдаги кўпзатворли вертикал ўтишсиз майдоний транзисторлар характеристика ва параметрлари ва уларга транзисторнинг технологик флуктуациялари, жумладан канал шаклининг таъсири ва тасодифий телеграф шовқини ўрганилмаган.

Вертикал майдоний изоляцияланган кўп затворли ўтишсиз транзисторларда қисқа каналли эффектларни ўрганиш бўйича тадқиқотлар сони кўп эканлигига қарамадан, ҳозирги кунгача қисқа каналли эффектларга, тасодифий телеграф шовқинга транзистор канал шаклининг, транзистор турли қатламларининг геометрик ўлчамларининг таъсири тизимли ўрганилмаган. Вертикал майдоний ўтишсиз транзистор оксид-яримўтказгич чегарасида ёки оксид қатламида қамралган якка заряднинг ток токига таъсирини ўрганиш бўйича тадқиқотлар эса жуда кам.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Урганч давлат университетининг илмий-тадқиқотлар режасига мувофиқ №ОТ-Ф2-67 «Диэлектрик яримўтказгич чегарасидаги нуқсонлар табиати ва ён томон бўйлаб тақсимотини тадқиқ қилиш усулига янгича ёндашиш» (2017-2020 й.й.) фундаментал лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади наноўлчамли изоляцияланган уч затворли, изолятор устида кремний технологияси асосидаги вертикал ўтишсиз майдоний транзистор характеристикаларига, ундаги қисқа каналли

эфектларга ва тасодифий телеграф шовкинга технологик флуктациялар натижасида вужудга келадиган транзистор шакли ва геометрик ўлчамларидаги ўзгаришларнинг таъсирини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

Моделлаштириш ва назарий ҳисоблашлар орқали наноўлчамли изоляцияланган уч затворли, изолятор устида кремний технологияси асосидаги вертикал ўтишсиз майдоний транзисторда:

канал шакли ўзгаришининг транзистордаги қисқа каналли эфектларга таъсирини аниқлаш;

канал шакли турли бўлган ҳоллар учун транзистор затворининг ён томонга кенгайишининг сток томонидан тўсиқ камайиши эфекти ва бўсагадан паст ўтиш характеристикаси қиялигига таъсирини ойдинлаштириш;

канал кўндаланг кесим шакли тўғри тўртбурчак бўлган ҳолда канал ости оксид қатлами геометрик ўлчамларининг қисқа каналли эфектларга таъсирини моделлаштириш;

затвор ости оксид қатлами ва оксид-яримўтказгич чегарасида қамралган зарядланган якка нуқсонни моделлаштириш;

канал шакли ўзгаришининг тасодифий телеграф шовкин амплитудасига таъсирини ойдинлаштириш.

Тадқиқотнинг объекти изолятор устида кремний технологияси асосидаги вертикал уч затворли ўтишсиз майдоний транзисторлардан иборат.

Тадқиқотнинг предмети вертикал изоляцияланган уч затворли ўтишсиз майдоний транзисторларда қисқа каналли эфектлар, оксид-яримўтказгич қатламлари чегарасида ҳамда оксид қатламида қамралган якка зарядланган нуқсонларнинг сток токига таъсири ва тасодифий телеграф шовкин жараёнларини ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқотда электрон транспорти жараёнларини компьютерда сонли моделлаштириш ҳамда назарий-аналитик ҳисоблаш усулларида фойдаланилган. 3D моделлаштиришда изотермик диффузион-дрейф транспорт модели қўлланилиб, ташувчилар ҳаракатчанлигининг концентрацияга боғлиқлиги ва кучли майдонда тезлигининг тўйиниши эътиборга олинган. Кўрилаётган транзистор ўлчамлари наноўлчамларда бўлганлиги сабабли квант эфектларни эътиборга олиш учун зичлик градиенти квант коррективкаси қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

нанометр ўлчамлардаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги уч затворли ўтишсиз вертикал МОЯ транзистор канали юқори қисми кенлиги W_t нинг 0 дан 5 нм гача ортишида канал кесими учбурчак шаклдан тўртбурчак шаклга ўзгаришида, канал бўйлаб заряд ташувчилар учун потенциал барьер камайиши ҳисобига транзистор бўсага кучланишининг монотон равишда камайиши, DIBL эфекти ва бўсагадан паст ўтиш вольт ампер характеристикасининг қиялигининг эса монотон ортиши аниқланган;

нанометр ўлчамлардаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги уч затворли ўтишсиз вертикал МОЯ транзисторда барча канал шаклларида бўсаға кучланишининг затвор ён томон кенглигининг 0 дан 2 нм қийматлари оралиғида камайиб ундан юқори қийматларда тўйинишга эришиб деярли ўзгармасдан қолиши кўрсатилиб, бўсаға кучланишининг ушбу хусусияти затвор-исток (затвор-сток) оралиғидаги сиғимнинг затвор ён кенглигига боғлиқлик қонуниятидан келиб чиқиши аниқланган;

изоляцияланган уч затворли ўтишсиз вертикал МОЯ транзистор канал ости оксид қатлами ва затвор ён томон кенгликлари бир хил ортиб боришларида, DIBL эффект ва SS ларининг затвор ён томон кенгайиши 0 дан 3 нм гача оралиғида ортиши асосан затвор-исток (затвор-сток) оралиғидаги сиғимларининг ортиши билан ва затвор ён томон кенглигининг 3 нм дан каттароқ қийматларида камайиб тўйинишга эришиши исток-база (сток-база) ва затвор-база сиғимларининг камайиши билан боғлиқ эканлиги кузатилган;

тасодифий телеграф шовқинни ўрганиш учун ўтишсиз изолятор устида кремний технологияси асосидаги наноўлчамли FinFET транзистор оксид қатламида ёки оксид-яримўтказгич чегарасида қамралган якка нуқсон модели шакллантирилди ҳамда қамралган якка заряд томонидан генерацияланган тасодифий телеграф шовқин амплитудаси заряд соҳасининг шаклига ва 0.1 нм дан 0.5 нм гача чизиқли ўлчамлари соҳасида, заряд фазовий тақсимотига ва ўлчамларига деярлик боғлиқ эмаслиги аниқланган;

тасодифий телеграф шовқини амплитудаси канал шаклига, шунингдек қамралган якка заряднинг канал бўйлаб вазиятига боғлиқ эканлиги аниқланди, бунда қамралган якка заряд каналнинг ён сирт чегарасида жойлашганда, канал кўндаланг кесими учбурчак бўлган шаклда ТТШ амплитудаси қийматлари энг кичик, тўртбурчак ва трапеция кесим шаклларида эса юқори қийматларга эга эканлиги кўрсатилди ҳамда якка заряд каналнинг юқори сиртида қамралганда, генерацияланган ТТШ амплитудаси канал кўндаланг кесим шакли тўғри тўртбурчак ҳолда трапеция шаклли ҳолга нисбатан юқори бўлиши ва бу каналда токнинг максимал зичлиги нуқтаси ва қамралган якка заряд ўртасидаги масофа билан боғлиқ эканлиги аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Изолятор устида кремний технологияси асосидаги наноўлчамли вертикал изоляцияланган уч затворли ўтишсиз майдоний транзисторда DIBL эффектнинг канал шаклига, затвор ости оксид қатлами қалинлигига, затворнинг кенглигига боғлиқликлари аниқланиб, амалиётда бундай транзисторларни турли интеграл схемаларда қўллашда кучли деградацияга учрамайдиган оптимал геометрик ўлчамлар ва электрофизик параметрларини аниқлашга имкон бериши кўрсатилган;

Нанометр ўлчамдаги изоляцияланган затворли ўтишсиз майдоний транзисторда бўсағадан паст ўтиш вольт-ампер характеристикасининг қиялиги SS ни транзистор канал шаклига, затвор ости оксид қатлами қалинлигига, затворнинг кенглигига боғлиқликлари турли калитли ва аналог

схемаларида транзисторларни қўллашда деградацияга кам учрайдиган оптимал геометрик ўлчамларини ва электрофизик параметрларини аниқлаш имконини бериши кўрсатилган;

Наноўлчамдаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги ўтишсиз изоляцияланган уч затворли МОЯ транзисторда оксид-яримўтказгич чегарасидаги якка нуқсонда қамралган заряднинг ток токига таъсири бўйича олинган натижалар оксид-яримўтказгич чегарасидаги нуқсонларни мавжудлигини тасодифий телеграф шовқин амплитудасини ўлчаш орқали экспресс усул билан аниқлаш мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги моделлаштиришда стандарт TCAD Sentaurus дастурлардан фойдаланилганлиги ва қўлланилган физик моделлар даврий нашрларда эълон қилинган тажрибалар натижалари асосида калибровка қилинганлиги ҳамда яримўтказгичлар назарий физикасининг тан олинган қонунлари, замонавий ёндашишларидан фойдаланилганлиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти наноўлчамдаги изоляцияланган затворли ўтишсиз МОЯ транзисторларни олиш технологик жараёнларида юзага келадиган ўлчамларнинг флуктуациясининг транзистор характеристикаларига, қисқа каналли эффектларга ва тасодифий телеграф шовқинга таъсири тўғрисидаги янги тасаввурларнинг яратилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти, аниқланган DIBL эффекти ва SS нинг изоляцияланган затворли ўтишсиз МОЯ транзистор турли қисмларининг шакл ва ўлчамларига боғлиқлигидан ушбу наноўлчамли транзисторни олиш технологик жараёнларида оптимал шакл ва ўлчамлар танлашда, тасодифий телеграф шовқин амплитудасининг чегаравий якка нуқсон вазиятига боғлиқлигидан оксид-яримўтказгич қатламлар чегарасини экспресс диагностика қилишда фойдаланиш мумкинлиги билан белгиланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Наноўлчамли ўтишсиз FinFET транзисторнинг турли қисмларининг геометрик ўлчам, шаклларининг транзистор ўтиш характеристикаси, қисқа каналли эффектлар ва тасодифий телеграф шовқин амплитудасига таъсирини моделлаштириш асосида:

кўп қатламлардан ташкил топган, наноўлчамли яримўтказгич транзисторларда оксид-яримўтказгич чегарасидаги якка нуқсонларни моделлаштириш, яримўтказгич каналидаги потенциал тақсимоти, унинг турли қатламлар ўлчамлари билан боғланишлари ва вольт-ампер характеристикаларни олишда фойдаланилган квант коррективкалар тўғрисидаги илмий хулосаларидан “Ярим ўтказгичлар ва уларнинг наноструктураларида фотонли кинетик самараларнинг назарий тадқиқи” мавзусидаги фундаментал тадқиқот лойихасида кўп қатламли ўлчамли квантлашган яримўтказгичли структураларда фотонлар иштирокидаги кинетик ҳодисаларнинг назарий тадқиқларида ва натижаларнинг таҳлилларида қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2021 йил 19 - январдаги 89-03-286-сон

маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли структураларда ток ташувчиларнинг тунелли оқимларини ҳисоблаш имконини берган.

Наноўлчамли вертикал ўтишсиз уч затворли FinFET транзисторининг геометрик ўлчам ва шакли флуктуациясининг транзистор характеристикаларига таъсирини моделлаштириш бўйича олинган натижалар Испаниянинг Сантиаго де Компостелла университетининг Компьютер Архитектураси бўлимида бажарилган «Мукамал компьютер ҳисоблашларда юзага келадиган янги муаммолар ечимлари ва юқори мукамал компьютер ҳисоблашлар учун техникавий ва дастурий усуллар» лойиҳасида илгариланган майдоний транзисторларни моделлаштиришда қўлланилган (Компьютер Архитектураси бўлими директорининг 2021 йилдаги маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш наноўлчамдаги майдоний транзисторларни, хусусан вертикал ўтишсиз майдоний транзисторларнинг характеристикаларига ички параметрлар флуктуацияси таъсирини моделлаштириш 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 4 та халқаро ва 6 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, 4 та ҳорижий ва 1 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 110 саҳифалардан иборат бўлиб, таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 61 та расм, 4 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 «метал-оксид-яримўтказгич транзисторлар ривожланиши ва юзага келаётган муаммолар» деб номланган **биринчи боб**ида адабиётларда берилган маълумотлар таҳлили асосида Планар метал-оксид-яримўтказгич транзисторлар ривожланиш тарихи ва қонуниятлари ҳақида маълумотлар келтирилган. Наноўлчамли вертикал метал-оксид-яримўтказгич транзисторлар ва улар пайдо бўлишининг физик сабабларини ўрганиш бўйича кўплаб тадқиқотлар кўриб чиқилган. Наноўлчамли ўтишсиз метал-оксид-яримўтказгич транзистор хусусиятлари ва масштаблаштириш муаммолари таҳлил қилинган. Адабиётлар шарҳидан келиб чиққан ҳолда мавзунинг долзарблиги асосланган, диссертациянинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

«Наноўлчамдаги ўтишсиз вертикал метал-оксид-яримўтказгич транзистор характеристикалари, ундаги қисқа каналли эффектлар ва уларни ҳисоблаш усуллари» деб номланган **иккинчи боб**да қисқа каналли эффектлар тушунчаси таништирилган ва уларни ҳисоблаш усуллари берилган, моделлаштиришда қўлланилган транспорт ва ҳаракатчанлик моделлари кўриб ўтилган ва уларни калибровкалаш натижалари келтирилган.

Наноўлчамли транзисторларда кузатиладиган тасодифий телеграф шовқин тафсилоти ва уни ҳисоблаш услубиёти баён қилинган.

DIBL эффекти, таърифига асосан, стокга берилган кучланиш V_d бир бирликка ўзгарганда транзистор босаға кучланишининг ўзгаришини билдирадиган катталиқдир, яъни

$$DIBL = \frac{\Delta V_{th}}{\Delta V_d} = \frac{V_{th2}(V_{d2}) - V_{th1}(V_{d1})}{V_{d2} - V_{d1}}$$

бу ерда V_{d1} - сток ва исток соҳалари орасига берилган паст ток кучланиши, V_{d2} - сток ва исток соҳалари орасига берилган юқори ток кучланиши, $V_{th1}(V_{d1})$ - сток ва исток соҳалари орасига берилган паст ток кучланиши V_{d1} га мос ҳолатда олинган ўтиш графигидаги бўсаға кучланиши, $V_{th2}(V_{d2})$ - сток ва исток соҳалари орасига берилган юқори ток кучланиши V_{d2} га мос ҳолда олинган ўтиш графигидаги бўсаға кучланиши.

Қисқа канал эффектлари қаторига, DIBL эффектдан ташқари ўтиш характеристикаси тиклигининг камайиши ҳам киради. Одатда бундай қисқа

канал эффектини баҳолаш учун бўсагадан паст соҳадаги ўтиш вольт-ампер характеристикасининг тиклигига тескари бўлган катталиқ қаралади ва у SS (Subthreshold swing) деб белгиланади. SS катталиқ бўсага кучланишидан паст соҳанинг қиялиги бўлиб, уни ҳисоблаш формуласи қуйидагича:

$$SS = \frac{\Delta V_g}{\Delta \lg I_d} = \frac{V_{th} - (V_{th} - 0,2)}{\lg I_{th} - \lg I_{off}} = \frac{0,2}{\lg \left(\frac{I_{th}}{I_{off}} \right)} \quad \left[\frac{\text{мВ}}{\text{декада}} \right]$$

бу ерда ΔV_g - бўсага кучланиш V_{th} ва транзистор ёпиқ ҳолатига тўғри келади-ган затвор кучланиши орасидаги фарқ. Бизнинг ишда транзистор ёпиқ ҳолатига мос затвор кучланиши деб бўсага кучланишдан 200 мВ кичикроқ кучланиш олинган. $\Delta \lg I_d$ эса бўсага кучланишга тўғри келадиган бўсага токининг ўнлик лагарифими $\lg I_{th}$ билан транзистор ёпиқ ҳолатидаги токи лагарифми $\lg I_{off}$ орасидаги фарқ.

Наноўлчамли транзисторларни олиш технологик жараёнларида оксид қатламида ва оксид-яримўтказгич чегараларида якка нуқсонлар камралиши юзага келиши мумкин ва натижада улар сток токида тасодифий телеграф шовқинни (ТТШ) ҳосил қилиши мумкин. Диссертация ишида бундай шовқинлар амплитудасининг транзистор геометрик ўлчамлари ва канал шаклининг флуктуациясига боғлиқлиги ҳам моделлаштирилган. ТТШ амплитудаси сток токининг ўзгариши билан аниқланади. Ўлчашларда ТТШ амплитудаси стационар ҳолатда, яъни якка заряд оксиддаги (ёки диэлектрик яримўтказгич чегарадаги) нуқсонларда қамралган ҳолатда қуйидаги формула ёрдамида ҳисобланди

$$\text{ТТШ} = \frac{I - I_0}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0}$$

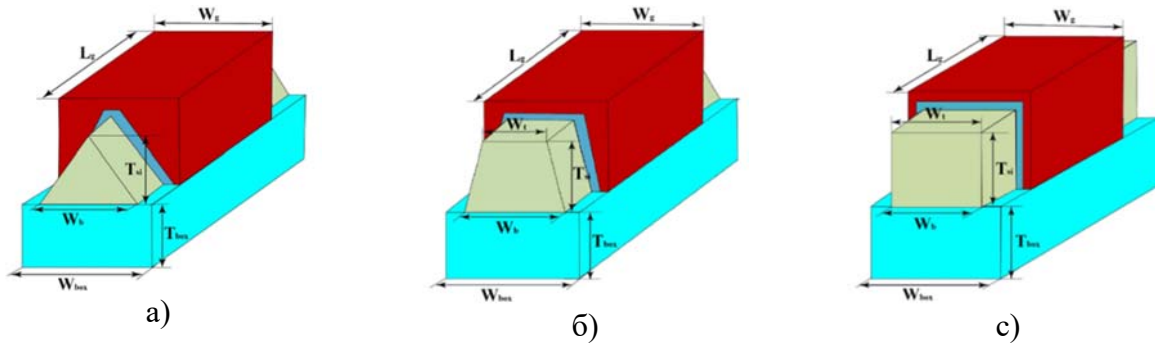
бу ерда I - нуқсонда якка заряд қамралган ҳолатдаги сток токи, I_0 – заряд қамралмаган ҳолатдаги сток токи. Сток токини ўлчашда исток-сток орасидаги потенциаллар фарқи қамралган якка заряд таъсиридан каттароқ бўлмаслиги учун исток-сток орасидаги кучланишини 10-50 мВ қийматлар атрофларида олинади.

Диссертация ишида ўрганилаётган майдоний транзисторлар, характеристикалари TCAD Sentaurus дастури ёрдамида моделлаштирилган. Ушбу ишда ўрганилаётган транзисторни моделлаштиришда классик диффузион-дрейф транспорт моделидан фойдаланилди.

Диссертациянинг «**Ўтишсиз вертикал майдоний транзистор-ларда технологик флуктуацияларининг қисқа каналли эффектларга таъсири**» деб номланган **учинчи бобида** Ўтишсиз майдоний транзисторларнинг канал кўндаланг кесим шаклининг қисқа каналли эффектларга таъсири, транзистор затворининг ён томонга кенгайишининг ва канали шакли турли бўлган транзистор затворининг ён томонга кенгайишининг DIBL ва SS га таъсири,

канал ости оксид қатлами геометрик ўлчамларининг қисқа канал эффектларга таъсири, турли канал кўндаланг кесим шаклига эга ва канали турли даражада легирланган транзисторда қисқа каналли эффектлар ўрганилган.

Ушбу ишда вертикал ўтишсиз уч затворли МОЯ транзисторларда (1-расм) канал юқори қисми кенглиги W_t ўзгаришининг бўсаға кучланиши V_{th} , DIBL эффекти ва SS га таъсири моделлаштирилган.



1-расм. Изолятор устида кремний технологияси асосидаги канал кўндаланг кесими шакли учбурчак (а), трапеция (б) ва тўғри тўртбурчак (с) бўлган наноўлчамли ўтишсиз МОЯ транзистори тузилиши.

V_{th} бўсаға кучланишининг канал кўндаланг кесими учбурчак, трапеция ва тўғри тўртбурчак шакилларга яъни канал юқори қисми кенглиги W_t га боғланишини моделаштириш натижалари 2-расмда келтирилган. Натижалардан кўриниб турибдики, канал юқори қисми кенглиги W_t ортиши билан транзистор бўсаға кучланиши V_{th} монотон равишда камайгани ва канал кўндаланг кесими тўғри тўртбурчак бўлган ҳолатда энг кичик қийматни қабул қилганини кузатишимиз мумкин (2-расм). Бўсаға кучланишининг бундай ўзгариши канал марказида затвор кучланиши томонидан ҳосил қилинган натижавий майдоннинг канал шаклга боғланиши билан тушунтирилиши мумкин. Канал кесим шакли ўзгаришининг қисқа каналли эффектларга таъсири ҳам ўрганилди. DIBL ва SS эффектларининг канал юқори қисми кенглигига боғланиши 3-расмда келтирилган. 3-расмдаги

а) б)

2-расм. Бўсаға кучланишининг канал юқори қисмининг кенглиги W_t га боғлиқлиги. 3-расм. Ўтишсиз вертикал МОЯ транзисторда а) DIBL эффектининг ва б) SS эффектининг канал юқори қисмининг кенглиги W_t га боғлиқлиги.

натижалардан шуни кўриш мумкунки, канал юқори қисми кенглиги ортиши билан DIBL эффекти ва SS монотон ошади ва канал кўндаланг кесим шакли учбурчак бўлган ҳолатда энг кичик қийматлари кузатилган (3.3а,б-расмлар). Маълумки DIBL эффекти ва SS каналдаги потенциал тақсимоти билан боғлиқ. Шу сабабали транзистор канали шакли ўзгаришларида кузатиладиган потенциал тақсимоти ўзгаришлари кўрсатилган қисқа каналли эффектларнинг ўзгаришига олиб келади.

«Ўтишсиз майдоний транзисторда чегара ва оксид қатламидаги якка нуқсоннинг транзистор характеристикаларига таъсири» деб номланган **тўртинчи бобда** тасодифий телеграф шовкин хосаларини ўрганишда фойдаланиш учун оксид қатлами ва оксид-яримўтказгич чегарасидаги якка нуқсоннинг физик модели таклиф қилинган, транзистор канали кўндаланг кесими турли шаклларида оксид қатламидаги якка нуқсоннинг сток токига таъсири ўрганилган ва ўтишсиз ва инверсияланган каналли изоляцияланган затворли вертикал майдоний транзисторларда тасодифий шовкин амплитудасини таққосланган.

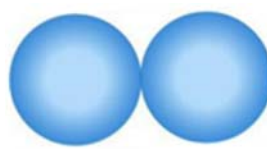
МОЯ транзисторларининг оксид қатламида ёки оксид-яримўтказгич чегарасидаги нуқсонда қамралган якка заряднинг ўлчамларини ва фазовий тақсимотини ифодаладиган ягона физик модел мавжуд эмас. Диссертацияда изоляцияланган затворли транзисторларда чегаравий ходисаларни моделлаштиришда фойдаланиши мумкин бўлган зарядланган якка нуқсон физик модели таклиф қилинган (4-расм). Моделлаштириш натижалари шуни кўрсатадики ўтишсиз изолятор устида кремний технологияси асосидаги вертикал майдоний (ИУК FinFET) транзистор оксид қатламида ёки оксид-яримўтказгич чегарасидаги якка нуқсонда қамралган заряд томнидан генерацияланган ТТШ амплитудаси заряд соҳасининг шаклига ва 0.1 нм дан 0.5 нм гача чизиқли ўлчамлари соҳасида, заряд фазовий тақсимотига ва ўлчамларига деярлик боғлиқ эмас. Ва демак кўрилаётган транзисторларда якка нуқсонни одий зарядланган катакча (4-расм, 4-шакл) орқали моделлаштириш мумкин.



1-шакл



2-шакл



3-шакл

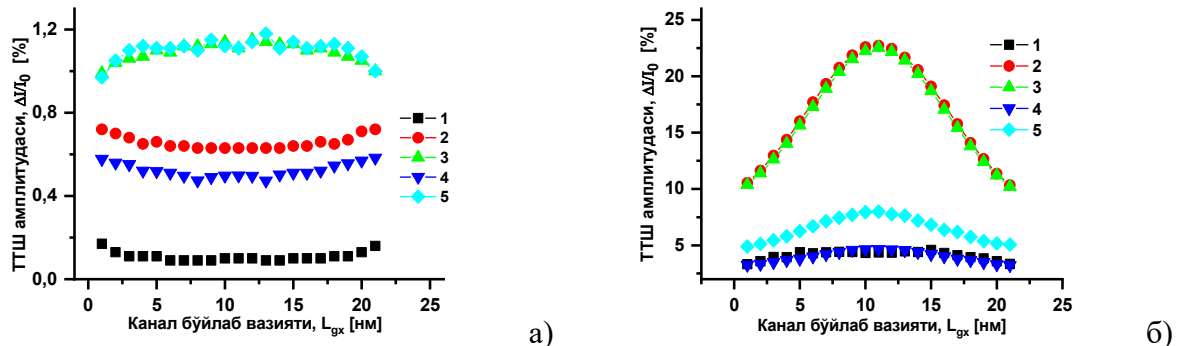


4-шакл

4-расм. Заряд тақсимотининг турли шаклларига эга бўлган якка қамровчи зарядланган нуқсоннинг моделлари.

Диссертация ишида изолятор устида кремний асосидаги ўтишсиз майдоний транзисторлар-нинг турли канал кўндаланг кесими шаклида канал юқори ва ён сиртларида оксид-канал чегарасида қамралган якка заряднинг канал бўйлаб жойлашиш вазиятининг тасодифий телеграф шовкин амплитудасига таъсири ҳисобланди. Каналнинг кўндаланг кесимлари

учбурчак, трапециясимон ва тўғри бурчакли бўлган транзисторлар қаралган. Моделлаштириш натижалари, тасодифий телеграф шовкин амплитудаси транзистор канали шаклига боғлиқ эканлигини кўрсатади. Айниқса, бу боғланиш затвор кучланишларининг бўсагадан паст соҳасида сезиларли эканлиги кўринади (5-расм).



5-расм. ТТШ амплитудасининг камралган якка заряд канал бўйлаб жойлашган вазиятга боғланиши. (а) - $V_g - V_{th} = 0$, ва (б) $V_g - V_{th} = -0,4$. (1) - Канал кўндаланг кесими учбурчак, заряд ён томонда; (2) - Канал кўндаланг кесими трапеция, заряд ён томонда; (3) - Канал кўндаланг кесими тўртбурчак, заряд ён томонда; (4) - Канал кўнда-ланг кесими трапеция, заряд тепада; (5) - Канал кўндаланг кесими тўртбурчак, заряд тепадаги холат.

ХУЛОСАЛАР

Нанометр ўлчамлардаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги изоляцияланган уч затворли ўтишсиз вертикал МОЯ транзисторлар характеристикаларига, ундаги қисқа каналли эффектларга ва тасодифий телеграф шовкинга технологик флуктуациялардан келиб чиққан транзистор ўлчамларининг, шаклининг ва канал легирланиш даражаси ўзгаришининг таъсирини моделлаштириш ва назарий таҳлил қилиш бўйича олинган натижалар асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Нанометр ўлчамлардаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги уч затворли ўтишсиз вертикал МОЯ транзистор канал тепаси кенглиги W_t ортиши билан транзистор бўсага кучланиши V_{th} монотон равишда камайиши, DIBL эффекти ва SS ларнинг эса монотон ортиши аниқланди. Бундай боғланишлар канал шакли ўзгарганда аккумуляция режимини юзага келтирувчи затвор кучланиши ва канал бўйлаб потенциал тақсимоти ўзгаришлари билан боғлиқ.

2. Затвор узунлиги, канал қалинлиги ва кенглиги 10 нм, канал кесим шакли тўғри тўртбурчак бўлган изолятор устида кремний технологияси асосидаги уч затворли ўтишсиз вертикал МОЯ транзистор затвори ён томонга кенгайтирилганда, DIBL эффекти ортиши топилди. Бундай ўзгариш исток (сток)-затвор паразитик сиғимларининг канал потенциал тақсимотига таъсири натижасида юзага келиши кўрсатилган.

3. Нанометр ўлчамлардаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги уч затворли ўтишсиз вертикал МОЯ транзистор барча канал шаклларида бўсага кучланишининг затвор ён томон кенглигининг 0 дан 2 нм

қийматлари оралиғида, камайиб ундан юқори қийматларда деярли ўзгармасдан қолиши кўрсатилди. Бўсаға кучланишининг бундай хусусияти затвор-исток (затвор-сток) оралиғидаги сифимнинг затвор кенглигига боғлиқлик қонуниятидан келиб чиқади. Канал кўндаланг кесими шакли учбурчак бўлган ҳолида, затвор кенгайишининг бутун ўзгариш диапазонида, бўсаға кучланиши, бошқа шаклдаги транзисторларга нисбатан, энг юқори қийматларда бўлиши кузатилади.

4. Нанометр ўлчамлардаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги уч затворли ўтишсиз вертикал канал кесим шакли тўғри тўртбурчак бўлган, МОЯ транзистор затвори ён томони кенглиги ўзгармаган ва $W_{ext} = 0.5$ нм бўлган ҳолда канал ости оксид қатлами ён томон кенглиги ортиши билан, затвор-база, исток-база ва сток-база сифимларининг камайиб тўйинишга эришганлиги сабабли, DIBL эффекти монотон равишда камайиб бориши ва 300 нм дан каттароқ қийматларда ўзгармай қолиши аниқланди.

5. Тасодифий телеграф шовқинни ўрганиш учун нанометр ўлчамлардаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги уч затворли ўтишсиз вертикал МОЯ транзистор оксид қатламида ёки оксид-яримўтказгич чегарасида қамралган якка нуқсон физик модели шакллантирилди. Қамралган якка заряд томонидан генерацияланган тасодифий телеграф шовқин амплитудаси заряд соҳасининг шаклига ва 0.1 нм дан 0.5 нм гача оралиқда чизикли ўлчамларига, заряд фазовий тақсимотиға деярлик боғлиқ эмаслиги аниқланди.

6. Тасодифий телеграф шовқини амплитудаси канал шаклига, шунингдек қамралган якка заряднинг канал бўйлаб вазиятиға боғлиқ эканлиги аниқланди. Қамралган якка заряд каналнинг ён сиртида жойлашганда, канал кўндаланг кесими шакли учбурчак бўлган ҳолда ТТШ амплитудаси қийматлари энг кичик, тўртбурчак ва трапеция кесим шаклларида эса юқори қийматларға эға эканлиги кўрсатилди. Учбурчак кесимли каналда максимал ток зичлиги нуқтаси асосға яқинлашиб қамралган заряддан узоклашганлиги тасодифий шовқин амплитудасининг нисбатан кичик бўлишиға сабаб бўлади.

7. Якка заряд каналнинг юқори сиртида қамралганда, генерацияланган ТТШ амплитудаси канал кўндаланг кесим шакли тўғри тўртбурчак ҳолда трапеция шакли ҳолға нисбатан юқори бўлиши аниқланди ва бу каналдаги ток максимал зичлиги нуқтаси ҳамда қамралган якка заряд ўртасидаги масофа нисбатан кичик эканлиги билан боғлиқлиги кўрсатилди.

8. Нанометр ўлчамлардаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги уч затворли ўтишсиз вертикал МОЯ транзисторда затвор кучланиши бўсаға кучланишиға тенг бўлган ҳолда, канал тепа сирти марказида қамралган заряд томонидан генерацияланган тасодифий телеграф шовқин амплитудаси бир хил геометрик ўлчамлардаги планар, ҳажмий МОЯ транзистор, тўлиқ камбағаллашган изолятор устида кремний технологияси асосидаги МОЯ транзистор (FDSOI) ва FinFET транзистордагига нисбатан бир тартибға кичик эканлиги кўрсатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc02/27.02.2020.FM/Т.110.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

УРГЕНЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ХАЛИЛЛОЕВ МАХКАМ МУХАММАДШАРИФОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ФЛУКТУАЦИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗПЕРЕХОДНОГО
НАНОРАЗМЕРНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА**

01.04.10 – «Физика полупроводников»

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

Ташкент – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2018.1.PhD/FM201.

Докторская 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.ziyo.net).

Научный консультант:

Атамуратов Атабек Эгамбердиевич
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Каримов Иброксим Набиевич
доктор физико-математических наук, проф.

Ёдгорова Дилбара Мустафаевна
доктор технических наук, проф.

Ведущая организация:

Ташкентский университет информационных технологий

Защита диссертации состоится «__» _____ 2022 года в __ часов на заседании Научного совета DSc02/27.02.2020.FM/T.110.01 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском Физико-технического института 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 «__» _____ 2022 г.
(реестр протокола рассылки № _____ от _____ 2022 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. С каждым днем ускоряется развитие науки, техники и технологий, в частности электроники. Это в свою очередь приводит к усилению требований к элементам применяемым в электронике. Среди этих требований в ряд самых основных входят увеличение степени их энергосбережения, быстродействия и функциональности. Реализация таких требований прямо связана с доведением размеров элементов, составляющих эти электронные устройства, до нанометровых. В настоящее время в ряд основных элементов электронных устройств входят и полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП транзисторы). Доведя размеры этих транзисторов до нанометровых масштабов можно добиться увеличения степени интеграции интегральных схем и уменьшения их энергопотребления. Поэтому исследование свойств МОП структур и транзисторов на их основе считается актуальной задачей современной физики полупроводников.

На сегодняшний день обращается большое внимание на раскрытие влияния различных деградационных эффектов на характеристики транзисторов, проявляющихся при доведении размеров МОП транзисторов до нанометровых масштабов. В связи с этим одним из важных задач физики полупроводниковых приборов является определение закономерностей влияния случайных изменений геометрических размеров на электрофизические параметры, характеристики и короткоканальные эффекты нанометровых МОП транзисторов, в частности вертикальных безпереходных МОП транзисторов (JL FinFET).

В нашей Республике уделяется большое внимание развитию науки, в частности особое внимание уделяется развитию физики полупроводниковых приборов и электронной отрасли. В этом плане, учеными нашей страны 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 годы, в частности, определены 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. К настоящему времени все работы, посвященные изучению структуры и влияния технологических флуктуаций на параметры и характеристики вертикальных полевых транзисторов с изолированным затвором и деградиационных влияний короткоканальных эффектов, были ограничены исследованием зависимости короткоканальных эффектов от структуры транзистора и электрофизических параметров от формы канала, и почти не было исследовано влияние размеров различных слоев и формы канала на короткоканальные эффекты. Японские ученые D.Hisamoto, T.Kaga, Y.Kawamoto и E.Takeda для уменьшения влияния короткоканальных эффектов в нанометровых полевых транзисторах с изолированным затвором, вместо планарных транзисторов предложили новые вертикальные полевые транзисторы с изолированным затвором. Предложенный для упрощения технологии изготовления этих вертикальных транзисторов ирландским ученым J.P. Colinge и его коллегами транзистор с новой структурой с тремя затворами не имеет переходов исток-канал и сток-канал. Ученые университетов Корейской Республики So Jeong Park, Daeyoung Jeon, Gyu-Tae Kim исследовали влияние формы канала и уровня легирования на характеристики вертикального безпереходного полевого транзистора. Китайскими учеными из университета Ханджоу Дианжи Wei-Feng Lü, Liang Dai рассмотрено влияние работы выхода материала затвора на характеристики безпереходного полевого транзистора и исследовано его влияние при применении их в аналоговых схемах. Случайные телеграфные шумы в вертикальных безпереходных полевых транзисторах и их сравнение с шумами в родственных транзисторах было исследовано учеными A. Asenov и его коллегами из университета Глазго Великобритании. Украинскими учеными из института физики полупроводников было проведено сравнение характеристик много-затворных безпереходных полевых транзисторов с транзисторами работающими в режиме аккумуляции. Однако влияние на вольтамперные характеристики, на короткоканальные эффекты формы канала, геометрических размеров различных слоев, единичного заряда встроенного на границе оксид-полупроводник, и в оксидном слое почти не исследовано.

Учеными Узбекистана С.З. Зайнабидиновым, С. И. Власовым, И.Н. Каримовым, Х.С. Далиевым, А. Юсуповым, А. Атамуратовым и другими

проводились исследования характеристик МДП структур и полевых транзисторов на основе этих структур. В частности, А.В. Каримовым исследовались различные структурные эффекты в полевых транзисторах на основе p-n переходов. С.И. Власовым развиты усовершенствованные методы C-V характеристик для исследования границы раздела диэлектрик-полупроводник в МДП структурах. С.З. Зайнабидиновым и И.Н. Каримовым исследовались различные внешние влияния на граничные состояния в МДП структурах. Х.С. Далиевым экспериментально определено влияние на характеристики МДП структур различных технологических обработок. А. Атамурастовым и А. Юсуповым моделировались влияния на характеристики МДП транзисторов локальных зарядов в диэлектрическом слое. Но в этих работах не достаточно рассматривались характеристики и параметры наноразмерных многозатворных безпереходных полевых вертикальных транзисторов и влияние технологических флуктуаций, в частности формы канала, на эти характеристики и параметры и случайные телеграфные шумы.

Несмотря на большое количество работ, связанных с исследованием короткоканальных эффектов в полевых вертикальных многозатворных безпереходных транзисторах с изолированным затвором, до настоящего времени системно не исследовано влияние формы канала и геометрических размеров различных слоев на короткоканальные эффекты и случайные телеграфные шумы. Очень мало работ по исследованию влияния на ток стока единичного заряда, захваченного в диэлектрическом слое или на границе раздела диэлектрик-полупроводник вертикального безпереходного полевого 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», утверждённой учёным советом Ургенчского государственного университета (протокол № 4 от 28.12.2016 г.).

Целью исследования является определение влияния изменений формы канала, геометрических размеров, которые могут происходить в результате технологических флуктуаций, на характеристики, короткоканальные эффекты и случайные телеграфные шумы наноразмерных вертикальных изолированных трехзатворных безпереходных полевых транзисторов, основанных на технологии кремний на изоляторе.

Задачи исследования:

посредством моделирования и теоретических анализов в наноразмерных изолированных трехзатворных вертикальных безпереходных полевых транзисторах на основе технологии кремний на изоляторе:

определить влияние изменения формы канала на короткоканальные эффекты в транзисторе;

исследовать влияние бокового расширения затвора, при различных формах канала, на эффект уменьшения барьера индуцированного стоком и наклон подпороговой передаточной характеристики;

моделировать влияние геометрических размеров обратного оксидного слоя на короткоканальные эффекты транзистора при четырёхугольных формах поперечного сечения транзистора;

моделировать единичный заряд, встроенный в подзатворном оксидном слое и на границе оксид-полупроводник;

исследовать влияние изменения формы канала на амплитуду случайного телеграфного шума.

Объектом исследования являются вертикальные трехзатворные безпереходные полевые транзисторы с изолированным затвором на основе технологии кремний на изоляторе.

Предметом исследования являются короткоканальные эффекты, влияние на ток стока единичного заряженного дефекта встроенного на границе раздела диэлектрик-полупроводник и в оксидном слое, и случайные телеграфные шумы наблюдаемые в вертикальных трехзатворных безпереходных полевых транзисторах с изолированным затвором на основе технологии кремний на изоляторе.

Методы исследований. В исследовании применены методы численного компьютерного моделирования и теоретико-аналитических расчетов электронных процессов электронного транспорта. При 3D моделировании использована диффузионно-дрейфовая модель и приняты во внимание зависимость подвижности от концентрации и насыщение скорости носителей при высоких полях. Так как рассматриваемые транзисторы имеют нанометровые масштабы для учета квантовых эффектов использована квантовая корректировка по градиенту плотности.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определено, что при увеличении ширины потолка W_t нанометрового трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора на основе технологии кремний на изоляторе, пороговое напряжение транзистора монотонно уменьшается, а DIBL эффект и наклон подпороговой передаточной характеристики монотонно увеличиваются. Это связано с уменьшением потенциального барьера вдоль канала для носителей заряда;

показано, что при всех формах поперечного сечения канала, с увеличением боковой ширины затвора W_{ext} от 0 до 2 нм, пороговое напряжение нанометрового трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора на основе технологии кремний на изоляторе уменьшается, и при больших значениях боковой ширины, достигнув насыщения, остаётся

почти без изменений. Это свойство следует из закономерности связи емкости затвор-исток (затвор-сток) от боковой ширины затвора;

наблюдается, что при одновременном расширении обратного оксидного слоя и боковой ширины затвора нанометрового трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора на основе технологии кремний на изоляторе от 0 до 3 нм, увеличение DIBL эффекта и SS в основном связано с увеличением емкости затвор-исток (затвор-сток) а при боковом расширении больше 3 нм уменьшение DIBL эффекта и SS с достижением насыщения связано с уменьшением емкостей исток-база (сток-база) и затвор-база;

для изучения случайного телеграфного шума, предложена модель единичного дефекта встроенного в оксидном слое или на границе оксид-полупроводник нанометрового трехзатворного безпереходного вертикального FinFET транзистора на основе технологии кремний на изоляторе;

определено, что амплитуда случайного телеграфного шума зависит от формы канала, а также от положения единичного встроенного заряда вдоль канала. Показано, что при встраивании единичного заряда на боковой граничной поверхности канала транзистора с треугольным сечением, амплитуда случайного телеграфного шума наименьшая, а у транзисторов с прямоугольным и трапециoidalным сечением амплитуда наибольшая. Определено, что при встраивании единичного заряда на потолочной граничной поверхности, амплитуда генерированного случайного телеграфного шума больше при прямоугольном сечении чем при трапециoidalном, что связано с расстоянием между точкой максимальной плотности тока в канале и единичным зарядом.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

получена зависимость короткоканального DIBL эффекта от формы канала, толщины обратного оксидного слоя, ширины затвора нанометрового трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора на основе технологии кремний на изоляторе и показано, что это позволит определить на практике оптимальные геометрические размеры и электрофизические параметры этих транзисторов не приводящие к сильной деградации при использовании их в различных интегральных схемах;

выявлена зависимость наклона подпороговой передаточной характеристики SS от формы канала, толщины обратного оксидного слоя, ширины затвора наноразмерного трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора на основе технологии кремний на изоляторе и показано, что это позволит определить на практике оптимальные геометрические размеры и электрофизические параметры этих транзисторов, не приводящие к сильной деградации при использовании их в аналоговых схемах и схемах ключа;

по результатам исследования влияния заряда единичного дефекта на границе раздела диэлектрик-полупроводник на ток стока наноразмерного трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора на основе

технологии кремний на изоляторе показана возможность, экспрессным способом, определить наличие единичных дефектов на границе раздела диэлектрик-полупроводник посредством измерения амплитуды случайных телеграфных шумов.

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

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость проведённых в рамках данной диссертации исследований заключается в формировании новых представлений о влиянии флуктуации геометрических размеров, возможных в технологическом процессе их получения, на характеристики, короткоканальные эффекты и случайные телеграфные шумы в нанометровых трехзатворных безпереходных вертикальных МОП транзисторах на основе технологии кремний на изоляторе.

Практическая значимость полученных результатов исследования определяется тем, что установленная связь DIBL эффекта и SS с формой и размерами различных частей нанометрового трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора, может быть использована для выбора оптимальной формы и размеров при технологическом процессе его получения, а также возможностью использования при экспрессной диагностике границы раздела диэлектрик-полупроводник выявленной зависимости амплитуды случайного телеграфного шума от положения единичного граничного заряда.

Внедрение результатов исследования.

Результаты моделирования влияния геометрических размеров различных частей, формы на переходные вольтамперные характеристики, короткоканальные эффекты и амплитуду случайных телеграфных шумов нанометрового трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора были использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

результаты по моделированию единичных дефектов на границе оксид-полупроводник в наноразмерных полупроводниковых многослойных транзисторах, полученные распределения потенциала в канале наноразмерного полевого транзистора, его связи с размерами различных слоев и научные выводы о кватовых корректировках, использованных при вычислении вольт-амперных характеристик, были применены в фундаментальном исследовательском проекте “Теоретическое исследование фотонно-кинетических эффектов в полупроводниках и их наноструктурах” при вычислении туннельных потоков носителей тока в многослойных размерно-квантованных полупроводниковых структурах, в теоретических исследованиях кинетических процессов с участием фотонов, а также при

анализе результатов (справка № 89-03-286 Министерства Высшего и среднего специального образования от 19.01.2021 г.);

Результаты моделирования влияния флуктуаций геометрических размеров и формы на характеристики наноразмерного МОП транзистора были использованы при моделировании продвинутых полевых транзисторов в проекте “Решение новых проблем возникающих при сложных компьютерных вычислениях и технические и программные методы для очень сложных компьютерных вычислений” в отделе Компьютерной архитектуры Университета Сантьяго де Компостелла (Испания) (справка от директора отдела Электроники и компьютерных наук от 10 марта 2021 г.). Использование научных результатов способствовало моделированию влияния флуктуации внутренних параметров на характеристики наноразмерных полевых транзисторов, в частности вертикальных безпереходных полевых транзисторов.

Апробация результатов исследований. Результаты данного исследования обсуждались на семинарах Ургенчского государственного университета, и докладывались на 4 международных и 6 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, 4 статей в зарубежных и 1 статья в республиканском научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы, 2 приложения, 110 страниц основного текста, включая 61 рисунка и 4 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 **“Развитие транзисторов металл-оксид-полупроводник и возникающие у них проблемы”** на основе анализа литературных данных приведены сведения об истории и закономерностях развития планарных транзисторов металл-оксид-полупроводник. Рассмотрены большое количество работ связанных с исследованием нанометровых вертикальных транзисторов металл-оксид-полупроводник и физические предпосылки их возникновения. Проанализированы свойства нанометровых безпереходных транзисторов металл-оксид-полупроводник и проблемы их масштабирования. Исходя из литературного анализа обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации.

Во второй главе **“Характеристики наноразмерных безпереходных вертикальных транзисторов металл-оксид-полупроводник, короткоканальные эффекты в них и методы их вычисления”** объясняется понятие короткоканального эффекта и приведены методы их вычисления, рассмотрены модели транспорта и подвижности использованные при моделировании и приведены результаты их калибровки. Описаны характеристики случайного телеграфного шума и методика их вычисления.

DIBL эффект, согласно определению, является величиной определяющей изменения порогового напряжения при изменении напряжения на стоке V_d на один вольт, то есть

$$DIBL = \frac{\Delta V_{th}}{\Delta V_d} = \frac{V_{th2}(V_{d2}) - V_{th1}(V_{d1})}{V_{d2} - V_{d1}}$$

здесь V_{d1} - напряжение между истоком и стоком соответствующее слабому току стока, V_{d2} - напряжение между истоком и стоком соответствующее сильному току стока, $V_{th1}(V_{d1})$ - пороговое напряжение соответствующее напряжению на стоке V_{d1} , $V_{th2}(V_{d2})$ - пороговое напряжение соответствующее напряжению на стоке V_{d2} .

В ряд короткоканальных эффектов, кроме DIBL эффекта входит также уменьшение крутизны передаточной характеристики. Обычно для оценки такого короткоканального эффекта рассматривают величину обратную крутизне подпороговой передаточной вольтамперной характеристики и она

обозначается как SS (Subthreshold swing). SS есть наклон подпороговой области и формула для его вычисления выглядит следующим образом:

$$SS = \frac{\Delta V_g}{\Delta \lg I_d} = \frac{V_{th} - (V_{th} - 0,2)}{\lg I_{th} - \lg I_{off}} = \frac{0,2}{\lg \left(\frac{I_{th}}{I_{off}} \right)} \quad \left[\frac{\text{мВ}}{\text{декада}} \right]$$

здесь ΔV_g разность напряжений на затворе соответствующих пороговому V_{th} и закрытому состоянию. В нашем случае под закрытым состоянием подразумевалось состояние с напряжением на затворе меньшим порогового на 200 мВ. $\Delta \lg I_d$ есть разность между десятичным логарифмом тока стока I_{th} соответствующего пороговому напряжению напряжением $\lg I_{th}$ и логарифмом тока закрытого состояния $\lg I_{off}$ транзистора.

В технологических процессах формирования наноразмерных транзисторов на границе раздела оксид-полупроводник могут образоваться единичные дефекты и они могут привести к генерации случайных телеграфных шумов (СТШ). В диссертационной работе моделируется связь амплитуды случайных телеграфных шумов с флуктуацией геометрических размеров и формой канала. Амплитуда СТШ определяется изменением тока стока при данных условиях. При измерениях амплитуда СТШ, при стационарных условиях, то есть при захвате единичного заряда на граничном дефекте (или в приграничном оксидном слое), вычисляется с помощью следующей формулы

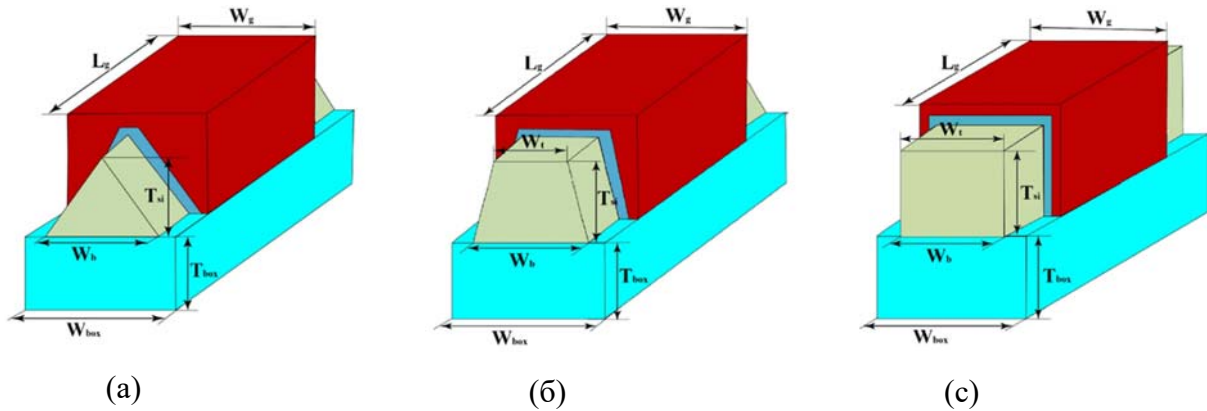
$$\text{СТШ} = \frac{I - I_0}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0}$$

здесь I - ток стока при захвате заряда на дефекте, I_0 - ток стока при отсутствии заряда на дефекте. Чтобы влияние заряда на дефекте было заметным, при измерениях тока стока напряжение между истоком и стоком выбиралось в пределах 10-50 мВ.

В диссертационной работе характеристики исследуемого полевого транзистора моделировались с помощью программы TCAD Sentaurus. В данной работе при моделировании исследуемого транзистора использовалась диффузионно-дрейфовая модель транспорта.

В третьей главе диссертации **“Влияние технологических флуктуаций безпереходного вертикального полевого транзистора на короткоканальные эффекты”** исследуется влияние формы поперечного сечения канала на короткоканальные эффекты, влияние бокового расширения затвора транзистора с различной формой канала на DIBL эффект и SS, влияние геометрических размеров обратного оксидного слоя на короткоканальные эффекты, короткоканальные эффекты в транзисторах различной формы поперечного сечения с различным уровнем легирования в безпереходных полевых транзисторах.

В данной работе моделировалось влияние изменения ширины потолка W_t в вертикальных безпереходных трехзатворных МОП транзисторах на пороговое напряжение V_{th} , DIBL эффект и SS. Результаты моделирования зависимости порогового напряжения V_{th} от треугольной, трапецидальной и прямоугольной формы поперечного сечения то есть от ширины потолка канала W_t показаны на 2-рис. Из результатов видно, что с увеличением



1-Рис. Структура наноразмерного безпереходного МОП транзистора основанного на технологии кремний на изоляторе с поперечным сечением канала в форме треугольника (а), трапеции (б) и прямоугольника (с).

ширины потолка W_t пороговое напряжение транзистора V_{th} монотонно уменьшается и можно видеть, что при прямоугольном сечении принимает наименьшее значение (2-рис). Такое изменение порогового напряжения можно объяснить зависимостью результирующего поля образованного со стороны напряжения на затворе от формы канала. Исследовалось также влияние изменения формы канала на короткоканальные эффекты. Зависимость DIBL эффекта и SS от ширины потолка канала приведена на рисунке 3. Из результатов на рисунке 3 можно видеть, что с увеличением

a) b)

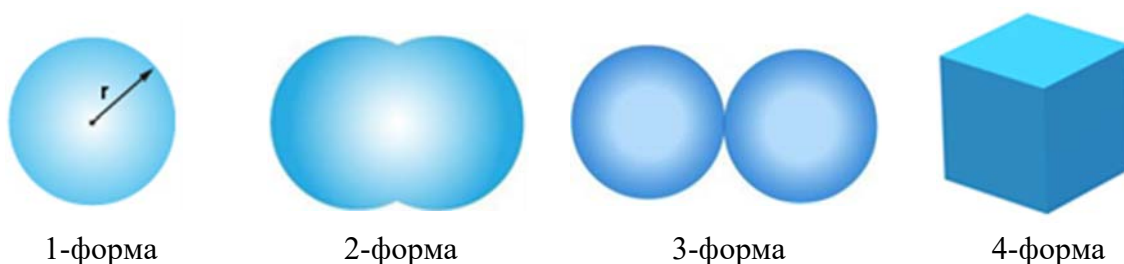
2-Рис. Зависимость порогового напряжения от ширины потолка канала W_t . 3-Рис. Зависимость DIBL эффекта и SS от ширины потолка канала W_t .

ширины потолка DIBL эффект и SS монотонно увеличиваются и при треугольном сечении наблюдаются их наименьшие значения (3-рис a,b). Известно, что DIBL эффект и SS связан с распределением потенциала в

канале. Поэтому изменения распределения потенциала наблюдаемые при изменении формы канала приводят к показанным изменениям короткоканальных эффектов.

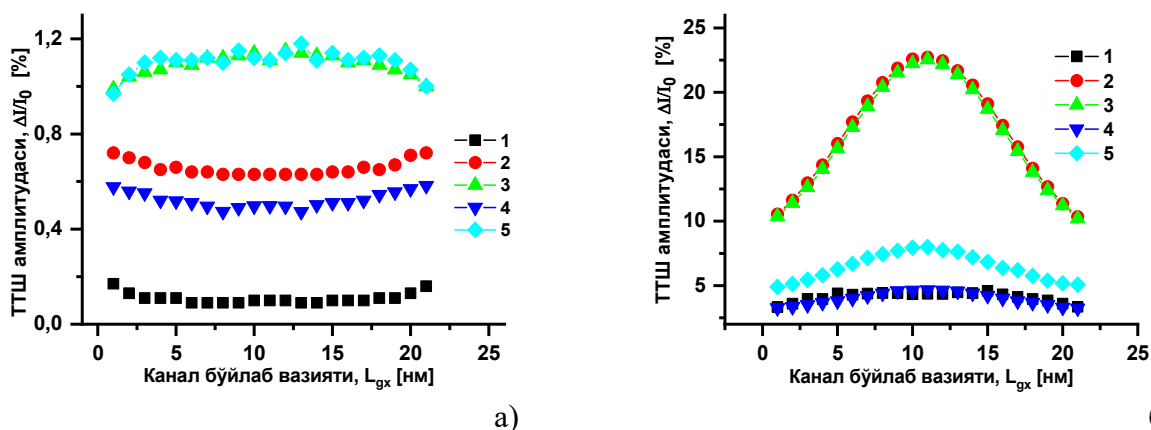
В четвертой главе диссертации “Влияние единичного дефекта на границе и в оксидном слое на характеристики безпереходного полевого транзистора” предложена физическая модель единичного дефекта в оксидном слое и на границе оксид-полупроводник для использования при исследовании свойств случайного телеграфного шума, исследовано влияние единичного дефекта в оксидном слое на ток стока при различных формах поперечного сечения канала транзистора и сравнены амплитуды случайного телеграфного шума в вертикальных полевых безпереходных транзисторах и полевых транзисторах с инверсионным каналом.

Для единичного заряда встроенного в дефекте в оксидном слое или на границе оксид-полупроводник не существует единой модели, которая бы описывала его размеры и пространственное распределение. В диссертации предложена физическая модель заряженного единичного дефекта, которая может быть использована при моделировании граничных явлений в транзисторах с изолированным затвором (4-Рис). Результаты моделирования



4-Рис. Модели единичного ловушечного заряженного дефекта имеющего различные распределения заряда.

показывают, что амплитуда случайного телеграфного шума генерированного зарядом встроенным в единичном дефекте в оксидном слое или на границе оксид-полупроводник в безпереходном вертикальном полевом транзисторе на основе технологии кремний на изоляторе почти не зависит от формы и в пределах линейных размеров от 0.1 нм до 0.5 нм, от пространственного распределения и размеров заряженной области. Следовательно в таких транзисторах единичный дефект можно моделировать обычной заряженной ячейкой (4-рис, форма 4) В диссертационной работе было рассчитано влияние положения единичного заряда встроенного на дефекте на границе оксид-канал на верхней и боковой поверхностях кремниевого безпереходного полевого транзистора на основе технологии кремний на изоляторе с различной формой сечения канала, вдоль канала на амплитуду случайного телеграфного шума. Рассмотрены транзисторы с формой сечения в виде треугольника, трапеции и прямоугольника. Результаты моделирования показывают, что амплитуда случайного телеграфного шума зависит от формы канала. Особенно эта зависимость наглядна при наряжениях на затворе ниже порогового (5-Рис).



5-Рис. Звисимость амплитуды случайного телеграфного шума от положения встроенного заряда вдоль канала. (а) - $V_g - V_{th} = 0$, ва (б) $V_g - V_{th} = -0,4$. форма поперечного сечения канала: (1) –треугольник, заряд встроен на боковой поверхности; (2) - трапеция, заряд на боковой поверхности; (3) - прямоугольник, заряд на боковой поверхности; (4) - трапеция, заряд на потолочной поверхности; (5) –прямоугольник, заряд на потолочной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов моделирования и теоретического анализа влияния изменений размеров, формы транзистора, вызванных технологическими флуктуациями, и уровня легирования канала наноразмерного трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора на основе технологии кремний на изоляторе, на характеристики, на короткоканальные эффекты и случайные телеграфные шумы, сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что с увеличением ширины потолка канала W_t наноразмерного трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора на основе технологии кремний на изоляторе, пороговое напряжение V_{th} монотонно уменьшается, а DIBL эффект и SS монотонно увеличиваются. Такая зависимость связана с изменением величины напряжения на затворе, приводящего к режиму аккумуляции, и изменением распределения потенциала вдоль канала.

2. Обнаружено, что для трехзатворного безпереходного вертикального МОП транзистора на основе технологии кремний на изоляторе, с длиной, толщиной и шириной канала 10 нм и прямоугольной формой поперечного сечения, при боковом расширении затвора, DIBL эффект увеличивается. Показано, что такое изменение вызывается влиянием паразитной ёмкости исток(сток)-затвор на распределение потенциала канала.

3. Установлено, что в трехзатворном безпереходном вертикальном МОП транзисторе на основе технологии кремний на изоляторе, с различной формой поперечного сечения канала, с увеличением боковой ширины затвора W_{ext} в диапазоне изменений от 0 до 2 нм, пороговое напряжение V_{th} уменьшается и при дальнейшем росте боковой ширины практически остаётся

без изменений. Наблюдается, что при треугольном сечении канала во всем диапазоне изменений боковой ширины затвора, пороговое напряжение больше, чем при других формах сечения.

4. Определено, что в трехзатворном безпереходном вертикальном МОП транзисторе на основе технологии кремний на изоляторе, с прямоугольной формой сечения канала, при неизменной и равной $W_{ext} = 0.5$ нм ширине бокового затвора, с увеличением ширины обратного оксидного слоя, DIBL эффект монотонно уменьшается с переходом в насыщение при боковой ширине обратного оксидного слоя больше 300 нм. Такое поведение DIBL эффекта связано с монотонным уменьшением и переходом в насыщение емкостей затвор-база, исток-база и сток-база с увеличением боковой ширины обратного оксидного слоя.

5. Предложена модель единичного дефекта в оксидном слое и на границе раздела оксид-полупроводник, для использования при моделировании случайных телеграфных шумов в нанометровом трехзатворном безпереходном вертикальном МОП транзисторе на основе технологии кремний на изоляторе. Установлено, что амплитуда случайного телеграфного шума, генерированного единичным ловушечным зарядом в пределах линейных размеров от 0.1 до 0.5 нм, практически не зависит от размеров и пространственного распределения заряда заряженной области.

6. Установлено, что амплитуда случайного телеграфного шума зависит от формы канала и положения единичного заряда вдоль канала. Показано, что при встраивании единичного ловушечного заряда на боковой поверхности канала, наименьшая амплитуда случайного телеграфного шума имеет место при треугольном поперечном сечении канала. Приближение к основанию и удаление от единичного встроенного заряда точки с максимальной плотностью тока в канале является причиной сравнительно низкой амплитуды случайного телеграфного шума при треугольной форме сечения канала.

7. Определено, что при встраивании единичного ловушечного заряда на верхней поверхности канала, большая амплитуда случайного телеграфного шума наблюдается для транзистора с прямоугольным поперечным сечением, чем для транзистора с трапециoidalным сечением. Установлено, что это связано с расстоянием между единичным зарядом и центром области максимальной плотности тока в канале.

8. Показано, что в нанометровом трехзатворном безпереходном вертикальном МОП транзисторе на основе технологии кремний на изоляторе, при напряжениях на затворе равном пороговому, амплитуда случайного телеграфного шума, генерированного единичным ловушечным зарядом встроенным на верхней поверхности канала, меньше на порядок, чем в планарном МОП транзисторе, полностью обеднённом МОП транзисторе на основе технологии кремний на изоляторе (FDSOI) и FinFET транзисторах с одинаковыми геометрическими размерами.

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

URGANCH STATE UNIVERSITY

KHALILLOEV MAHKAM MUXAMMADSHARIFOVICH

**SIMULATION OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL
FLUCTUATIONS TO CHARACTERISTICS OF NANOMETER
JUNCTIONLESS FIELD EFFECT TRANSISTORS**

01.04.10- Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2022

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 B2018.1.PhD/FM201

The doctoral 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.ziynet.uz.

Scientific consultant: **Atamuratov Atabek Egamberdievich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent

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

Yodgorova Dilbara Mustafaevna
Doctor of Technical Sciences, Prof

Leading organisation: Tashkent University of Information Technologies

The defense of the doctoral dissertation will be held on “_____” _____ 2022, 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 doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No. _____). 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 “_____” _____ 2022.
(Registry record No. _____ dated “_____” _____ 2022)

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. The development of science, technology and technology, in particular electronics, is accelerating every day. This in turn leads to increased requirements for elements used in electronics. Among these requirements, some of the most basic include an increase in the degree of their energy economizing, speed and functionality. The implementation of such requirements is directly related to bringing the dimensions of the elements that make up these electronic devices to nanometer sizes. Currently, a number of basic elements of electronic devices include insulated gate field effect transistors (MOS transistors). By bringing the size of these transistors to the nanometer scale, it is possible to increase the degree of integration of integrated circuits and reduce their power consumption. Therefore, the study of the properties of MOS structures and transistors based on them is considered an urgent task of modern semiconductor physics.

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: through simulations and theoretical analyzes in nanoscale isolated three-gate vertical junctionless field-effect transistors based on silicon-on-insulator technology:

The task of the research work:

determine the effects of changing the shape of the channel cross section on short-channel effects in the transistor;

investigate the effect of gate lateral expansion, with different channel cross-sectional shapes, on the effect of drain-induced barrier reduction and the slope of the subthreshold transfer characteristic;

to simulate the influence of the geometric dimensions of the reverse oxide layer on the short-channel effects of a transistor with a quadrangular, trapezoidal and triangular shape of the transistor cross section;

simulate a single charge embedded in the gate oxide layer and at the oxide-semiconductor interface;

investigate the effect of changing the channel shape on the amplitude of random telegraph noise.

The object of research is vertical three-gate junctionless field-effect transistors with an insulated gate based on silicon-on-insulator technology.

The subject of research are short-channel effects, the effect on the drain current of a single charged defect embedded at the dielectric-semiconductor interface and in the oxide layer, and random telegraphic noise observed in vertical three-gate junctionless field-effect transistors with an isolated gate based on silicon-on-insulator technology.

Research methods. In the study, the methods of numerical computer simulation and theoretical and analytical calculations of electronic processes of

electron transport were applied. The 3D simulation uses a drift-diffusion model and takes into account the dependence of the mobility on concentration and the saturation of the carrier velocity at high fields. Since the transistors under consideration have nanometer scales, quantum correction by the density gradient is used to take into account quantum effects.

The scientific novelty of the research; It has been determined that with an increase in the ceiling width W_t of a nanometer three-gate vertical junctionless transistor based on silicon-on-insulator technology, the threshold voltage V_{th} of the transistor monotonically decreases, and the DIBL effect and SS monotonically increase. With a triangular cross section of the transistor, the largest value of V_{th} and the smallest values of the DIBL effect and SS are observed, and with a rectangular cross section, on the contrary, the smallest value of V_{th} and the largest value of the DIBL effect and SS;

it is shown that with triangular and trapezoidal cross sections, with an increase in the lateral gate width W_{ext} , the threshold voltage V_{th} of a nanometer three-gate junctionless vertical MOSFET transistor based on silicon-on-insulator technology almost does not change, and with a rectangular cross-section, at values of W_{ext} between 0 and 2 nm, it decreases and at large values remains almost unchanged. It is determined that with a triangular cross-section, in the entire expansion range of the gate, the threshold voltage remains at the highest values;

it is observed that with a simultaneous increase in the width of the reverse oxide layer and the lateral width of the rotor of a nanometer three-gate junctionless vertical MOSFET based on silicon-on-insulator technology, with the lateral expansion of the gate in the range from 0 to 3 nm, the DIBL effect and SS increase and with the furthest expansion of the gate they begin to decrease and reach saturation;

It is determined that in a nanometer three-gate junctionless vertical MOSFET, the DIBL effect and SS depend on the doping level of the channel and it is found that at a concentration of 10^{19} cm^{-3} DIBL, the effect and SS take the smallest values. It is observed that with the same values of the doping concentration, the DIBL effect and SS take the smallest values with a triangular cross-section of the channel;

to investigate random telegraphic noise, a model of a single defect of a nanometer three-gate junctionless vertical FinFET transistor based on silicon-on-insulator technology embedded in the oxide layer or at the oxide-semiconductor interface is proposed. It is determined that the amplitude of the random telegraphic noise generated by the built-in a single charge practically depends on the shape of the charged region and on the distribution and size of the spatial charge, in the linear size range from 0.1 to 0.5 nm.;

it is determined that the amplitude of random telegraph noise depends on the shape of the channel and also on the position of a single embedded charge along the channel. It is shown that when a single charge is embedded on the lateral boundary surface of the channel of a transistor with a triangular cross-section, the amplitude of random telegraphic noise is the smallest for a transistor with a triangular cross-section, and the amplitude is the largest for transistors with

rectangular and trapezoidal cross-sections. It is determined that when a single charge is embedded on the ceiling boundary surface, the amplitude of the generated random telegraph noise is greater with a rectangular section than with a trapezoidal one, which is due to the distance between the region of maximum current density in the channel and the single charge.

Implementation of research results.

The results of modeling the influence of the geometric dimensions of various parts, shapes on transient voltage characteristics, short-channel effects and the amplitude of random telegraphic noise of a nanometer three-gate junctionless vertical MOSFET transistor were used in the following research works:

the results on modeling of single defects at the oxide-semiconductor interface in nanoscale semiconductor multilayer transistors, obtained potential distributions in the channel of a nanoscale field-effect transistor, his connections with the sizes of various layers and scientific conclusions about the quantum corrections used in the calculation of volt-ampere characteristics were applied in the fundamental research project "Theoretical study of photonic kinetic effects in semiconductors and their nanostructures" in the calculation of tunneling flows of current carriers in multilayer dimensionally quantized semiconductor structures, in theoretical studies of kinetic processes involving photons, as well as in the analysis of the results (reference No. 89-03-286 of the Ministry of Higher and Secondary Special Education dated 19.01.2021);

The results of modeling the effect of fluctuations in geometric dimensions and shape on the characteristics of a nanoscale MOSFET were used in modeling advanced field-effect transistors in the project "Solving new problems arising in complex computer calculations and technical and software methods for very complex computer calculations" in the Department of Computer Architecture of the University of Santiago de Compostella (Spain) (certificate from the Director of the Department of Electronics and Computer Science dated March 10, 2021). The use of scientific results contributed to modeling the effect of fluctuations in internal parameters on the characteristics of nanoscale field-effect transistors, in particular vertical non-transient field-effect transistors.

Approbation of research results. The results of this study were discussed at seminars of Urgench State University, and reported at 4 international and 6 republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. 17 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, including 6 papers 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, 5 papers in foreign and 1 paper 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 appendices, 114 pages of the main text, including 61 figures and 4 tables.

**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
LIST OF PUBLISHED WORKS**

I бўлим (I часть, part I)

1. Atamuratov A.E., Khalilloev M.M., Yusupov A., Jean Chamberlain Chedjou, Kyandoghere Kyamakya. Amplitude of Random Telegraph Noise in Junctionless FinFET with Different Channel Shape // e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **19**, 1–4 (2021) (**Scopus IF= 0.607**)

2. Atamuratov A.E., Xalilloev M.M., A. Yusupov A., García-Loureiro J., Jean Chamberlain Chedjou, Kyamakya Kyandoghere. Contribution to the Physical Modelling of Single Charged Defects Causing the Random Telegraph Noise in Junctionless FinFET // Appl. Sci. 2020, 10, 5327; (**Scopus IF= 2.736**)

3. Khalilloev M.M. Simulation study of short channel effects in junctionless SOI mosfets // 2020. Electronic journal. VII. Actual problems of modern science, education and training. December-25. - pp.314-319. Issue1, ISSN Online: 2181-9750 [Online]. (**01.00.00, №10**)

4. Xalilloev M.M., Jabbarova B.O., Nasirov A.A. The Influence of Fin Shape on the Amplitude of Random Telegraph Noise in the Subthreshold Regime of a Junctionless FinFET//Technical Physics Letters, 2019, Vol. 45, No. 12, pp. 1245–1248. (**Scopus IF= 0.714**)

5. Atamuratov A.E., Xalilloev M.M., Abdikarimov A., Atamuratova Z.A., Kittler M., Granzner R., Schwierz F. Simulation of DIBL effect in junctionless SOI MOSFETs with extended gate // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, 2017, 8 (1), P. 75–78 (**01.00.00, №5**)

II бўлим (II часть, part II)

6. Халиллоев М.М. Моделирование амплитуды случайного телеграфного шума в беспереходных FinFET транзисторах с различной формой канала // Материалы XXX международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, Республика Беларусь, 7–8 апреля 2022 г. с. 169-171.

7. Khalilloev M.M., Yusupov A. Atamuratov A.E. Amplitude of random telegraph noise in junctionless finfet with different channel shape // “Замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация интеграцияси” мавзудаги Республика илмий-услубий анжуманида, Андижон, 2020 йил 24-декабрь, б. 139-142.

8. Халиллоев М.М, Юсупов А. Атамуратов А.Э. Исследования распределения сигнала случайных телеграфных шумов в наноразмерных беспереходных FinFET транзисторах // “Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы” Сборник материалов международной онлайн конференции, Ташкент, 2020 год 28 мая, с. 296-301.

9. Халиллоев М.М, Жаббарова Б.О., Атамуратов А.Э. Сравнение амплитуды случайных телеграфных шумов в МОП транзисторах без переходов и с инверсионным каналом // «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2019 –Нукус 20 ноября 2019 г. б. 82-86

10. Халиллоев М.М, Абдикаримов А.Э., Атамуратова З., Жаббарова Б., Атамуратов А.Э. Короткоканальные эффекты в безпереходном МОП-транзисторе с различным уровнем легирования и формой базы // Республиканской научно-практической конференции участием зарубежных ученых «Инновационные технологии в науке и образовании». – Нукус. 20-21 ноября, 2018. – С. 106-107.

11. Xalilloev M.M., Atamuratov A., Yusupov A. Simulation of DIBL effect and sub-threshold swing in low power junctionless MOSFETs with different geometries // EuroScicon Conference on Applied Science, Biofuels & Petroleum Engineering. November 12-13, 2018 Athens, Greece, p.5.

12. Халиллоев М.М, Жаббарова Б.О., Атамуратов А.Э. Влияние формы канального слоя и бокового расширения затвора на пороговое напряжение в безпереходном МОП-транзисторе // Материалы международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». - Фергана. 25-26 мая, 2018.- с. 295-296

13. Халиллоев М.М, Атамуратов А.Э. Зависимость крутизны передаточной характеристики от боковых линейных размеров затвора и скрытого оксидного слоя в безпереходном МОП-транзисторе // Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни РИАК-ХИ-2018 – Тошкент. 11-12 май, 2018 – б. 25-26

14. Халиллоев М.М, Атамуратов А.Э. Влияние формы канального слоя в безпереходном МОП-транзисторе на крутизну подпороговой переходной характеристики // Муҳаммад ал-Хоразмий издошлари мавзусидаги Республика илмий-техникавий анжумани – Урганч. 27-28 апрель, 2018. – б. 68-69

15. Халиллоев М.М., Атамуратов А.Э. Зависимость DIBL эффекта от формы канального слоя в безпереходном МОП- транзисторе // Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришининг замонавий муаммолари мавзусида Республика илмий-амалий анжумани.- Андижон. 20-21 апрель, 2018. - б. 91-93.

16. Атамуратов А.Э., Атамуратова З.А., Абдикаримов А.Э., Халиллоев М.М. Изоляцияланган затворли майдоний транзисторларда бўсага кучланишининг диэлектрик қатламидаги зарядлар ҳисобига ўзгаришини ҳисоблаш учун ЭҲМ дастури патент гувоҳнома DGU 06237 Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлиги «Расмий ахборотнома» блотени. Ташкент, 12.04.2019 год

17. Атамуратов А.Э., Атамуратова З.А., Абдикаримов А.Э., Халиллоев М.М. Изоляцияланган затворли майдоний транзисторларда бўсага кучланишининг оксид-яримўтказгич чегарасидаги заряд ҳисобига

Ўзгаришини ҳисоблаш учун ЭҲМ дастури патент гувоҳнома DGU 06277
Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлиги «Расмий
ахборотнома» блотени. Ташкент, 12.04.2019 год

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида таҳрирдан
ўтказилди (2.04.2022 йил)

Босишга рухсат этилди: _____ 2022 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.

