

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

УРГАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

АБДИКАРИМОВ АЗАМАТ ЭГАМБЕРГАНОВИЧ

**НАНОЎЛЧАМДАГИ ИЗОЛЯЦИЯЛАНГАН ЗАТВОРЛИ ВЕРТИКАЛ
МАЙДОНИЙ ТРАНЗИСТОРНИНГ ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА
ТЕХНОЛОГИК ФЛУКТУАЦИЯЛАРНИНГ ТАЪСИРИНИ
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2021

**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**

Абдикаримов Азамат Эгамберганович

Наноўлчамдаги изоляцияланган затворли вертикал майдоний
транзисторнинг характеристикаларига технологик флуктуацияларнинг
таъсирини моделлаштириш 3

Абдикаримов Азамат Эгамберганович

Моделирование влияния технологических флуктуаций на
характеристики наноразмерного вертикального полевого транзистора с
изолированным затвором..... 19

Abdikarimov Azamat Egamberganovich

Simulation of influence of technological fluctuations to characteristics of
nanometer fin field effect transistors..... 35

Эълон қилинган илмий ишлар рўйхати

Список опубликованных научных работ
List of published research works 39

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

УРҒАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

АБДИКАРИМОВ АЗАМАТ ЭГАМБЕРГАНОВИЧ

**НАНОЎЛЧАМДАГИ ИЗОЛЯЦИЯЛАНГАН ЗАТВОРЛИ ВЕРТИКАЛ
МАЙДОНИЙ ТРАНЗИСТОРНИНГ ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА
ТЕХНОЛОГИК ФЛУКТУАЦИЯЛАРНИНГ ТАЪСИРИНИ
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2021

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.1.PhD/FM120 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертацияси Урганч давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати икки тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (ispm.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталига (www.ziyo.net.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Юсупов Ахмед

физика-математика фанлари доктори,
профессор

Расмий оппонентлар:

Каримов Иброҳим Набиевич

физика-математика фанлари доктори

Аюханов Рашид Ахмедович

физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот:

Ўзбекистон Фанлар Академиясининг
Физика-техника институти

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «27» май соат 10 даги мажлисида бўлиб ўтди. (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Ташкент ш., Янги Олмазор кўчаси, 20-уй, Тел.: (+99871)248-79-94, факс: (+99871)248-79-92, e-mail: info@ispm.uz)

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (24 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz).

Диссертация автореферати 2021 йил «10» май кuni тарқатилди.
(2021 йил «10» май даги 24 рақамли реестр баённомаси).



Ш.Б. Утамурадова

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

Ж.Ж. Хамдамов

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, PhD

З. Т. Азаматов

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда наноўлчамдаги вертикал майдоний транзисторлар, электрон техника ускуна ва қурилмаларида, интеграл схемаларда хотира вазифасини бажарувчи асосий элеменлардан бири бўлиб фойдаланилиб келинмоқда. Ҳозирги кунда эса аҳоли эҳтиёжининг бундай қурилмаларга қўядиган талаблари кундан кунга ортиб бормоқда. Бунда уларнинг функционаллиги, тезкорлиги ва энергия тежамкорлик даражасини ошириш энг муҳим аҳамият касб этади.

Жаҳонда замонавий электрон қурилмаларнинг асосий элементлари қаторига биполяр транзисторлар билан бир қаторда изоляцияланган затворли майдоний транзисторлар - МОЯ (металл оксид яримўтказгич) транзисторлар ўлчамларини наномасштабларга етказиш орқали интеграл схемаларнинг интеграция даражасини кескин ошириш ва энергия истеъмолини кескин камайтириш бўйича илмий изланишлар олиб борилмоқда. Шу боис майдоний транзисторлари ўлчамларини наноўлчамларга етказганда юзага келадиган турли деградацион эффектларнинг транзистор характеристикаларига таъсирини очиқ бериш, наноўлчамли вертикал МОЯ транзистор (FinFET, Fin field-effect transistor) геометрик ўлчамлари флуктуацияларининг, тасодифий якка нуқсонларнинг, транзистор электрофизик параметрларига, характеристикаларига, қисқа каналли эффектларга таъсири қонуниятларини аниқлашга алоҳида эътибор берилмоқда.

Республикаимизда илм-фан тараққиёти, хусусан, яримўтказгичли асбоблар физикаси ва электроника соҳасини ривожлантириш борасида давлат стратегик ва иқтисодий аҳамиятга эга бўлган чора-тадбирлар белгиланиб бунга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада мамлакатимиз олимлари томонидан янги яримўтказгич материаллар, улар асосида турли тузилмалар олиш ва уларнинг характеристикаларига ташқи омиллар таъсирини ўрганиш бўйича муҳим натижаларга эришилмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясининг тўртинчи бандида «...илмий-тадқиқот ва инновацион фаолиятни рағбатлантириш, илмий ва инновацион ютуқларни амалиёга жорий этишнинг самарали механизмлари...»¹ бўйича муҳим вазифалар белгилаб берилган. Бу борада турли таъсирларга чидамли янги электрон техника материаллари ва улар асосидаги тузилмаларни ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг параметрларини назорат қилишнинг самарали усуллари яратиш муҳим илмий-амалий аҳамиятга эга ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 30 майдаги ПҚ–4348-сон «Электротехника саноатини ривожлантириш учун қулай шарт-шароитлар яратиш ва тармоқнинг инвестициявий ҳамда экспорт салоҳиятини

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг ПФ-4947 «2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналишлари бўйича ҳаракатлар стратегияси» тўғрисидаги Фармони

ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида», 2018 йил 14 июлдаги ПҚ-3855-сон «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида», 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар Академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисидаги» ги Қарор ва мазкур соҳа фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳукукий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Хозирги кунгача изоляцияланган затворли вертикал майдоний транзисторлар турли тузилишлари, унинг характеристика ва параметрларига технологик флуктуацияларнинг таъсирини ва қисқа каналли эффектларнинг деградацион таъсирларини ўрганишга боғишланган деярлик барча ишлар қисқа канал эффектларнинг транзистор геометриясига боғлиқлиги, канал шаклининг транзистор турли электрофизик параметрларига таъсирини ўрганиш билан чекланган, аммо транзисторнинг турли қатламлари ўлчамларининг ва канал шаклининг қисқа каналли эффектларга таъсири деярлик ўрганилмаган.

Наноўлчамларда изоляцияланган затворли майдоний транзисторлар характеристикаларини талаб даражасига етказиш учун планар тузилишга эга бўлган транзистор ўрнига янги, вертикал тузилишли, изоляцияланган затворли майдоний транзистор Япониялик олимлар D.Hisamoto, T.Kaga, Y.Kawamoto ва E.Takeda томонидан таклиф қилинган. Аммо бу транзисторда геометрик ўлчамлар камайиши сабабли турли паразит сиғимлар ортиши кузатилади. Затвор ва исток орасидаги паразит сиғимини камайтириш учун АКШ лик олимлар C. Auth ва J. Markoff томонидан янги уч затворли вертикал майдоний транзистор таклиф қилинган. A.G.Lourero ва ходимлари (Испания) томонидан наноўлчамдаги изоляцияланган затворли вертикал майдоний транзисторлар параметрлари ва характеристикалари, жумладан, бўсаға кучланиши, транзистор ёпиқ ва очик ҳолатидаги сток тоқларига технологик флуктуацияларнинг таъсири ўрганилган. Шунингдек, Россиялик олимлар Н.В.Масальский, Ю.А. Чаплыгин, М.А. Королев ва бошқалар томонидан изоляцияланган икки затворли майдоний транзисторларнинг бўсаға кучланишига затвор материалининг таъсири ва электр характеристикаларининг транзистор тузилишига боғлиқлиги ўрганилган. Аммо изоляцияланган уч затворли вертикал майдоний транзисторнинг вольтампер характеристикаларига ва қисқа каналли эффектларга канал шакли, турли қатламлари геометрик ўлчамларининг, диэлектрик қатламида ва

диэлектрик-яримўтказгич чегарасида қамралган якка заряднинг таъсири деярлик ўрганилмаган.

Ўзбекистон олимлари томонидан металл-диэлектрик-яримўтказгич (МДЯ) тузилмалар ва изоляцияланган затворли майдоний транзисторлар характеристикалари ўрганилган. Аммо бу ишларда наноўлчамдаги кўпзатворли вертикал майдоний транзисторлар характеристикалари ва параметрлари ҳамда уларга технологик флуктуацияларнинг, шунингдек, канал шаклининг таъсири ўрганилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган 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 изолятор устида кремний технологияси асосидаги вертикал майдоний транзисторнинг геометрик ўлчамлари технологик флуктуацияларининг характеристика ва қисқа каналли эффектларга, диэлектрик қатлами ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги зарядланган якка нуқсоннинг телеграф шовқин амплитудасига таъсирини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

изоляцияланган уч затворли вертикал майдоний транзистор FinFET (Fin field-effect transistor) нинг канали кўндаланг кесимининг шакли турлича бўлган ҳоллари учун транзистор электрофизик параметрларини, яъни транзисторнинг ёпиқ ва очик ҳолатдаги сток тоқлари ва бўсаға кучланишларини таққослаш;

изоляцияланган уч затворли вертикал майдоний транзисторнинг канали кўндаланг кесимининг шакли турли бўлган ҳоллар учун сток томонидан тўсиқ камайиши (DIBL, Drain-induced-barrier lowering) эффекти ва бўсағадан паст ўтиш характеристикаси қиялиги(SS, subthreshold swing)ни таққослаш;

канал кўндаланг кесимининг шакли тўртбурчак, трапеция ва учбурчак бўлган изоляцияланган уч затворли вертикал майдоний транзистор ён томон затворлари қалинлиги ортишининг қисқа каналли эффектларга таъсирини моделлаштириш;

изолятор устида кремний (ИУК) технологияси асосидаги изоляцияланган уч затворли вертикал майдоний транзистор канали кўндаланг кесими тўртбурчак, трапеция ва учбурчак шаклларда бўлган транзисторнинг канал остидаги оксид (BOX, buried oxide layer) қатлами қалинлиги T_{box} ортишининг қисқа каналли эффектларига таъсирини ўрганиш;

ИУК технологияси асосидаги затвор ости оксид қатлами узунлиги ортиши билан изоляцияланган уч затворли вертикал майдоний транзисторда DIBL ва SS нинг ўзгаришини ўрганиш;

ИУК FinFET транзистор канали кўндаланг кесими тўғри тўртбурчак ва трапеция шаклларда бўлган уч затворли транзисторнинг диэлектрик-яримўтказгич чегарасида қамралган якка зарядланган нуқсоннинг сток токига таъсирини тадқиқ этиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ИУК технологияси асосидаги вертикал икки ва уч изоляцияланган затворли майдоний транзисторлар олинган.

Тадқиқотнинг предмети бўлиб ИУК технологияси асосидаги вертикал икки ва уч изоляцияланган затворли майдоний транзисторларда қисқа каналли эффектлар ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида қамралган якка зарядланган нуқсонларнинг сток токига таъсири жараёнларини ўрганиш ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқотда электрон жараёнларни компьютерда сонли моделлаштириш ҳамда назарий-аналитик ҳисоблаш усулларидан фойдаланилган. Транзисторнинг турли қисмларининг сифмларини ва улардаги потенциал тақсимотини аналитик ҳисоблашда электростатика қонунларидан, жумладан акс эттириш усулидан фойдаланилди. 3D моделлаштиришда диффузион-дрейф транспорт модели қўлланилиб, унда яримўтказгичларнинг асосий тенгламалари, яъни ўзаро келишилган Пуассон ва узликсизлик тенгламалари ишлатилган. Заряд ташувчилар транспорти ўрганилганда ҳаракатчанлигининг турли моделлари, жумладан ҳаракатчанликнинг концентрацияга боғлиқлиги ва кучли майдонда тезлигининг тўйинишини эътиборга оладиган моделлар фойдаланилди. Кўрилаётган транзистор ўлчамлари наноўлчамларда бўлганлиги сабабли квант эффектларни эътиборга олиш учун зичлик градиенти квант коррективкаси (Density gradient quantum correction) қўлланилган. Компьютер моделлаштиришда транзистор турли соҳаларидаги потенциал тақсимоти чекли элементлар усули ёрдамида ҳисобланган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

затвор узунлиги 25 нм бўлган изолятор устида кремний технологияси асосидаги FinFET транзисторнинг канал кўндаланг кесими турлича шакллари учун DIBL ва SS моделлаштириш орқали биринчи бор таққосланиб, транспорт моделда, квант коррективкаларни эътиборга олган ҳолда, энг катта DIBL ва SS тўғри тўртбурчак кўндаланг кесимли канал шаклга эга бўлган транзисторда аниқланган;

турли канал шаклига эга изолятор устида кремний технологияси асосидаги FinFET транзисторларда канал ости оксид қатламининг қалинлиги T_{box} ортиши билан DIBL ва SS ларнинг ортиши ва T_{box} нинг катта қийматларида тўйиниши аниқланган;

илк бор турли канал шаклига эга изолятор устида кремний технологияси асосидаги FinFET транзисторларида бўсаға кучланиши, DIBL ва SS га затворнинг ён томонга кенгайишининг таъсири моделлаштирилган ҳамда затворни ён томонга 10 нм гача кенгайишида, канал барча шакллари учун бўсаға кучланиши деярли ўзгармаслиги, DIBL ва SS эса 10 % гача камайиши исботланган;

изолятор устида кремний технологияси асосидаги FinFET транзисторларида DIBL ва SSнинг затвор ости оксид қатламининг затвордан ташқаридаги узунлиги L_{goxext} га боғлиқлиги ҳамда $L_{\text{goxext}}=2$ нм гача бўлган қийматларида DIBL ва SSнинг камайиши, ундан катта қийматларда эса ортиши асосланган;

изолятор устида кремний технологияси асосидаги FinFET транзисторларида якка зарядланган нуқсон тўғри тўртбурчак кўндаланг кесимли канал тепаси ўртасида ва трапеция кўндаланг кесимли транзисторда ён томони ўртасида жойлашганда тасодикий телеграф шовқин амплитудаси энг катта бўлиши биричи бор аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

изолятор устида кремний технологияси асосидаги наноўлчамли изоляцияланган затворли вертикал майдоний транзисторда қисқа каналли DIBL эффектининг канал шаклига, канал ости оксид қатлами қалинлигига, затворнинг кенглиги ва затвор ости оксид қатлами узунлигига боғлиқлиги аниқланиб, амалиётда бу транзисторларни турли интеграл схемаларда қўллашда кучли деградацияга учратмайдиган оптимал геометрик ўлчамларини аниқлаш имконини берган;

наноўлчамли изолятор устида кремний технологияси асосидаги изоляцияланган затворли вертикал майдоний транзисторда бўсагадан паст ўтиш вольтампер характеристикасининг қиялиги SS ни транзистор канали шаклига, канал ости оксид қатлами қалинлигига, затворнинг кенглиги ва затвор ости оксид қатлами узунлигига аниқланган боғлиқлари транзисторларни, турли калитли схемаларида қўллашдан олдин, деградацияга учратмайдиган оптимал геометрик ўлчамларини аниқлаш имконини берган;

наноўлчамли изолятор устида кремний технологияси асосидаги FinFET транзисторда, диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги якка нуқсонда қамралган заряднинг сток токига таъсири бўйича олинган натижалари асосида диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги нуқсонларнинг мавжуд-лигини тасодикий телеграф шовқини амплитудасини ўлчаш орқали экспресс усул билан аниқлаш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги моделлаштиришда стандарт Technology Computer-Aided Design (TCAD) Sentaurus дастурлардан фойдаланилганлиги ва қўлланилган физик моделлар даврий нашрларда эълон қилинган тажрибалар натижалари асосида калибровка қилинганлиги ҳамда яримўтказгичлар назарий физикасининг тан олинган ёндашувларидан фойдаланилганлиги билан асосланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти, наноўлчамдаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги FinFET транзисторларни олиш технологик жараёнларида юзага келиши мумкин бўлган ўлчамларнинг флуктуацияси ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида ҳосил бўладиган якка нуқсонларнинг транзистор характеристикаларига ва қисқа каналли

эффектларга таъсири тўғрисидаги янги тасаввурларнинг яратилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти аниқланган DIBL эффекти ва SS нинг изолятор устида кремний технологияси асосидаги FinFET транзисторнинг турли қисмларининг шакл ва ўлчамларига боғлиқлигидан бу транзисторни олиш технологик жараёнларида оптимал шакл ва ўлчамлар танлашда, топилган тасодифий телеграф шовқин амплитудасининг чегаравий якка зарядланган нуқсон вазиятига боғлиқлигидан диэлектрик-яримўтказгич чегарасини экспресс диагностика қилишда фойдаланиш мумкинлиги билан белгиланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

Наноўлчамдаги изоляцияланган затворли вертикал майдоний транзисторнинг характеристикаларига технологик флуктуацияларнинг таъсирини моделлаштириш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

изолятор устида кремний технологияси асосидаги наноўлчамдаги вертикал майдоний транзисторлар характеристикаларини Technology Computer-Aided Design (TCAD) Sentaurus дастури ёрдамида моделлаштириш натижалари ва квант эффектларини ҳисобга оладиган квант коррективкалар тўғрисидаги илмий хулосаларидан ОТ-Ф-2-28 рақамли «Легирилланган кремний сирти ва ҳажмидаги квант ўлчамли эффектлар ҳамда уларнинг р-п тузилмалардаги заряд ташувчилар фотогенерацияси ва рекомбинацияси жараёнларига таъсири» фундаментал лойиҳасида квант ўлчамли эффектларни баҳолашда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 3 - декабрдаги 89-03-4169-сон маълумотномаси). Натижада, р-п ўтишдаги ток ташувчилар фотогенерация жараёнларига кристаллдаги квант эффектларининг таъсирини тушунтириш имконини берган;

изолятор устида кремний технологияси асосидаги наноўлчамли FinFET транзисторининг геометрик ўлчам ва шакллари флуктуациясининг транзистор характеристикаларига таъсирини моделлаштириш бўйича олинган натижалар Сантиаго де Компостелла университетининг (Испания) Смарт технологиялар бўйича Сингуляр тадқиқотлар марказида (CITIUS), «Илгарилаган яримўтказгич асбобларни моделлаштириш ва ҳисоблаш воситаларини яратиш: хусусий параметрларни флуктуациясини ўрганиш учун қўллаш» лойиҳасида илгарилаган майдоний транзисторларни моделлаштиришда фойдаланилган (CITIUS маркази Электроника ва компьютёр фанлар бўлими раҳбари маълумотномаси. 2019 йил). Натижада, наноўлчамдаги майдоний транзисторларни, хусусан вертикал майдоний транзисторларнинг характеристикаларига ички параметрлар флуктуацияси таъсирини моделлаштириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари Урганч давлат университети ва Лакуила университети (Италия) илмий семинарларида ҳамда илмий анжуманларда, жумладан, 4 та халқаро ва 7 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами, диссертация мазмунини тўлиқ акслантирадиган, 20 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 9 та мақола, жумладан, 5 та хорижий ва 4 та республика илмий журналларида чоп этилган.

Интеллектуал мулк агентлиги томонидан ЭХМда қўлланилиш учун 2та дастурий маҳсулот учун гувоҳномалар олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 118 бетни, 58 расм ва 5 жадвални ташкил этади.

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 очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши ҳақида маълумотлар берилган.

Диссертациянинг **«Изоляцияланган затворли майдоний транзисторлар ва уларнинг ривожланиш тенденцияси»** деб номланган биринчи бобида адабиётларда берилган маълумотлар таҳлили асосида планар изоляцияланган затворли майдоний транзисторлар физикаси ҳақида маълумотлар келтирилган. Кўп затворли наноўлчамдаги изоляцияланган затворли майдоний транзисторларни ўрганиш бўйича кўплаб тадқиқотлар кўриб чиқилган, наноўлчамдаги изоляцияланган затворли майдоний транзисторларни масштаблаштириш муаммолари таҳлил қилинган. Адабиётлар шарҳидан келиб чиққан ҳолда мавзунинг долзарблиги асосланган, диссертациянинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

«Наноўлчамдаги майдоний транзисторлардаги қисқа каналли эффектлар, тасодифий телеграф шовқин ва уларни моделлаштириш услублари» деб номланган иккинчи бобда қисқа каналли ИУК FinFET транзисторларида сток томонидан тўсиқ пасайиши эффекти тушунчаси таништирилган ва уни ҳисоблаш усули берилган, наноўлчамли ИУК FinFET транзисторларида бўсақадан паст ўтиш характеристикаси қиялигини тавсифи ва уни ҳисоблаш услуби баён қилинган, тасодифий телеграф шовқин амплитудаси тушунчаси, уни моделлаштириш ва ҳисоблаш услуби кўриб ўтилган, майдоний транзисторлар характеристикаларини TCAD Sentaurus дастури ёрдамида моделлаштириш имкониятлари ва моделлаштиришда

қўлланилган транспорт моделлар тафсилоти ва моделни калибровкакаш натижалари келтирилган.

DIBL эффектининг маъноси стокга берилган кучланиш V_d бир бирликка ўзгарганда транзистор босага 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 бўсага кучланиши, $V_{th2}(V_{d2})$ - сток ва исток соҳалари орасига берилган юқори ток кучланиши V_{d2} га мос ҳолда олинган ўтиш графигидаги бўсага кучланиши (расм 1).

Диссертация ишида геометрик ўлчам ва шакл флуктуацияларининг бўсагадан паст ўтиш вольтампер характеристикасининг тиклигига таъсири ҳам ўрганилган. Бунинг учун тикликка тескари бўлган катталик SS ўрганилган. SS катталик бўсага кучланишидан паст соҳанинг қиялиги бўлиб, уни ҳисоблаш формуласи қуйидагича:

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

бу ерда ΔV_g - транзистор затворидаги кучланиш бўсага кучланиши V_{th} ва транзистор ёпиқ ҳолатига тўғри келадиган затвор кучланиши орасидаги фарқ, I_{th} - бўсага кучланишига тўғри келадиган сток токи, I_{off} - транзистор ёпиқ ҳолатига тўғри келадиган сток токи. Наноўлчамли транзисторларни шакллантириш технологик жараёнларида оксид-яримўтказгич қатламлари чегараларида якка нуқсонлар ҳосил бўлиши ва улар сток токида тасодифий шовқинни ҳосил қилиши мумкин. Диссертация ишида бундай шовқинлар амплитудасининг транзистор геометрик ўлчамлари ва канал шаклининг флуктуациясига боғлиқлиги ҳам моделлаштирилган. Ўлчашларда ТТШ амплитудаси стационар ҳолатда, яъни якка заряд оксиддаги (ёки чегарадаги) нуқсонларда ушланиб турган ҳолатда, қуйидаги формула ёрдамида ҳисобланди:

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

бу ерда I - нуқсонда заряд қамралган ҳолатдаги сток токи, I_0 - оксид қатламида заряд қамралмаган ҳолатдаги сток токи. Диссертация ишида ўрганилаётган майдоний транзисторлар, хусусан, ИУК FinFET транзисторларининг характеристикалари TCAD Sentaurus дастури ёрдамида моделлаштирилган. Ушбу ишда ўрганилаётган транзисторни моделлаштиришда классик диффузион-дрейф транспорт моделидан фойдаланилди.

Диссертациянинг «FinFET транзисторларида сток томонидан индуцирланган тўсиқ камайиши (DIBL) эффектига транзистор

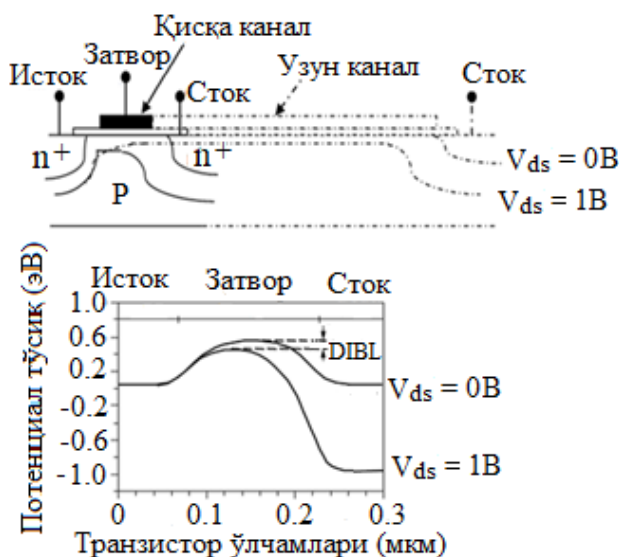
ўлчамларининг таъсири» деб номланган учинчи бобида FinFET транзисторларида DIBL эффектининг транзистор канал шакли, канал ости оксид қатлам қалинлиги, затвор ён томони қалинлиги, исток ва сток соҳаларини затвор ости оксид қатлам билан қопланиш даражасига боғлиқликлари ўрганилган.

Вертикал транзисторларда юзага келиши мумкин бўлган технологик флуктуацияларнинг бир тури бу кўп затворли транзистор каналнинг тепа қисмининг торайишидир. Бу таъсирни ўрганиш учун затвор узунлиги 25 нм, затвор ости оксид (SiO_2) қатлами қалинлиги 1.5 нм бўлган кремний асосидаги ИУК FinFET транзисторнинг 6 та канал шакли кўрилди. p-тип канал акцептор билан 10^{15} см^{-3} концентрациягача ва n-тип исток/сток соҳалар донорлар билан 10^{20} см^{-3} концентрациягача легирланган ҳоллар олинди. Моделлаштирилаётган кремнийли транзистор канал баландлиги 30 нм ва кенглиги 12 нм ни ташкил қилади. Бизнинг мақсадимиз каналнинг тепа қисми тораймаган асосий транзистор характеристикасини канал тепа қисми кетма-кет торайиб борганда сирт қисми йўқолиб, унинг кўндаланг кесими учбурчак шаклида бўладиган ҳолларгача бўлган транзисторлар характеристикалари билан таққослашдан иборат эди (расм 2). DIBL эффектга канал шаклининг сезиларли таъсири аниқланди ва канални тепа қисмининг торайиши билан ушбу эффектнинг камайиши кузатилди. Диссертация ишида изолятор устидаги кремний технологияси асосида тайёрланган вертикал майдоний транзисторлардаги DIBL эффектга канал остидаги оксид қатламининг қалинлиги T_{box} нинг таъсири ҳам моделлаштирилган. Бунда ҳам каналнинг учта шакли, яъни кўндаланг кесими тўртбурчак, трапеция ва учбурчак шаклида бўлган ҳоллар таққосланган. Моделлаштириш натижаларидан кўриниб турибдики, DIBL эффект нафакат канал шаклига, балки канал ости оксид қатлами қалинлигига ҳам боғлиқ бўлар экан. Паразит сиғимлар, тузилманинг геометрик ўлчамлари ўзгарганда, ўзгариши мумкин. Шу сабабдан DIBL эффектининг тузилма сиғимларига боғлиқлигини аниқлаш мақсадида затвор билан исток орасидаги сиғимнинг канал ости оксид қатлами қалинлигига боғлиқлиги ҳам моделлаштирилди. Моделлаштириш натижалари шуни кўрсатадики, кўриляётган затвор-исток орасидаги сиғимининг T_{box} га боғлиқлиги, транзистор каналнинг барча шакллари учун, DIBL эффектнинг ўзгариши билан корреляцияга эга.

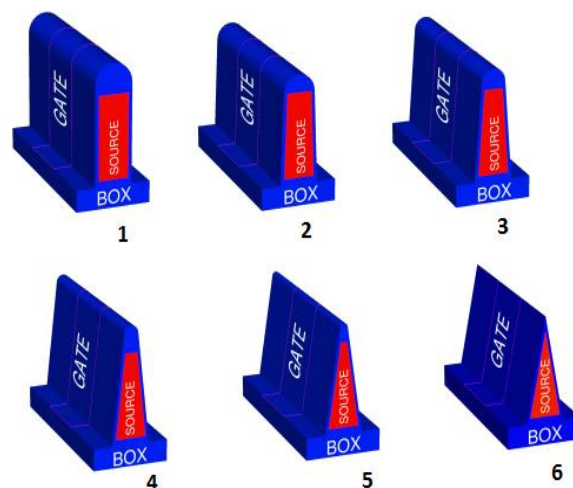
Диссертация ишида канали турли шаклларда бўлган ИУК FinFET транзистори затворининг ён томонга кенгайиши W_{gext} нинг бўсага кучланиши ва DIBL эффектга таъсири моделлаштирилган. Натижалардан келиб чиқадики энг катта бўсага кучланиши каналнинг кўндаланг кесими учбурчак шаклдаги ҳоли учун кузатилади, ва у учбурчак ва трапецоидал кесимлар учун ўрганилган W_{gext} нинг қийматларида деярлик ўзгармайди.

Бўсага кучланиши каби DIBL эффект ҳам канал кўндаланг кесими шаклига боғлиқ бўлиб, унинг энг кичик қиймати учбурчак ва энг катта қиймати тўғри тўртбурчак кўндаланг кесимли канал шакли учун кузатилади. Барча шаклдаги кесимлар учун W_{gext} ортиши билан DIBL эффект монотон камаяди.

Кузатилаётган V_{th} ва DIBL нинг ўзгаришлари исток (сток) ва затвор орасидаги сиғимларнинг ўзгаришлари билан боғлиқдир.



1-расм. DIBL эффекти, яъни канал узунлиги кичрайиши туфайли тўсиқ баландлигини камайиши.



2-расм. Канал тепасининг кенглиги турлича бўлган моделлаштирилаётган ИУК FinFET транзистори. Кўндаланг кесими шакли тўртбурчакдан (тепа кенглиги максимал бўлган 1-тузилма) учбурчак шаклгача (тепа кенглиги 0 бўлган 6-тузилма).

Транзисторнинг паразит сиғимлари, жумладан затвор ости оксид қатлами узунлигига боғлиқ бўлган исток (сток) ва затвор орасидаги боғланиш сиғими транзистор характеристика ва параметрларига таъсир қилади. Затвор ости оксид қатлами узунлиги L_{goxext} нинг ИУК FinFET даги DIBL эффектига таъсири ҳам ўрганилган.

«Наноўлчамдаги ИУК FinFET транзистор ўтиш характеристикаси ва электрофизик параметрларига транзистор геометриясининг ва чегаравий нуқсоннинг таъсири» деб номланган тўртинчи бобда ИУК FinFET транзисторининг канал шаклининг электрофизик параметрларга таъсири, ўтиш хатактеристикаси қиялигининг канал ости оксид қатлами қалинлигига боғлиқлиги, затвор ён томони кенгайишининг ИУК FinFET ўтиш характеристикаси қиялигига, затвор ости оксид қатламининг затвор остидан ташқарига узайшининг SS га таъсири ва ИУК FinFET транзисторида тасодифий телеграф шовқин амплитудаси ва унинг канал шаклига боғлиқ-лиги ўрганилган. Канал кўндаланг кесим шакли тўғри тўртбурчак ва трапеция бўлган ИУК FinFET транзистор каналининг юқори ва ён сиртида қамралган якка нуқсоннинг канал бўйлаб турли вазиятларида DIBL эффекти ва SS га таъсири аниқланган. Асосий натижаларни ифодалаш учун юқорида кўрсатилган параметрларини моделлаштириш натижалари канал кўндаланг кесими периметрига ва канал кўндаланг кесими юзасига нормалаштирилган ҳоллари мос равишда 1-жадвал ва 2-жадвалда келтирилган. Юзага

нормаланган I_{on} барча транзисторлар учун деярлик бир хил қийматларда эканлиги кўринади. Периметр бўйича нормаланган I_{on} қиймат-лари эса фарқ қилади. Бу шуни кўрсатадики, шакл ўзгарганда тўйиниш соҳасида токининг ортиши фақат исток (сток) нинг канал билан контакт юза сиртининг ортиши билан боғлиқ.

1-жадвал.

Канал периметрига нормалаштирилган бўсаға кучланиши, ёпиқ ток, очик токи ва бўсағадан паст соҳа қиялиги.

Намуна.	V_{th} (мВ)	$\text{Log}_{10}(I_{off}(\text{А/нм}))$	$\text{Log}_{10}(I_{on}(\text{А/нм}))$	SS (мВ/дек)
1	159	-9.58	-6.53	85.7
2	173	-9.78	-6.55	82.8
3	186	-9.99	-6.58	80.8
4	201	-10.2	-6.63	79.2
5	215	-10.4	-6.68	78.4
6	230	-10.5	-6.75	78.1

2-жадвал.

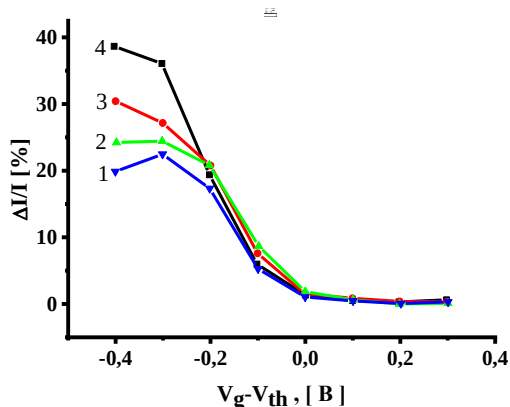
Канал юзасига нормалаштирилган бўсаға кучланиши, ёпиқ ток, очик токи ва бўсағадан паст соҳа қиялиги.

Намуна.	V_{th} (мВ)	$\text{Log}_{10}(I_{off}(\text{А/нм}^2))$	$\text{Log}_{10}(I_{on}(\text{А/нм}^2))$	SS (мВ/дек)
1	156	-9.90	-6.85	85.5
2	169	-10.1	-6.84	81.9
3	181	-10.2	-6.83	80.6
4	180	-10.4	-6.83	79.2
5	198	-10.5	-6.83	78.3
6	203	-10.6	-6.83	77.9

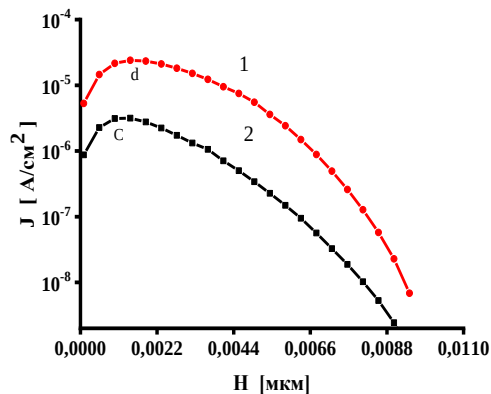
Диссертация ишида канал шаклининг ИУК FinFET транзистор ўтиш вольтампер характеристика тиклигига таъсири ва унинг канал ости оксид қатлами калинлиги T_{box} га боғлиқлиги моделлаштирилган. T_{box} нинг бутун ўзгариш соҳасида SS нинг қийматлари тўғри тўртбурчак кесимли канал шакли учун трапеция ва учбурчак кесимли шаклга нисбатан каттароқ қийматларга эга. SS канал бўйлаб исток билан сток орасидаги потенциал тақсимотига боғлиқ. Потенциал тақсимоти эса ўз навбатида турли паразит сиғимларга боғлиқ ва улар транзистор тизилмасининг геометрик ўлчамларининг ўзгариши қараб ўзгариши мумкин. Бунинг сабабини янада чуқурроқ ўрганиш учун каналдаги потенциал тақсимоти каналнинг турли шакллари учун ўрганилди. Натижалардан кўриниб турибдики, учбурчак кесимдан тўғри тўртбурчак шаклдаги кесимга ўтишда потенциал бутун ўрганилган соҳада сезиларли ортади, ва демак, затворда кучланиш ўзгариши, тўғри тўртбурчакли кесимда, каналдаги потенциалнинг каттароқ ўзгариш-ларига олиб келади. Бундай бўлишига сабаб затвор томонидан каналдаги ток транспорти учбурчак кўндаланаг кесимли ҳолда яхшироқ назорат қилинадиган бўлиши мумкин,

чунки учбурчак кесимда тўғри тўртбурчак кесимга нисбатан канал затвор билан самаралироқ қамралган бўлади.

Диссертацияда турли канал шаклидаги ИУК FinFET транзистор затворининг ён томонга кенгайиши W_{gext} нинг SS га таъсири моделлаштирилган. Натижалардан кўриниб турибдики, SS қиймати канал кўндаланг кесим шаклига боғлиқ. W_{gext} нинг бутун кўрилган соҳасида унинг энг кичик қиймати учбурчак шаклдаги кўндаланг кесим ҳоли учун ва энг катта қиймати тўғри тўртбурчак шаклдаги кўндаланг кесим учун кузатилади. Диссертация ишида затвор ости оксид қатламининг узунлиги ўзгариши L_{goxext} нинг вертикал майдоний ИУК FinFET транзистор ўтиш характеристикасига, жумладан, унинг бўсагадан паст ўтиш характеристикасини қиялигини белгилайдиган SS параметрга таъсири моделлаштириш орқали ўрганилди ва назарий таҳлил қилинди. МОЯ транзистор ўлчамларининг камайиши билан турли тақсимотлар флуктуацияларининг транзистор характеристикасига таъсири кучаяди. Хусусан наноўлчамли транзисторларда якка чегаравий нуқсон сток токининг ўзгаришига, яъни тасодикий телеграф шовқин (ТТШ) ҳосил бўлишига олиб келиши мумкин. Буни ўрганиш мақсадида изолятор устида кремний технологияси асосида шакллантирилган турли канал шаклига эга бўлган ИУК FinFET транзистор каналининг затвор ости оксид билан чегараланган тепа сирти ва ён томон сирти марказидаги нуқсонда қамралган якка заряд томонидан индуцирланган ТТШ сигнал амплитудаси моделлаштирилган. Транзисторнинг икки турдаги канал шакллари, яъни тўғри тўртбурчак ва трапецеидал кўндаланг кесимли шакллар учун ТТШ сигнал амплитудасининг затвор кучланиши V_g нинг бўсага кучланиш V_{th} дан фарқи ($V_g - V_{th}$) га боғлиқлигини моделлаштириш натижалари 3-расмда келтирилган. Натижалардан кўринадики, канал юқори (3 а-расмда, берилган 1, 2) ва ён тамон (3а-расмда, берилган 3, 4) сирти ўртасидаги нуқсонларда қамралган бирлик заряд томонидан ҳосил қилинган ТТШ амплитудаси бўсағавий ва ундан кичик кучланишларда бўсагадан юқори кучланишлардагига нисбатан сезиларли даражада юқори бўлар экан. Бундан ташқари тўғри тўртбурчак ва трапецеидалкўндаланг кесимларда ҳам якка зарядланган нуқсон канал ён сиртида қамралган ҳолда ТТШ сигнал амплитудаси юқорироқ бўлади. Бу канал кўндаланг кесимида максимал ток зичлиги соҳаси зарядланган нуқсонга трапецеидал кесимли ҳолда яқинроқ эканлиги билан боғлиқ (3а-расм кўшимчаси). Зарядланган нуқсон канал юқори сиртида жойлашганда эса ТТШ сигнал амплитудаси тўғри тўртбурчакли ҳолда юқорироқ бўлади. Бу иккита кесим ҳоллари учун канал-даги токнинг баландлик бўйича тақсимоти фарқи билан боғлиқ (3б-расм).



а)



б)

3-расм. Якка чегаравий заряд қамралган ҳолда ТТШ сигнал амплитудасининг затвордаги кучланишнинг бўсаға кучланишдан фарқиға боғланиши. (а) трапецеидал (1,4) ва тўғри тўртбурчак (2,3) кўндаланг кесимли транзистор канали юқори сиртининг (1,2) ва ён сиртининг (3,4) ўртасида. Қўшимча расмда канал кесимининг тўртбурчак шаклдан трапецеидал шаклга ўтишида якка заряднинг максимал ток зичликли соҳа А га яқинлашиши кўрсатилган. (б) Тўғрибурчакли (1) ва трапецеидал (2) кўндаланг кесимли канал учун ток зичлигининг канал ўртасида баландлик Н бўйича тақсимланиши.

ХУЛОСА

Нанометр ўлчамлардаги изолятор устида кремний технологияси асосидаги изоляцияланган затворли вертикал майдоний транзисторлар характеристикаларига, улардаги қисқа каналли эффектларга технологик флукутациялардан келиб чиқадиган транзистор ўлчамлари, шакли ўзгаришининг ва оксид - яримўтказгич чегараси ва оксид қатламида қамралган якка заряднинг таъсирини моделлаштириш ва назарий таҳлил қилиш бўйича олинган натижалар асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Затвор узунлиги 25 нм бўлган FinFET транзисторининг канали турли шаклларда бўлган ҳоллар учун бўсағадан паст ўтиш вольтампер характеристикаси қиялиги SS ва DIBL эффекти моделлаштириш орқали биринчи бор тоққосланган ва канал кўндаланг кесими учбурчак шаклда бўлган транзистор учун SS ва DIBL эффект энг кичик эканлиги аниқланган. Бу учбурчак кесимли каналда бошқа шаклларга нисбатан каналдаги потенциал тақсимоти стокдаги кучланишга нисбатан затвордаги кучланиш томонидан кучлироқ бошқарилиши билан боғлиқ.

2. FinFET транзисторларда DIBL эффект канал шаклидан ташқари канал ости оксид қатламининг қалинлиги T_{box} га ҳам боғлиқ эканлиги кўрсатилган. Энг кичик DIBL эффект канал кўндаланг кесими учбурчак шаклдаги транзистор учун кузатилган. DIBL эффектнинг бундай ўзгаришлари канал ости оксид қатлами қалинлигининг затвор ва исток орасидаги сиғимга таъсири билан боғлиқ.

3. Биринчи бор турли канал шаклига эга FinFET транзисторларда бўсаға кучланиши, SS ва DIBL эффектига затворнинг ён томонга кенгайиши W_{gext}

нинг таъсири моделлаштириш орқали ўрганилган. Затвор кенглигининг 10 нм гача қийматларида барча канал шакллари учун бўсаға кучланиши деярли ўзгармаслиги, SS ва DIBL эффекти эса W_{gext} ортиши билан секин ва чизиқли камайиб 10нм га етганда тахминан 10% гача камайиши кўрсатилган.

4. FinFET транзисторларида DIBL эффекти ва SS нинг затвор ости оксид қатлами затвордан ташқаридаги узунлиги L_{goxext} га боғлиқлиги биринчи марта ўрганилган. $L_{\text{goxext}} = 2$ нм гача қийматларда DIBL ва SS нинг камайиши ва ундан каттароқ қийматларда унинг ортиши аниқланган. DIBL ва SS нинг L_{goxext} га боғлиқлиги учта ўрганилган канал шакллари учун ҳам ўхшаш бўлиб, уларнинг энг кичик қийматлари канал кесими учбурчак шакли ва энг катта қийматлари тўртбурчак шакли учун кузатилиши аниқланган. DIBL ва SS нинг L_{goxext} га бундай боғлиқлиги затвор-исток боғланиш сиғимининг ўзгариши билан тушунтирилади.

5. FinFET транзистор канал ости оксид қатламининг қалинлиги T_{box} ортиши билан бўсағадан паст ўтиш характеристикасининг қиялиги SS ортиши ва катта қийматларида тўйинишга эришиши аниқланган. SSнинг бундай ўзгаришлари затвор-сток орасидаги сиғимнинг T_{box} га боғланиш қонуниятига мос тушиши билан тушунтирилган.

6. FinFET транзисторида тасодифий шовқин амплитудаси якка зарядланган нуқсоннинг транзисторнинг тўғри тўртбурчак шаклдаги канал тепасидаги оксид-яримўтказгич чегараси ўртасида қамралганда, трапеция шаклидаги кесимли канал учун эса каналнинг ён томони ўртасида оксид-яримўтказгич чегарасида қамралганда каттароқ бўлиши аниқланган.

7. Канал кесим шакли тўғри тўртбурчак ва трапеция бўлган FinFET транзисторларида ТТШ сигнал амплитудасининг канал бўйлаб канал тепа ва ён сиртининг ўртасида зарядланган чегаравий якка нуқсоннинг жойлашиш вазиятига боғлиқлиги моделлаштирилди. Максимал сигнал амплитудаси иккала канал шакли ва иккала сирт учун ҳам якка зарядланган нуқсон канал ўртасида жойлашганда кузатилиши аниқланган.

8. Транзисторнинг иккита кўндаланг кесим шакли учун ҳам, зарядланган якка нуқсоннинг канал тепаси ва ён сиртида канал бўйлаб жойлашиш вазияти истокдан сток томонга яқинлашиши билан, DIBL эффектининг камайиши ва SSнинг ортиши аниқланди. Ва якка заряднинг канал тепа ва ён сиртида қамралганда DIBL эффекти ва SS трапеция канал кесими шаклига нисбатан, тўғри тўртбурчак бўлган шаклдаги транзисторда юқорироқ эканлиги аниқланди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРО-
НИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА УЗБЕКИСТАНА**

УРГЕНЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АБДИКАРИМОВ АЗАМАТ ЭГАМБЕРГАНОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ФЛУКТУАЦИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОРАЗМЕРНОГО
ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С
ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ**

01.04.10 – «Физика полупроводников»

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

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2019.1.PhD/FM120.

Докторская диссертация выполнена в Ургенческом государственном университете.

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

Научный руководитель: Юсупов Ахмед
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Каримов Иброхим Набиевич
доктор физико-математических наук
Аюханов Рашид Ахмедович
доктор физико-математических наук

Ведущая организация: Академия Наук Республики Узбекистан
по Физико-Технический Институт

Защита диссертации состоится «27» май 2021 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № 24) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59

Автореферат диссертации разослан «10» май 2021 г.
(реестр протокола рассылки № 24 от 10 май 2021 г.).



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

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

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день в мире наноразмерные полевые транзисторы используются как один из основных элементов выполняющих функцию памяти в оборудовании и устройствах электронной техники и интегральных схемах. И сегодня требования предъявляемые к таким устройствам исходя из потребностей населения растут с каждым днём. И очень важными среди них являются повышение степени функциональности, быстродействия и энергосбережения.

В мире наряду с биполярными транзисторами проводятся исследования по существенному увеличению степень интеграции интегральных схем и существенному уменьшению их энергопотребления путем доведения размеров полевых транзисторов с изолированным затвором - МОП (металл-оксид-полупроводник) транзисторов до нанометровых масштабов. В связи с этим обращается особое внимание раскрытию причин влияния на характеристики транзистора различных деградиационных эффектов возникающих при уменьшении размеров до нанометровых масштабов, исследованию закономерностей влияния флуктуации геометрических размеров, случайных единичных дефектов на электрофизические параметры, характеристики и короткоканальные эффекты нанометровых МОП транзисторов (FinFET, Fin field-effect transistor).

В Республике Узбекистан по развитию науки, в частности физики полупроводниковых приборов и электроники планируются мероприятия стратегической государственной и экономической важности и уделяется большое внимание. В этом плане учеными республики достигаются важные результаты по получению новых полупроводниковых материалов, структур на их основе и влиянию различных воздействий на их характеристики. В стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы указаны задачи стимулирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, развитие энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии. В этом аспекте важным является разработка новых материалов электронной техники и структур на их основе, стойких к различным воздействиям и эффективных методов контроля их параметров.

Данное диссертационное исследование в соответствующей степени способствует реализации задач, обозначенных в постановлениях Президента Республики Узбекистан ПП-4348 «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 и ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук,

организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

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

Степень изученности проблемы. К настоящему времени почти 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 геометрии транзистора и электрофизических параметров от формы канала, но почти не были исследованы влияние размеров различных слоев и формы канала на короткоканальные эффекты. Японские ученые D.Hisamoto, T.Kaga, Y.Kawamoto и E.Takeda для достижения требуемых характеристик нанометровых транзисторов предложили вместо планарных транзисторов новые вертикальные полевые транзисторы с изолированным затвором. Однако в этих транзисторах из-за уменьшения геометрических размеров наблюдается увеличение разных паразитных емкостей. Для уменьшения паразитных емкостей между затвором и истоком, учеными США С. Auth и J. Markoff был предложен трехзатворный вертикальный полевой транзистор. A.G.Lougero и его сотрудники исследовали влияние технологических флуктуаций на параметры и характеристики, в частности на пороговое напряжение, открытый и закрытый ток стока полевых наноразмерных транзисторов. Российскими учеными Н.В.Масальским, Ю.А. Чаплыгиным, М.А. Королевым и другими исследовалось влияние материала затвора на пороговое напряжение и зависимость характеристик двухзатворного транзистора от структуры транзистора. Однако почти не исследовалось влияние формы канала, геометрических размеров разных частей и единичного заряда захваченного в диэлектрическом слое и на границе раздела диэлектрик-полупроводник на вольтамперные характеристики и короткоканальные эффекты вертикальных полевых трехзатворных транзисторов с изолированным затвором.

Учеными Узбекистана проводились исследования характеристик структур металла-диэлектрик-полупроводник и полевых транзисторов с изолированным затвором. Но в этих работах не рассматривались характеристики и параметры наноразмерных многозатворных полевых вертикальных транзисторов и влияние технологических флуктуаций, в частности формы канала, на эти характеристики и параметры.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где

выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научного проекта по фундаментальным исследованиям Ургенческого государственного университета ОТ-Ф2-67 «Новый подход к методу исследования природы и латерального распределения дефектов на границе диэлектрик-полупроводник» (2017-2020).

Целью исследования является определение: влияния технологических флуктуаций геометрических размеров на характеристики и короткоканальные эффекты, единичных заряженных дефектов в диэлектрическом слое или на границе диэлектрик-полупроводник на амплитуду случайных телеграфных шумов полевых вертикальных транзисторов на основе технологии кремний на изоляторе.

Задачи исследования:

сравнение электрофизических параметров таких, как ток стока в закрытом и открытом состояниях и пороговое напряжение вертикальных трехзатворных полевых транзисторов с изолированным затвором (FinFET, Fin field-effect transistor) с различной формой канала;

сравнение эффекта уменьшения барьера, индуцированного стоком (DIBL, Drain-induced-barrier lowering) и наклона подпороговой передаточной характеристики (SS, subthreshold swing) вертикальных трехзатворных полевых транзисторов с изолированным затвором с различной формой поперечного сечения канала;

моделирование влияния толщины боковых затворов трехзатворного вертикального полевого транзистора с поперечным сечением канала в виде прямоугольника, трапеции и треугольника на короткоканальные эффекты;

исследование влияния увеличения толщины T_{box} скрытого оксидного слоя (BOX, buried oxide layer) трехзатворного вертикального полевого транзистора, основанного на технологии кремний на изоляторе (КНИ), с поперечным сечением канала в виде прямоугольника, трапеции и треугольника на короткоканальные эффекты;

исследование изменений DIBL и SS с увеличением длины подзатворного оксидного слоя в трехзатворном вертикальном полевом транзисторе на основе технологии КНИ;

исследование влияния встроенного на границе диэлектрик-полупроводник единичного заряженного дефекта на ток стока КНИ FinFET транзистора с поперечным сечением канала в форме прямоугольника и трапеции.

Объектом исследования являются двух и трехзатворные вертикальные полевые транзисторы с изолированным затвором на основе КНИ технологии.

Предметом исследования являются короткоканальные эффекты, наблюдаемые в двух и трехзатворных вертикальных полевых транзисторах с изолированным затвором на основе технологии КНИ и процессы влияния единичного заряженного дефекта встроенного на границе раздела диэлектрик-полупроводник на ток стока.

Методы исследований. В работе применены методы компьютерного численного моделирования и теоретико-аналитических расчетов электронных процессов. При аналитических расчетах емкостей различных частей транзистора и распределения потенциала в них, были использованы законы электростатики, в частности метод зеркальных изображений. При 3D моделировании применялась диффузионно-дрейфовая модель транспорта и использованы согласованные основные уравнения полупроводников такие как уравнение Пуассона и уравнение непрерывности. При исследовании транспорта носителей были использованы различные модели транспорта, в частности модели учитывающие 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 (Density gradient quantum correction). При компьютерном моделировании расчет распределения потенциала производился с использованием метода конечных элементов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые моделированием сравнен DIBL и SS для FinFET транзистора на основе технологии кремний на изоляторе с длиной затвора 25 нм для различных форм поперечного сечения канала, с учетом квантовой корректировки в транспортной модели, обнаружено, что наибольший DIBL и SS наблюдается для транзистора с поперечным сечением канала в виде прямоугольника;

установлено, что в FinFET транзисторах на основе технологии кремний на изоляторе с разной формой канала DIBL и SS увеличивается с увеличением толщины скрытого оксидного слоя T_{box} достигая насыщения при больших значениях T_{box} ;

впервые моделировано влияние бокового расширения затвора на пороговое напряжение, DIBL и SS FinFET транзистора на основе технологии кремний на изоляторе с различной формой канала и доказано, что при расширении затвора до 10 нм для всех форм канала величина порогового напряжения почти не изменяется, а DIBL и SS уменьшается на 10%;

впервые исследована зависимость DIBL и SS от длины подзатворного оксидного слоя вне затвора L_{goxext} FinFET транзистора на основе технологии кремний на изоляторе и обосновано, что до значений $L_{\text{goxext}} = 2$ нм DIBL эффект и SS уменьшаются, а при больших значениях увеличивается;

впервые установлено, что в FinFET транзисторах на основе технологии кремний на изоляторе максимальная амплитуда случайного телеграфного шума наблюдается при расположении единичного заряженного дефекта на поверхности середины потолка канала с прямоугольным поперечным сечением и при расположении в середине боковой поверхности в транзисторе с трапецеидальным поперечным сечением.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

полученные зависимости короткоканального DIBL эффекта от формы канала, толщины скрытого оксидного слоя, ширины затвора и длины подзатворного оксидного слоя наноразмерного FinFET транзистора на основе технологии кремний на изоляторе позволили на практике предварительно определить оптимальные геометрические размеры этих транзисторов не приводящие к сильной деградации при использовании их в интегральных схемах;

выявленные зависимости наклона подпороговой передаточной характеристики SS от формы канала, толщины скрытого оксидного слоя, ширины затвора и длины подзатворного оксидного слоя наноразмерного FinFET транзистора на основе технологии кремний на изоляторе позволили на практике предварительно определить оптимальные геометрические размеры этих транзисторов не приводящие к сильной деградации при использовании их в различных схемах ключа;

на основе результатов исследования влияния заряда захваченного на единичном дефекте на границе раздела диэлектрик-полупроводник на ток стока нанометрового FinFET транзистора на основе технологии кремний на изоляторе, можно экспрессным способом определить наличие дефектов на границе раздела диэлектрик-полупроводник посредством измерения амплитуды случайных телеграфных шумов.

Достоверность результатов исследования обосновывается использованием в диссертационной работе стандартной программы Technology Computer-Aided Design (TCAD) Sentaurus, в которых используемые физические модели калибровались с данными опубликованных экспериментальных результатов, а также применением общепризнанных, современных теоретических подходов физики полупроводников.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость исследований, заключается в формировании новых представлений о влиянии флуктуации геометрических размеров, и появившихся единичных заряженных дефектов на границе диэлектрик-полупроводник, возможных в технологическом процессе их получения, на характеристики и короткоканальные эффекты в наноразмерных FinFET транзисторах на основе технологии кремний на изоляторе.

Практическая значимость полученных результатов определяется тем, что установленная связь DIBL эффекта и SS с формой и размерами различных частей наноразмерного FinFET транзистора на основе технологии кремний на изоляторе, может быть использована для выбора оптимальной формы и размеров при технологическом процессе его получения, возможностью использования при экспрессной диагностике границы раздела диэлектрик-полупроводник определенной зависимости амплитуды случайного телеграфного шума от положения единичного граничного заряженного дефекта.

Внедрение результатов исследования.

На основе полученных научных результатов по моделированию влияния технологических флуктуаций на характеристики наноразмерных вертикальных полевых транзисторов с изолированным затвором:

научные выводы о квантовых корректировках по учету квантовых эффектов при моделировании характеристик наноразмерных вертикальных полевых транзисторов с изолированным затвором на основе технологии кремний на изоляторе, с использованием программы Technology Computer-Aided Design (TCAD) Sentaurus были использованы для оценки квантово-размерных эффектов в проекте ОТ-Ф2-28 “Квантово-размерные эффекты на поверхности и в объеме легированного кремния и их влияние на процессы фотогенерации и рекомбинации носителей заряда в р-п структурах” (справка № 89-03-4169 Министерства Высшего и среднего специального образования от 03.12.2018). Использование научных результатов позволило объяснить влияние квантовых эффектов на процессы фотогенерации носителей тока в р-п структурах;

результаты моделирования влияния флуктуаций геометрических размеров и формы на характеристики наноразмерного FinFET транзистора на основе технологии кремний на изоляторе, были использованы при моделировании продвинутых полевых транзисторов в проекте “Моделирование продвинутых полупроводниковых транзисторов и разработка средств расчета: использование для исследования флуктуации внутренних параметров” в центре Сигулярных исследований по Смарт технологиям (CITIUS) Университета Сантьяго де Компостелла (Испания) (справка от руководителя отдела Электроники и компьютерных наук центра CITIUS от 2019). Использование научных результатов способствовало моделированию влияния флуктуации внутренних параметров на характеристики наноразмерных полевых транзисторов, в частности вертикальных полевых транзисторов.

Апробация результатов исследований. Результаты данного исследования обсуждались на семинарах Ургенчского государственного университета, университета Лакуила (Италия) и докладывались на 4 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 9 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций и которые полностью отражают содержание диссертации, в частности 5 статей в зарубежных и 4 статьи в республиканских научных журналах.

Получены 2 свидетельства на программный продукт для использования на ЭВМ со стороны Агентства интеллектуальной собственности.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитированной литературы, 2 приложений, 118 страниц основного текста, включая 58 рисунка и 5 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 **“Тенденции развития и состояние физики полевых транзисторов с изолированным затвором”** на основе анализа литературных данных приведены сведения о физике полевых транзисторов с изолированным затвором. Рассмотрено большое количество работ связанных с исследованием нанометровых многозатворных полевых транзисторов с изолированным затвором, проанализированы проблемы масштабирования нанометровых полевых транзисторов с изолированным затвором. Исходя из анализа литературных данных выработаны требования к объекту исследования и сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе **“Короткоканальные эффекты, случайные телеграфные шумы в нанометровых полевых транзисторах и методы их моделирования”** описывается эффект ослабления барьера со стороны стока и метод его вычисления в короткоканальных FinFET транзисторах, описывается наклон переходной подпороговой характеристики и метод его вычисления в нанометровых FinFET транзисторах, рассмотрена сущность случайного телеграфного шума, его моделирования и метода его вычисления, излагаются возможности моделирования характеристик полевых транзисторов с помощью программы TCAD Sentaurus, описываются транспортные модели использованные при моделировании и приводятся результаты калибровки модели.

DIBL эффект определяется величиной 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} (Рис 1).

В диссертационной работе изучалось также влияние флуктуации геометрических размеров и формы канала на наклон подпороговой переходной характеристики. Для этого рассматривалась величина SS, обратная к крутизне переходной характеристики. SS определяется по следующей формуле:

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

здесь ΔV_g разность напряжений на затворе соответствующих пороговому V_{th} и закрытому состоянию. I_{th} ток стока соответствующий пороговому напряжению на затворе, I_{off} ток стока соответствующий закрытому состоянию 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. В диссертационной работе моделируется связь амплитуды случайных телеграфных шумов с флуктуацией геометрических размеров и формой канала. 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. В диссертационной работе исследуемый полевой транзистор, в частности характеристики FinFET КНИ FinFET транзистора моделировались с помощью программы TCAD Sentaurus. При моделировании исследуемых транзисторов использована классическая диффузионно-дрейфовая модель.

В третьей главе диссертации **“Влияние размеров транзистора на эффект уменьшения барьера индуцированного стоком (DIBL)”** исследуется взаимосвязь DIBL эффекта с формой канала, толщиной скрытого оксидного слоя, толщиной боковой стороны затвора и степенью перекрытия истоковой и стоковой областей затвором в КНИ FinFET транзисторах.

В вертикальных многозатворных транзисторах одним из видов флуктуаций является сужение потолка канала. Для исследования этого влияния рассматривались 6 разных форм канала кремниевого КНИ FinFET транзистора с длиной затвора 25 нм, толщиной подзатворного оксидного слоя 1.5 нм. Канал р-типа легирован акцептором с концентрацией до уровня 10^{15} см^{-3} , а истоковая/стоковая области п-типа легированы донорами с концентрацией до уровня 10^{20} см^{-3} . Высота канала моделируемого кремниевого транзистора

составляет 30 нм, а ширина 12 нм. Наша цель сравнить характеристики транзисторов с разным поперечным сечением, начиная с транзистора с прямоугольным сечением до транзистора с треугольным поперечным сечением (рис. 2). Наблюдалось заметное влияние формы канала на DIBL эффект и его уменьшение с сужением потолка канала. В диссертационной работе также моделировалось влияние толщины скрытого оксидного слоя T_{box} на DIBL эффект в вертикальном полевом транзисторе изготовленного на основе технологии кремний на изоляторе.

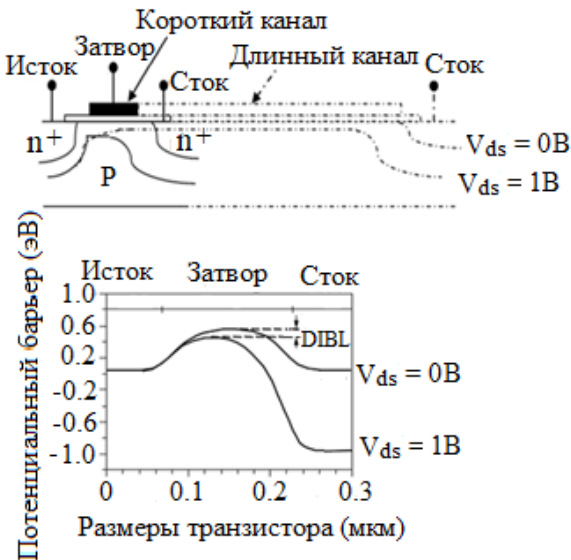


Рис. 1. DIBL эффект, уменьшение потенциального барьера с уменьшением длины канала.

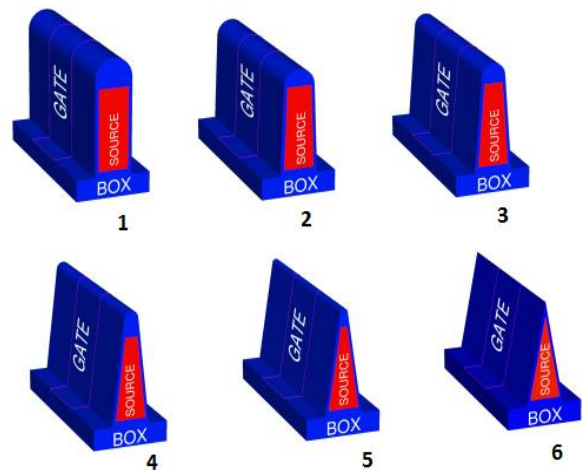


Рис. 2. Моделируемый КНИ FinFET транзистор с различной шириной потолка. Поперечное сечение канала трансформировано от прямоугольной (1-структура с максимальной шириной потолка) до треугольной (6-структура с нулевой шириной потолка) формы.

В этом случае также сопоставлялись три варианта поперечного сечения канала транзистора: треугольного, трапецидального и прямоугольного. Из результатов видно, что DIBL эффект зависит также от толщины скрытого оксидного слоя. Паразитные емкости могут изменяться при изменении геометрических размеров. Поэтому для исследования связи емкостей и DIBL эффекта моделировалась также зависимость емкости между затвором и истоком от толщины скрытого оксидного слоя. Результаты моделирования показывают, что зависимость емкости между затвором и истоком от толщины скрытого оксидного слоя T_{box} коррелирует с изменениями DIBL эффекта для всех форм канала транзистора. В диссертационной работе моделировалось влияние бокового расширения затвора W_{gext} на пороговое напряжение и DIBL эффект в транзисторе с различной формой канала. Из результатов следует, что наибольшее пороговое напряжение наблюдается для транзистора с треугольным поперечным сечением канала и для этого, а также для

трапецеидального сечения, оно почти не изменяется в рассмотренном диапазоне изменений значения W_{gext} . DIBL эффект, так же как и пороговое напряжение, зависит от формы поперечного сечения канала и его минимальное значение наблюдается для треугольного, а наибольшее при прямоугольном поперечном сечении канала. При этом для всех видов сечений DIBL эффект монотонно уменьшается с увеличением W_{gext} .

Наблюдаемые изменения V_{th} и DIBL эффекта связаны с изменениями емкости между истоком (стоком) и затвором. Паразитные емкости транзистора, в частности емкость между истоком (стоком) и затвором, зависящая от длины оксидного слоя, влияет на характеристики и параметры транзистора. Исследовано влияние длины подзатворного оксидного слоя L_{goxext} на DIBL эффект в КНИ FinFET транзисторе.

В четвертой главе диссертации “Влияние геометрии и граничных дефектов на переходные характеристики и электрофизические параметры наноразмерного КНИ FinFET транзистора” исследовано влияние формы канала КНИ FinFET транзистора на электрофизические параметры, связь наклона переходной характеристики и толщины скрытого оксидного слоя, влияние бокового расширения затвора и удлинения подзатворного оксидного слоя на наклон переходной характеристики, амплитуда случайного телеграфного шума и его связь с формой канала КНИ FinFET транзистора. Определено влияние единичного дефекта, встроенного на верхней и боковой поверхности канала, при его различных положениях вдоль канала на DIBL эффект и SS КНИ FinFET транзистора с прямоугольным и трапецеидальным поперечными сечениями.

Для формулирования основных результатов результаты моделирования параметров нормировались на периметр и площадь поперечного сечения канала и они приведены, соответственно, в таблице 1 и таблице 2. Видно, что I_{on} , нормированный на площадь поперечного сечения почти одинаковый для всех транзисторов. А значения I_{on} , нормированные на периметр отличаются для различных транзисторов. Это показывает, что увеличение тока стока в области насыщения связано только с увеличением площади контакта истоковой (стоковой) областей с каналом. В диссертационной работе моделировалось также влияние формы канала на наклон переходной характеристики и его зависимость от толщины скрытого оксидного слоя T_{box} КНИ FinFET транзистора. Во всем рассмотренном диапазоне T_{box} значения SS больше при прямоугольном сечении, чем при трапецеидальном или треугольном сечениях. SS зависит от распределения потенциала вдоль канала от истока до стока. А распределение потенциала зависит от различных паразитных емкостей и они могут изменяться с изменением геометрических размеров транзисторной структуры.

Таблица 1

Пороговое напряжение, ток стока закрытого, открытого состояния и наклон подпороговой передаточной характеристики, нормированный на периметр поперечного сечения канала различной формы

Образец.	V_{th} (мВ)	$\text{Log}_{10}(I_{off}(\text{А/нм}))$	$\text{Log}_{10}(I_{on}(\text{А/нм}))$	SS (мВ/дек)
1	159	-9.58	-6.53	85.7
2	173	-9.78	-6.55	82.8
3	186	-9.99	-6.58	80.8
4	201	-10.2	-6.63	79.2
5	215	-10.4	-6.68	78.4
6	230	-10.5	-6.75	78.1

Таблица 2

Пороговое напряжение, ток стока закрытого, открытого состояния и наклон подпороговой передаточной характеристики, нормированный на площадь поперечного сечения канала различной формы.

Образец.	V_{th} (мВ)	$\text{Log}_{10}(I_{off}(\text{А/нм}^2))$	$\text{Log}_{10}(I_{on}(\text{А/нм}^2))$	SS (мВ/дек)
1	156	-9.90	-6.85	85.5
2	169	-10.1	-6.84	81.9
3	181	-10.2	-6.83	80.6
4	180	-10.4	-6.83	79.2
5	198	-10.5	-6.83	78.3
6	203	-10.6	-6.83	77.9

Чтобы детальнее изучить причины этого, рассматривалось распределение потенциала в канале для различных форм канала. Из результатов видно, что при переходе из треугольного сечения к прямоу-гольному во всем диапазоне рассмотрения потенциал значительно увеличи-вается и следовательно, изменение напряжения на затворе в транзисторе с прямоугольным поперечным сечением канала приводит к большему измене- нию потенциала в канале. Причиной этому может быть лучший контроль над током стока в случае треугольного поперечного сечения, чем прямоугольного, что связано более эффективным покрытием канала затвором в случае треугольного поперечного сечения. В диссертации моделировано влияние бокового расширения затвора W_{gext} на SS для КНИ FinFET транзисторов с различной формой канала. Из результатов видно, что во всем диапазоне изменений W_{gext} значение SS зависит от формы канала и его наименьшее значение наблюдается для треугольного и наибольшее для прямоугольного поперечного сечения канала.

В диссертационной работе моделировано и теоретически анализировано влияние изменений длины оксидного слоя (покрытия) L_{goxext} на переходную характеристику КНИ FinFET транзистора, в частности SS параметр, характеризующий наклон этой характеристики.

С уменьшением размеров МОП транзисторов влияние флуктуаций различных распределений на характеристики транзистора усиливается. В частности, в наноразмерных транзисторах единичный граничный заряженный дефект может изменить ток стока, то есть привести к появлению случайного телеграфного шума (СТШ). В связи с этим проводилось моделирование амплитуды СТШ сигнала индуцированного единичным заряженным дефектом расположенным в центре потолочной и боковой поверхности канала граничащем с подзатворным оксидом в КНИ FinFET транзисторе с различной формой канала.

Моделирована зависимость амплитуды СТШ от разности затворного V_g и порогового V_{th} напряжений ($V_g - V_{th}$) для двух форм канала транзистора, прямоугольного и трапецеидального поперечного сечения (рис.3).

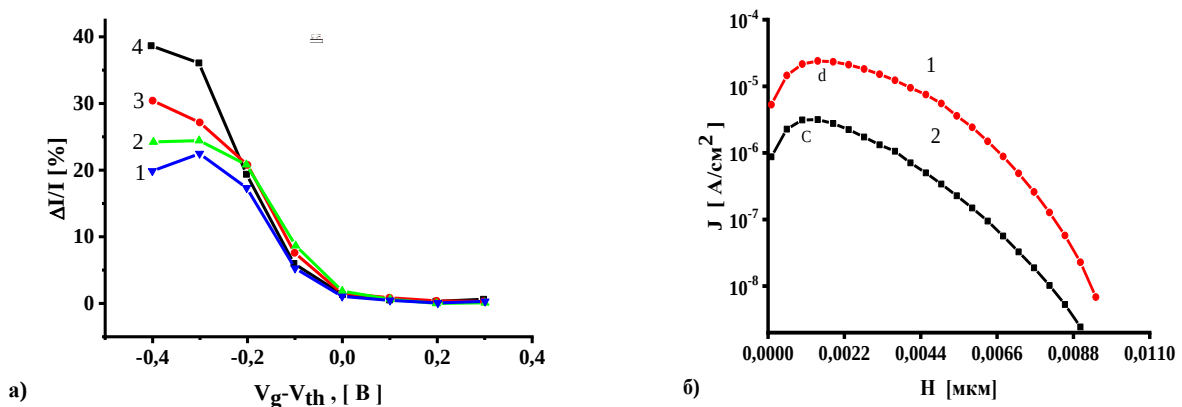


Рис. 3. (а) зависимость амплитуды СТШ сигнала от разности затворного и порогового напряжений для трапецеидального (1,4) и прямоугольного(2,3) поперечного сечений канала при локализации единичного заряженного дефекта на потолочной (1,2) и боковой (3,4) поверхности канала. Во вставке показано приближение единичного заряженного дефекта к области максимальной плотности тока A в канале при переходе от прямоугольного к трапецеидальному сечению. (б) распределение плотности тока J по высоте канала H для прямоугольного (1) и трапецеидального (2) сечений.

Из результатов видно, что амплитуда СТШ сигнала значительно больше при напряжениях ниже порогового, чем при больших напряжениях, как в случае расположения на потолочной (рис. 3, кривые 1, 2), так и на боковой (рис 3, кривые 3, 4) поверхности канала. Кроме этого, как в прямоугольного, так и трапецеидального поперечного сечения большая амплитуда СТШ сигнала наблюдается в случае расположения единичного дефекта на боковой поверхности канала. Это связано с меньшим расстоянием от области максимальной плотности тока в поперечном сечении канала до заряженного единичного дефекта, расположенного на боковой поверхности, в случае трапецеидального, чем в случае прямоугольного сечения (вставка на рис.3а). В то же время в случае расположения единичного заряженного дефекта на потолочной поверхности большая амплитуда СТШ наблюдается в случае

прямоугольного сечения, что связано с распределением плотности тока по высоте по сечению канала (рис.3б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов моделирования и исследований влияния изменения размеров, формы транзистора, вызванных технологическими флуктуациями и влияния единичного заряда, встроенного на границе раздела оксид-полупроводник и оксидном слое на характеристики и короткоканальные эффекты в нанометровых вертикальных полевых транзисторах с изолированным затвором на основе технологии кремний на изоляторе сделаны следующие выводы:

1. Впервые проведено сравнение наклона подпороговой переходной характеристики SS и DIBL эффекта FinFET транзистора с длиной канала 25 нм для различных форм канала и определено, что наименьшие SS и DIBL эффект наблюдаются для транзистора с треугольным поперечным сечением канала. Это связано с более сильным управлением распределения потенциала в канале напряжением на затворе при треугольном сечении канала, чем при других сечениях.
2. Показано, что в FinFET транзисторах DIBL эффект, кроме формы канала, зависит также от толщины скрытого оксидного слоя T_{box} . Установлено, что наименьший DIBL эффект наблюдается для транзистора с треугольным сечением канала. Такое поведение DIBL эффекта связано с влиянием толщины скрытого оксидного слоя на емкость между затвором и истоком.
3. Впервые моделированием исследовано влияния бокового расширения затвора W_{gext} на пороговое напряжение, SS и DIBL эффект FinFET транзистора с различной формой канала. Показано, что до значений ширины затвора 10 нм для всех форм канала, пороговое напряжение почти не изменяется, а SS и DIBL эффект линейно уменьшаются с увеличением W_{gext} , уменьшаясь на 10% при достижении боковой ширины затвора 10 нм.
4. Впервые исследована зависимость DIBL эффекта и SS в FinFET транзисторах от длины подзатворного оксидного слоя вне затвора L_{goxext} . Установлено уменьшение DIBL эффекта и SS при значениях L_{goxext} до 2 нм и дальнейшее увеличение при больших значениях L_{goxext} . Показано, что зависимости DIBL эффекта и SS от L_{goxext} схожи для всех рассмотренных форм канала и их наименьшее значение достигается при треугольном, а наибольшее при прямоугольном поперечном сечении канала. Такая зависимость DIBL и SS от L_{goxext} объясняется изменениями емкости связи затвор-исток.
5. Установлено увеличение наклона подпороговой передаточной характеристики SS FinFET транзистора с увеличением толщины скрытого оксидного слоя T_{box} и достижение насыщения при больших значениях. Такое изменение SS объясняется соответствием с закономерностью зависимости емкости связи затвор-исток от толщины скрытого оксидного слоя T_{box} .

6. Установлено, что амплитуда случайного телеграфного шума в FinFET транзисторах наибольшая в случае встраивания единичного заряженного дефекта на потолочной поверхности на границе оксид-полупроводник в середине канала прямоугольного сечения, а в случае трапецеидального поперечного сечения при встраивании единичного заряда в середине боковой поверхности канала на границе оксид-полупроводник FinFET транзистора.

7. Моделирована зависимость амплитуды СТШ сигнала от положения единичного заряженного граничного дефекта вдоль канала в середине как потолочной так и боковой поверхности канала с прямоугольной и трапецеидальной формой сечения FinFET транзистора. Установлено, что максимальная амплитуда сигнала наблюдается при расположении единичного заряженного дефекта в середине канала для обеих форм и для обеих поверхностей канала.

8. Для обеих видов поперечного сечения канала с приближением положения единичного заряженного дефекта от истока к стоку на верхней и боковой поверхностях канала, обнаружено уменьшение DIBL эффекта и увеличение SS. И определено, что при встраивании единичного заряда как на верхней так на боковой поверхности, DIBL эффект и SS больше для транзистора с прямоугольным чем с трапецеидальным сечением канала.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSC.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELEC-
TRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**
URGANCH STATE UNIVERSITY

ABDIKARIMOV AZAMAT EGAMBERGANOVICH

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

01.04.10- Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2021

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 B2019.1.PhD/FM120

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.ispm.uz and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at www.ziynet.uz.

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

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

Ayuxanov Rashid Axmedovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organisation: **Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
S. V. Starodubtsev Institute of Physics and Technology**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "27" 05 2021, at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz)

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No. 24). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on "10" 05 2021.
(Registry record No. 24 dated "10" 05 2021)



Sh. B. Utamuradova,
Chairman of the Scientific Council for the
award of scientific degrees, Doctor of Physical
and Mathematical Sciences, Professor

J. J. Khamdamov,
Scientific Secretary of the Scientific Council
for the award of scientific degrees, PhD

Z. T. Azamatov,
Chairman of the Scientific Seminar at the
Scientific Council for the Awarding of
Academic Degrees, Doctor of Physics and
Mathematics,
Professor.

INTRODUCTION (abstract of doctor of philosophy dissertation)

The aim of the research work is to determine the effect of the changes of the shape and geometric sizes that can appear as a result of technological fluctuations of various parts and layers and the charged individual defects at the border of oxide-semiconductor, layer of oxide to the characteristics of a vertically isolated three-core field-effect transistor based on Silicon on Insulator (SOI) technology on a nanoscale insulator and short-channel effects.

The object of research is a vertical field two-gate and three-gate transistors based on silicon technology on the insulator.

Research methods. The paper uses methods of computer numerical modeling and theoretical and analytical calculations of electronic processes. In analytical calculations of the capacities of various parts of the transistor and the potential distribution in them, the laws of electrostatics were used, in particular the method of mirror images. In 3D modeling, a diffusion-drift model of transport was used and consistent basic semiconductor equations such as the Poisson equation and the continuity equation were used. When studying the transport of carriers, various transport models were used, in particular, models that take into account the dependence of the mobility on the concentration and saturation of the carrier velocity at high fields. Since the transistors under consideration have nanometer scales, Density gradient quantum correction is used to take into account quantum effects. In computer modeling, the calculation of the potential distribution was carried out using the finite element method.

The scientific novelty of the research is:

for the first time simulation compares DIBL and SS for a FinFET transistor based on silicon on insulator technology with a gate length of 25 nm for various channel cross-sectional shapes, taking into account the quantum correction in the transport model, it was found that the largest DIBL and SS is observed for a transistor with a channel cross-section in the form of a rectangle;

it was found that in FinFET transistors based on silicon-on-insulator technology with different channel shapes DIBL and SS increases with an increase in the thickness of the hidden oxide layer T_{box} , reaching saturation at high T_{box} values;

for the first time, the effect of gate lateral expansion on the threshold voltage, DIBL and SS FinFET of a transistor based on silicon-on-insulator technology with different channel shapes was simulated, and it was proved that with gate expansions up to 10 nm for all channel shapes, the threshold voltage is almost unchanged, while DIBL and SS decreases by 10%;

for the first time, the dependence of DIBL and SS on the length of the gate oxide layer outside the gate of an L_{goxext} FinFET transistor based on silicon-on-insulator technology was investigated and it was substantiated that, up to $L_{\text{goxext}} = 2$ nm, the DIBL effect and SS decrease, and at large values, it increases;

for the first time it was established that in FinFET transistors based on silicon-on-insulator technology, the maximum amplitude of random telegraph noise is observed when a single charged defect is located on the surface of the middle of the ceiling of

a channel with a rectangular cross-section and when located in the middle of the lateral surface in a transistor with a trapezoidal cross-section;

Scientific and practical significance of research results. The practical significance of the research results is determined by the choice of optimal shapes and sizes in the technological process of obtaining nano-sized SOI FinFET transistors, as the DIBL effect and SS depend on the shape and size of different parts of the SOI FinFET transistor. Also, the dependence of the amplitude of random telegraph noise on the state of the boundary individual defect is determined by the fact that the oxide-semiconductor boundary can be used for express diagnostics.

Implementation of research results. Based on the obtained scientific results on modeling the influence of technological fluctuations on the characteristics of nanoscale vertical field-effect transistors with an insulated gate:

scientific conclusions on quantum adjustments to take into account quantum effects when modeling the characteristics of nanosized vertical insulated gate field-effect transistors based on silicon-on-insulator technology using the Technology Computer-Aided Design (TCAD) Sentaurus software were used to evaluate quantum size effects in the project OT-F2 -28 “Quantum size effects on the surface and in the bulk of doped silicon and their influence on the processes of photogeneration and recombination of charge carriers in p-n structures” (reference No. 89-03-4169 of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education dated 03.12.2018). The use of scientific results made it possible to explain the influence of quantum effects on the processes of photogeneration of current carriers in p-n structures;

the results of modeling the influence of fluctuations in geometric dimensions and shape on the characteristics of a nanoscale FinFET transistor based on silicon-on-insulator technology were used in the modeling of advanced field-effect transistors in the project “Modeling of advanced semiconductor transistors and the development of calculation tools: use to study fluctuations of internal parameters” at the Center for Singular Research on Smart Technologies (CITIUS) of the University of Santiago de Compostella (Spain) (reference from the Head of the Department of Electronics and Computer Science of the CITIUS Center from 2019). The use of scientific results contributed to modeling the influence of fluctuations of internal parameters on the characteristics of nanoscale field-effect transistors, in particular vertical field-effect transistors.

Publication of research results. A total of 20 scientific papers on the topic of the dissertation were published, including 9 articles in scientific journals recommended for publication of the main scientific results of doctoral dissertations of the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, including 5 foreign and 4 national journals. Certificates were obtained from the Intellectual Property Agency for 2 software products used in EXM.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, a list of references, 2 appendices, 58 figures, 5 tables. The volume of the dissertation is 118 pages.

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

I бўлим (I часть, part I)

1. Atamuratov A. E., Abdikarimov A., Khalilloev M., Atamuratova Z. A., Rahmanov R., Garcia-Loureiro A., Yusupov A. Simulation of DIBL effect in 25 nm SOI-FinFET with the different body shapes // -2017. Nanosystems: Physics. Chemistry. Mathematics. 8 (1). pp. 71–74. (01.00.00, №5)
2. Abdikarimov A., Atamuratov A.E., Khalilloev M., Atamuratova Z. A., Rahmanov R., Yusupov A. Simulation Study Of Subthreshold Slope in 25 nm SOI-FinFET With The Different Body Shape // 2017. ДАН. № 3. с. 20-23. (01.00.00, №7)
3. Abdikarimov A.E., Yusupov A., Atamuratov A.E. The effect of the fin shape and thickness of the buried oxide on the DIBL effect in an SOI FinFET // - 2018. Technical Physics Letters. Vol.44. No.11. pp. 962-964. (Scopus IF= 0.791)
4. Абдикаримов А.Э., Юсупов А., Атамуратов А.Э., Влияние бокового расширения затвора на короткоканальные эффекты в нанометровом кнн FinFET-транзисторе // - 2019. УФЖ. Vol. 21. №1. pp. 50-52. (01.00.00, №5)
5. Abdikarimov A.E., Yusupov A., Atamuratov A.E. Intercapacitance between two charges located in the different environments // - 2018. Actual problems of modern science, education and training in the region. IV. pp. 33-37. (01.00.00, №10)
6. Abdikarimov A., Atamuratova Z. A., Yusupov A. Simulation study of short channel effects in low power FinFETs with different body shape and geometries // - 2018. International journal of applied science-research and review. Volume 5, pp. 41. (01.00.00, №5)
7. Abdikarimov A.E. The Influence of a Single Charged Interface Trap on the Subthreshold Drain Current in FinFETs with Different Fin Shapes // - 2020. Technical Physics Letters.– Vol. 46. No.5. pp. 494-496. (Scopus IF= 0.791)
8. Abdikarimov A., Indalecio G., Comesana E., Seoane N., Kalna K., Garsia-Lourero A. J., Atamuratov A. E. Influence of device geometry on electrical characteristics of a 10.7 nm SOI-FinFET //– 2014. IEEE Xplore Digital Library. pp. 1-4. [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6865877> International Workshop on Computa-tional Electronics (IWCE). Paris. pp. 1-4, doi: 10.1109/IWCE.2014.6865877
9. Abdikarimov A. E., Matyusupova N.B. Simulation of the effect of a single interface trapped charge in finfet with a gate length of 10 nm on the short channel effects // -2020. Electronic journal. VI. Actual problems of modern science, education and training. December-15. - pp.316-322. Issue1, ISSN Online: 2181-9750 [Online] Available: <http://khorezmscience.uz/en/index/single/1>

II бўлим (II часть, part II)

10. Abdikarimov A., Indalecio G., Comesana E., Seoane N., Kalna K., Garsia-Lourero A.J., Atamuratov A.E. Influence of device geometry on electrical characteristics of a 10.7 nm SOI FinFET // -2014. 17th International Workshop on Computational Electronics (IWCE 2014). Conference. Paris. France. June 3-6, pp. 247-248

11. Абдикаримов А., Ражабов О., Юсупов А., Атамуратов А.Э. Влияние формы базы и толщины скрытого оксидного слоя на DIBL эффект в кнн FinFET-транзисторе // - 2018. Республика илмий-техникавий анжуман, Муҳаммад Ал-Хоразмий издошлари. Урганч. 27-28 апрель 9 -10 б.

12. Абдикаримов А.Э., Ражабов О., Юсупов А., Атамуратов А.Э. Влияние бокового линейного расширения затвора на пороговое напряжение и короткоканальные эффекты в кнн FinFET-транзисторе с различной формой канала // -2018. IV Международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро-и нано структурах. Фергана. 25-26 мая. с. 318-319.

13. Абдикаримов А.Э., Юсупов А., Атамуратов А.Э. Влияние формы базы и толщины скрытого оксидного слоя на крутизну передаточной характеристики кнн FinFET-транзистора // - 2018. Материалы Республиканской конференции. Роль одаренной молодежи в развитии физики. Тошкент. 11-12 мая. с. 23-25.

14. Абдикаримов А.Э., Садуллаев С., Атамуратов А.Э. Влияние удлинения подзатворного оксидного слоя на крутизну передаточной характеристики и DIBL эффект кнн FinFET-транзистора // - 2018. International conference. Prospects for the intensive approach to innovative development. - Namangan. 10 -11 july. pp. 222-223.

15. Абдикаримов А.Э., Юсупов А., Атамуратов А.Э. Влияние толщины скрытого оксидного слоя на DIBL эффект в кнн FinFET-транзисторе // - 2018. Республика илмий-амалий анжуман. Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари. Андижон, 20 - 21 апрель. 90 – 91 б.

16. Абдикаримов А.Э., Юсупов А., М. Халиллоев., Атамуратов А.Э. Влияние удлинения подзатворного оксидного слоя на передаточную подпороговую характеристику и DIBL эффект кнн FinFET-транзистора с различной формой базы // - 2018. Республика илмий-амалий анжумани материаллари. Яримўтказгичлар физикасининг ҳозирги замон муаммолари. - Тошкент. 26-27 октябрь. 84-86 б.

17. Абдикаримов А.Э., Юсупов А., Ражабов О., Ахмедова С., Атамуратов А.Э. Влияние удлинения подзатворного оксидного слоя на короткоканальные эффекты в кнн FinFET-транзисторе // -2018. Материалы республиканской научно-практической конференции. Инновационные технологии в науке и образовании. Нукус. 20-21 ноября. С. 121-124.

18. Абдикаримов А.Э., Садуллаев С., Нуруллаев Н., Атамуратов А.Э., Юсупов А. Распределение амплитуды сигнала случайного телеграфного шума вдоль канала FinFET транзистора с различной формой // – 2019. Республиканской конференции (с участием ученых стран СНГ). Современные проблемы физики полупроводников. Нукус. 20 ноября. С. 276-279.

19. Yusupov A., Atamuratov A., Abdikarimov A. The amplitude of RTN in nanometer SOI FinFET with different channel shape // - 2020. World Scientific Proceedings Series on Computer Engineering and Information Science 12. Developments of Artificial Intelligence Technologies in Computation and Robotics. Proceedings of the 14th International FLINS Conference .pp.1541-1548.

20. Абдикаримов А.Э., Атамуратов А.Э., Юсупов А. Канал узунлиги 10 нм бўлган вертикал майдоний транзисторнинг оксид-яримўтказгич қатлам чегара сиртидаги нуқсонда камралган якка заряднинг DIBL эффектига таъсирини моделлаштириш // - 2020. Замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация интеграцияси. Андижон. 24 - 25 декабрь. 183–185 б.

21. Ўзбекистон республикаси интеллектуал мулк агентлигининг электрон ҳисоблаш машиналари учун яратилган дастурнинг расмий рўйхатдан ўтказилганлиги тўғрисида гувоҳнома олиш учун “Наноўлчамлардаги вертикал Майдон транзисторларда сток томонидан потенциал тўсиқнинг пасайтирилиш эффектини ҳисоблаш” учун ЭХМ дастур яратилди № DGU 20180753. Интеллектуал мулк агентлиги “Расмий ахборотнома” бюллетенида нашр қилинди.

22. Ўзбекистон республикаси интеллектуал мулк агентлигининг электрон ҳисоблаш машиналари учун яратилган дастурнинг расмий рўйхатдан ўтказилганлиги тўғрисида гувоҳнома олиш учун “Наноўлчамлардаги вертикал Майдон транзисторларда бўсагадан паст ўтиш вольт-ампер характеристикасининг қиялигини ҳисоблаш” учун ЭХМ дастур яратилди № DGU 20180754. Интеллектуал мулк агентлиги “Расмий ахборотнома” бюллетенида нашр қилинди.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида
тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларин
мослиги текширилди (07.05.2021 йил)

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

Шартли босма табағи: 2,63. Адади 60. Буюртма №18.

Гувоҳнома reestr № 10-4434

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

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



Автореферат “Til va adabiyot ta’limi” - «Преподавание языка и литературы» илмий-методик журнали тахририятида тахрирдан
ўтказилиб, ўзбек ва рус инглиз тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди (07.05.2021)

