

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM./Т.34.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

УРҒАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

АТАМУРАТОВ АТАБЕК ЭГАМБЕРДИЕВИЧ

**ДИЭЛЕКТРИК-ЯРИМЎТКАЗГИЧ ЧЕГАРАСИ ХОССАЛАРИГА
ТАШҚИ ОМИЛЛАР ТАЪСИРИ ВА МИКРОМЕТРЛИ ВА
НАНОМЕТРЛИ МДЯ ТРАНЗИСТОРЛАР
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2019

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Атамуратов Атабек Эгамбердиевич

Диэлектрик-яримўтказгич чегараси хоссаларига ташқи омиллар таъсири ва микрометрли ва нанометрли МДЯ транзисторлар характеристикаларини моделлаштириш..... 3

Атамуратов Атабек Эгамбердиевич

Влияние внешних воздействий на свойства границы диэлектрик-полупроводник и моделирование характеристик микрометровых и нанометровых МДП транзисторов..... 29

Atamuratov Atabek Egamberdievich

External influences to the dielectric-semiconductor interface, and simulation of the characteristics of MOSFET with micrometer and nanometer sizes..... 55

Эълон қилинган илмий ишлар рўйхати

Список опубликованных научных работ
List of published research works 60

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM./Т.34.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

УРҒАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

АТАМУРАТОВ АТАБЕК ЭГАМБЕРДИЕВИЧ

**ДИЭЛЕКТРИК-ЯРИМЎТКАЗГИЧ ЧЕГАРАСИ ХОССАЛАРИГА
ТАШҚИ ОМИЛЛАР ТАЪСИРИ ВА МИКРОМЕТРЛИ ВА
НАНОМЕТРЛИ МДЯ ТРАНЗИСТОРЛАР
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2019

Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.3.DSc/FM97 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Урганч давлат университетида бажарилган.

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

Илмий маслаҳатчи: **Юсупов Ахмад**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Антонио Гарсиа Лоурейро**
фан доктори, профессор (Испания)
Каримов Иброхим Набиевич
физика-математика фанлари доктори
Гулямов Абдурасул Гафурович
физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот: **Қорақалпоқ давлат университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти ҳузуридаги DSc.30.05.2018.FM./Т.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй, Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2019 йил «___» _____ куни тарқатилди.

(2019 йил «___» _____ даги ___ рақамли реестр баённомаси).

Н. Р. Авезова

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, т.ф.д.

О. А. Абдулхаев

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.фалсафа доктори

А.В. Каримов

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

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Ҳозирги кунда жаҳон миқёсида жадал ривожланаётган яримўтказгич асбоблар соҳасида истиқболли йўналишлардан бири бу турли ташқи таъсирларга чидамли ҳамда интеграл схемаларда интеграция даражасини ошириш имконини берувчи етарли даражада кичик ўлчамли металл-диэлектрик-яримўтказгич (МДЯ) асбобларни яратишдан иборат. Кейинги йилларда МДЯ тузилмалар турли замонавий электроника қурилмаларида, жумладан яримўтказгич хотира элементларида, мобил алоқа қурилмаларида, турли тиббий имплантациавий датчикларда, телекоммуникация қурилмаларида ҳамда космик саноат техникаларида асосий ташкилий элемент сифатида кенг қўлланилмоқда. Шу боисдан МДЯ тузилмалар ва улар асосидаги асбоблар хоссаларини ўрганиш ҳозирги замон яримўтказгичлар физикасининг долзарб вазифаларидан ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда МДЯ транзисторлар характеристикаларига турли ташқи таъсирларни ўрганишга ҳамда диэлектрик қатлами ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида тўпланган заряднинг транзистор параметр ва характеристикаларига таъсирини очиқ беришга катта эътибор қаратилмоқда. Шу сабабли МДЯ тузилмаларнинг диэлектрик-яримўтказгич чегарасида ионизацияловчи радиация таъсирида юзага келадиган сирт сатхлари генерацияси механизмини очиқ бериш, радиация ва электр майдон таъсирида диэлектрик қатламида ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида нотекис тўпланган зарядларнинг МДЯ транзистор характеристикаларига таъсири қонуниятларини аниқлаш яримўтказгичли асбоблар физикасининг муҳим вазифаларидан бири ҳисобланади.

Республикамизда илм-фан ривожига, жумладан яримўтказгичли асбоблар физикаси ва электроника соҳасини ривожлантиришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада мамлакатимиз олимлари томонидан янги яримўтказгич материаллар, улар асосида турли тузилмалар олиш ва уларнинг характеристикаларига ташқи омиллар таъсирларини ўрганиш бўйича муҳим натижалар олинган. Ўзбекистон Республикасини 2017-2021 йилларда янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегиясида илмий - тадқиқот ва инновацион фаолиятни рағбатлантириш, энергия тежамкор технологияларни ишлаб чиқиш, қайта тикланувчан энергия манбаларидан фойдаланишни кенгайтириш вазифалари белгилаб берилган. Бу борада турли ташқи таъсирларга чидамли янги электрон техника материаллари ва улар асосидаги структураларни ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг параметрларини назорат қилишнинг самарали усулларини яратиш муҳим масалалардан ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 30 майдаги ПҚ-4348-сонли «Электротехника саноатини ривожлантириш учун қулай шарт-шароитлар яратиш ва тармоқнинг инвестициявий ҳамда экспорт салоҳиятини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида», 2018 йил 14 июлдаги ПҚ-3855-сонли «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча

чора-тадбирлар тўғрисидаги» ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли «Фанлар Академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисидаги» Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга мазкур диссертация тадқиқоти маълум даражада хизмат қилади.

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

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи¹.

Диэлектрик-яримўтказгич чегара сатхларидаги ва затвор ости диэлектрик қатламидаги зарядлар ва уларнинг тақсимотининг ҳамда ионизацияловчи радиациявий нурланиш ва термик ишловларнинг МДЯ тузилмалар асосидаги асбобларнинг характеристикаларига таъсири жаҳоннинг йирик илмий марказлари ва университетларида, жумладан Вандербилт университети Коинот ва мудофаа электроникаси институти, Сандиа миллий лабораторияси, Стенфорд университети (АҚШ), Университетлараро микроэлектроника маркази (Бельгия), Сейжонг университети (Жанубий Корея), Россия Фанлар академиясининг радиотехника ва электроника институти, Москва мухандислик - физика институти, Санкт-Петербург давлат университети (Россия Федерацияси), Нагоя университети, Ниппон Хосо Кио Каи техник тадқиқот лабораторияси, Тошиба яримўтказгич асбоблар техникаси лабораторияси (Япония), Рейн Вестфаль Аачен техника университети (Германия), Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Физика-техника институти ва Ядро физикаси институти, Ўзбекистон Миллий университети, Қорақалпоқ, Андижон ва Урганч давлат университетларида (Ўзбекистон) фаол ўрганилмоқда.

Диэлектрик-яримўтказгич чегара сатхларидаги ва затвор ости диэлектрик қатламидаги зарядларнинг, уларнинг тақсимотининг ҳамда ионизацияловчи радиациявий нурланиш ва термик ишловларнинг турли яримўтказгичлар асосидаги МДЯ асбобларнинг барқарорлигига, характеристикаларига, ишончлилигига таъсири бўйича жаҳон миқёсида қатор долзарб масалалар ечилган ва муҳим илмий натижалар олинган, жумладан: МДЯ тузилмалари диэлектрик қатламида ва диэлектрик-

¹ Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий-изланишлар шарҳи Fleetwood D.M. //Microelectronics Reliability, 2018, Volume 80, Pages 266-277.; Kaczer B., Franco J., Weckx P., Roussel Ph. J., Putcha V., Bury E., Simicic M., Chasin A., Linten D., Parvais B., Catthoor F., Rzepa G., Waltl M., Grasser T.// Microelectronics Reliability. 2018, Volume 81, Pages 186-194.; Heesoon Chae, Somyeong Shin, Jaehoon Choi, Sunae Seo.//Current Applied Physics, 2015, Volume 15, Issue 11, Pages 1412-1416.; Гольдман Е.И., Ждан А.Г. Новый подход к созданию нанoeлектронных систем в размерно-квантующем потенциальном рельефе встроенных зарядов в изолированных слоях у поверхности полупроводника //Письма в ЖТФ. 2000. Т. 29. № 1. С. 38-41.; Ho-Myoung An; Eui Bok Lee; Hee-Dong Kim; Yu Jeong Seo; Tae Geun Kim; A New Class of Charge-Trap Flash Memory With Resistive Switching Mechanisms. Electron Devices, 2010, V. 57, Issue:10, pp. 2398 – 2404.ва бошқа манбалар асосида бажарилган.

яримўтказгич чегарасида радиация таъсири натижасида юзага келувчи заряд тўпланишининг модели ишлаб чиқилган (Вандербилт университети Коинот ва мудофаа электроникаси институти ва Сандиа миллий лабораториясида, АҚШ); диэлектрик-яримўтказгич чегарасида зарядларни тақсимлаш ёрдамида анъанавий нанотузилмалардан тубдан фарқ қилувчи наноўлчамдаги электрон тизимлар шакллантириш услуги таклиф қилинган (Россия Фанлар академиясининг Радиотехника ва электроника институти); сиғимни ўлчаш асосида диэлектрик-яримўтказгич чегараси яқинида диэлектрик қатламидаги заряд тақсимотини қайд қилиш услуги яратилган (Стенфорд университети, АҚШ; Ниппон Хосо Киокай Техник тадқиқот лабораторияси, ва Тошиба яримўтказгич асбоблар техникаси лабораторияси, Япония).

Ҳозирги кунда МДЯ тузилмалар диэлектрик қатламидаги ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги нуқсонлар табиатини, манфий (ёки мусбат) силжишларда тузилманинг температуравий нобарқарорлигини ўрганиш мақсадида МДЯ тузилмалар характеристикаларига нурлантириш мобайнида термик майдон таъсирларини назарий ва экспериментал тадқиқ қилиш, шунингдек, бундай тузилмаларни яримўтказгич хотира элементларида қўллаш учун оксид қатламидаги ҳамда чегарадаги нуқсонлар ва уларнинг тақсимотини аниқлаш билан боғлиқ бўлган устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Шу кунга қадар диэлектрик-яримўтказгич чегараси хоссаларига ва улар асосидаги асбоблар характеристикаларига ташқи омиллар таъсирларини ўрганиш билан боғлиқ тадқиқотларда асосан Со-60 манбасининг гамма-квантлари, электрон, протон ва нейтрон дасталари, ультрабинафша нурланиш ва температуранинг таъсирлари билан чекланилган, ва юқори энергияли тормозловчи нурланишнинг таъсири деярлик ўрганилмаган. АҚШ олимлари J.R. Schwank, P.S. Winokur ва F.B. McLean томонидан Si-SiO₂ чегарасида радиация таъсирида индукцияланадиган зарядларнинг тўпланиш жараёнини ўрганиш бўйича кўплаб тадқиқотлар олиб борилган ва шу зарядлар тўпланиш жараёни механизмини тавсифловчи моделлар таклиф қилинган. J.R. Schwank моделига кўра радиация таъсирида индукцияланадиган коваклар Si-H боғларни узади ва водород атомини озод қилади. Озод бўлган водород атоми чегара қатламига диффузияланиб, у ердаги Si-H боғларни узиб, сирт сатхларни ҳамда молекуляр водородни ҳосил қилади. Ушбу механизм заряд тўпланишини тушунтира олади, аммо у заряд тўпланишининг майдон кучланганлигига боғлиқлигини тушунтирмайди. P.S. Winokur ва F.B. McLean ларнинг водород иони ҳосил бўлишига асосланган модели заряд тўпланишининг майдон кучланганлигига боғлиқлигини яхши тушунтиради, аммо жараённинг динамикасини ва оксид қатлами қалинлигига боғлиқлигини тушунтира олмайди. Ҳозирги кунгача оксид-яримўтказгич чегарасида заряд тўпланиши бўйича барча тажриба натижаларини тўлиқлигича тушунтирадиган ягона модел мавжуд эмас. Россия олимлари (В.Я. Урицкий, Е.А. Ладыгин, В.А. Гуртов ва б.) нурланиш таъсирида диэлектрик қатламда ва оксид-яримўтказгич чегарасида нуқсонлар концентрацияси ва зарядлар

таксимотини, ток ташувчилар ҳаракатчанлиги деградациясини асосан затвор, сток (исток) ёки таглик орқали ўтадиган ток ва кириш вольтфарад характеристикасини ўлчаш орқали ўрганишган. Аммо бу усуллар фақат интеграл маълумотни беради ва чегара бўйлаб зарядлар таксимотини аниқлашга ва чегара бўйлаб зарядларнинг нотекис таксимланишининг МДЯ характеристикаларига таъсирини ўрганишга имкон бермайди.

Ўзбекистон олимлари А.В. Каримов, С.И. Власов, И.Н. Каримов, Х.С. Далиев, А. Юсупов ва бошқалар томонидан ҳам МДЯ асбоблар характеристикалари ўрганилган. Жумладан, А.В. Каримов томонидан р-п ўтишга асосланган майдоний транзисторларда турли структуравий эффектлар кўрилган, С.И. Власов томонидан МДЯ тузилмалардаги диэлектрик-яримўтказгич чегараси хоссаларини ўрганиш учун такомиллаштирилган С-V усуллар ривожлантирилган. И.Н. Каримов томонидан МДЯ тузилмалар чегара ҳолатларига турли ташқи омиллар таъсири ўрганилган. Х.С. Далиев томонидан тажриба йўли билан МДЯ тузилмаларга Si атмосферасида ишлов берилганда Si-SiO₂ чегарасидаги ҳолатларни сезиларли пассивацияланиши кўрсатилган. А.Юсупов томонидан МДЯ транзисторлар хоссаларига диэлектрик қатламига киритилган локал зарядларнинг таъсири ўрганилган. Аммо бу ишларда юқори энергияли тормозловчи нурланишнинг МДЯ транзисторлар характеристикаларига ҳамда бўсаға кучланишининг оксид қатламидаги ва чегарадаги зарядлар билан боғлиқ ташкил этувчиларига таъсири деярлик ўрганилмаган.

МДЯ асбобларда оксид қатламида ва чегарада зарядлар тўпланиш жараёнини ўрганиш бўйича тадқиқотлар сони етарлича кўп эканлигига қарамасдан, ҳозирги кунгача чегарада зарядлар тўпланиш механизмини тушунтириб бера оладиган яқунланган модел яратилмаган. МДЯ асбоблар диэлектрик қатламида ва чегара сиртида нотекис тўпланган зарядларнинг асбоб характеристикаларига таъсири тизимли ўрганилмаган. Яримўтказгич нанотузилмаларни олиш технологияларини ривожлантириш бўйича тадқиқотлар асосан маълум йўналиш ёки йўналишлар бўйича ўлчамлари чекланган яримўтказгич материаллар қатламларини ўстиришга қаратилган бўлиб, белгиланган зарядлар таксимоти асосида потенциал рельеф шаклида яримўтказгич нанотузилмаларни шакллантиришга бағишланган тадқиқотлар эса жуда кам.

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

Тадқиқотнинг мақсади юқори энергияли тормозловчи нурланишнинг таъсири остида диэлектрик-яримўтказгич чегараси ва микрометр ва нанометр ўлчамли МДЯ асбоблари характеристикалари ўзгаришини аниқлаш ҳамда нанотузилмалар шаклланиш механизмларини ўрнатишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

МДЯ асбобларга таъсири ўрганиладиган ташқи таъсирлар параметрлари ва юқори энергияли тормозловчи гамма – нурланиш режими, интенсивлиги ва энергиясини танлаш;

микрометр ўлчамлардаги МДЯ транзисторнинг Si-SiO₂ чегарасидаги сирт сатхлар зичлиги, бўсаға кучланиши ва ток характеристикаларига юқори энергияли тормозловчи нурланиш ва термик ҳамда майдон таъсирини излаш ва Co-60 манба гамма-квантлари таъсири билан таққослаш;

МДЯ транзистор бўсаға кучланиши ва унинг диэлектрик қатламида ва Si-SiO₂ чегарасида тўпланадиган зарядлар билан боғлиқ ташкил этувчиларига термик ишловнинг таъсирини излаш;

диэлектрик-яримўтказгич чегараси хоссаларига бир вақтнинг ўзида радиация ва электр майдон таъсирини излаш;

МДЯ транзистор ён ўтишлари вольтфарад характеристикаларига оксид қатламида қамраладиган зарядларнинг таъсирини излаш;

яримўтказгич сиртида, унинг билан чегарага эга бўлган диэлектрик қатламидаги зарядларнинг тақсимооти асосида, ҳосил қилинадиган кичик ўлчамли электрон тузилмаларнинг хоссаларини назарий излаш;

оксид қатламига заряд киритилган нанометр ўлчамлардаги МДЯ транзистор ён ўтиши сиғимини моделлаштириш.

Тадқиқотнинг объекти металл-диэлектрик-яримўтказгич, металл-нитрид-оксид-яримўтказгич тузилмалари, микрометр ва нанометрли МДЯ транзисторлари, металл-оксид-яримўтказгич тузилмаларда шакллантирилган кичик ўлчамли электрон тузилмаларидан иборат.

Тадқиқотнинг предмети МДЯ асбобларнинг вольтампер ва вольтфарад характеристикаларига радиациавий нурланиш, термик ва термик-майдон ишлов ҳамда диэлектрик қатламдаги зарядларнинг нотекис тақсимланишининг таъсир жараёнларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқотда экспериментал физиканинг комплекс усуллари: бир неча ўтишли тузилмалар параметрларини тадқиқ қилишнинг юқори частотали вольтфарад характеристикаси, чиқиш вольтампер характеристикаси, бўсағадан паст ўтиш вольтампер характеристикаси усуллари, шунингдек электрон жараёнларни назарий-аналитик ҳамда компьютерда сонли моделлаштириш усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

МДЯ транзисторига Co-60 манба гамма-квантлари таъсиридаги каби, юқори энергияли тормозловчи нурлар таъсирида ҳам бўсаға кучланишининг оксид қатламида қамралган зарядлар билан боғлиқ ташкил этувчиси монотон ортиб, энергия кўчирилишининг 10³ Дж/см² дан юқорироқ қийматларида тўйинишга эришиши илк бор кўрсатилган;

кремнийли МДЯ транзисторга бир вақтнинг ўзида юқори энергияли тормозловчи нурланиш ва оксид қатламига йўналтирилган электр майдон қўйилганда кремний оксиди-кремний чегараси бўйлаб зарядларнинг нотекис тўпланиши аниқланган;

МДЯ транзисторни Со-60 гамма-квантлари билан нурлантириш вақтида затворга стокга нисбатан +10 В кучланиш берилганда, сток-таглик ўтишининг тешилиш кучланиши -30 В дан -5 В гача ўзгариши ва исток-таглик ўтишининг тешилиш кучланиши деярли ўзгармаслиги аниқланган;

МДЯ транзисторни Со-60 гамма-квантлари билан нурлантириш вақтининг ўзида, истокга стокга нисбатан ± 10 В кучланиш қўйилганда, диэлектрик қатламида зарядларнинг нотекис тақсимланиши сабабли, исток-таглик ўтиш вольтфарад характеристикасининг қўйилган кучланишнинг ишорасига ва нурланиш дозасига боғлиқ равишда ўзгариши илк бор аниқланган;

Si-SiO₂ тузилманинг SiO₂ сиртига йўналтирилган атом кучли микроскопи асосидаги Кельвин пробаси зондига тузилманинг n-Si таглигига нисбатан 15 дақиқа вақт давомида, контактсиз модада, +10 В кучланиш бериш орқали оксид қатламига чизиқли ўлчами 1000 нм тартибдаги зарядлар киритиш («ёзиш») мумкинлиги кўрсатилган;

оксид қатламида тақсимланган зарядларга эга бўлган цилиндрик шаклдаги диэлектрик-яримўтказгич тузилмасининг яримўтказгич соҳасидаги потенциал тақсимоти ва унинг оксид қатламидаги зарядлар тақсимотига боғланиш ифодалари аниқланган;

метал-нитрид-оксид-яримўтказгич (МНОЯ) транзисторининг нитрид қатламига локал зарядлар киритилганда ён ўтиш вольтфарад характеристикасининг ўзгариши моделлаштирилган ҳамда киритилган локал зарядлар ён исток-таглик ўтиш сиғимининг сакраб ортишига олиб келиши ва сакраш кучланишининг локал зарядларнинг истокка нисбатан вазиятига боғлиқ эканлиги илк бор кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

МДЯ транзистор бўсағавий кучланиши ва унинг оксид қатламида ва диэлектрик-яримўтказгич чегарасида тўпланган зарядлар билан боғлиқ ташкил этувчиларининг спектрида максимал энергияси 30 МэВ бўлган юқори энергияли тормозловчи гамма нурланиш ва Со-60 манба гамма-квантлари нурланиш энергияси кўчирилишига боғланиши аниқланиб, амалиётда МДЯ транзисторларни радиациявий ҳолатида фойдаланилишида, бўсаға кучланишининг деградациясини башорат қилиш имконини бериши кўрсатилган;

МДЯ транзистор исток-таглик (сток-таглик) ён ўтишининг вольтфарад характеристикаси шаклининг оксид қатлами ва оксид-яримўтказгич чегарасида тўпланган зарядларнинг нотекис тақсимланишига боғланиши аниқланиб, бу оксид қатламида ва оксид-яримўтказгич чегарасида тўпланган локал зарядларни аниқлашга имкон бериши ҳамда оксид билан яримўтказгич чегарасини ва унинг атрофини диагностика қилишнинг экспресслигини ошириши кўрсатилган;

диэлектрик-яримўтказгич тузилмасининг яримўтказгич сирти ва ҳажмидаги потенциал тақсимотининг диэлектрик қатламига киритилган зарядлар тақсимоти геометрияси ва параметрларига боғлиқлиги аниқланган ва бу ўз навбатида яримўтказгичда, диэлектрик қатламда зарядларни тақсимлаш орқали бошқариладиган квант ўлчамли тизимларни яратиш мумкинлиги ва уларни олиш технологиясини соддалаштиришга имкон бериши кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги диссертация ишида яримўтказгич асбобларнинг сифимли спектроскопиясининг замонавий усуллари ва ёндашишларини қўллаш, намуна электрофизик параметрларини ўлчаш учун стандарт асбоблардан фойдаланиш, вольтампер характеристикаларини ўлчаш ва радиациявий дозиметрия усулларида фойдаланиш, моделлаштиришда стандарт дастурлардан фойдаланиш ва уларда қўлланилган физик моделлар нашрларда эълон қилинган тажриба натижалари асосида калибровка қилинганлиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти юқори энергияли тормозловчи нурланиш билан таъсир қилганда МДЯ транзистор бўсага кучланиши ва унинг оксид қатламида ва оралиқ чегарада тўпланган зарядлар билан боғлиқ ташкил этувчиларининг ўзгариши тўғрисидаги янги тасаввурларни яратилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти, аниқланган, исток-таглик ёки сток-таглик вольтфарад характеристикасининг МДЯ транзистор диэлектрик қатламида ёки диэлектрик-яримўтказгич чегарасида зарядларнинг нотекис тақсимланишига боғлиқлигидан МДЯ асбобларни олиш технологик жараёнларида диэлектрик-яримўтказгич чегарасидаги нуқсонларнинг тақсимотини назорат қилишда ва диэлектрик қатлам билан чегарага эга бўлган яримўтказгич сиртида ва ҳажмидаги потенциал тақсимотининг диэлектрик қатламидаги зарядлар тақсимотига боғланишидан қайта шакллантириладиган нано ўлчамли яримўтказгич тузилмалар олишда фойдаланиш мумкинлиги билан белгиланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ионизацияловчи нурланишнинг термик ва термик-майдон ишлов беришнинг МДЯ транзистор кириш ва ўтиш характеристикаларига, ён ўтишларининг вольтампер ва вольтфарад характеристикаларига таъсирини аниқлаш ҳамда диэлектрик қатламдаги зарядларнинг нотекис тақсимланишининг ён ўтишларнинг вольтфарад характеристикаларига таъсирини моделлаштириш асосида:

МНОЯ транзисторининг нитрид қатламига локал заряд киритилганда ён ўтиш вольтфарад характеристикасининг ўзгаришини моделлаштириш бўйича олинган натижалар Испания Сантиаго де Компостелла университетининг Смарт технологиялар бўйича Сингуляр тадқиқотлар марказида (CITIUS) бажарилган «Илгариланган яримўтказгич асбобларни моделлаштириш ва ҳисоблаш воситаларини яратиш: хусусий параметрларни флуктуациясини ўрганиш учун қўллаш» лойиҳасида илгариланган майдоний транзисторларни моделлаштиришда қўлланилган (Смарт технологиялар бўйича Сингуляр

тадқиқотлар марказининг 2019 йил 29 апрелдаги маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш наноўлчамдаги майдоний транзисторларни, хусусан вертикал майдоний транзисторларнинг характеристикаларига ички параметрлар флуктуацияси таъсирини моделлаштириш имконини берган;

Со-60 манбаси ионизацияловчи гамма-квантлари ва электр майдони таъсирида МДЯ транзисторнинг диэлектрик қатламига киритилган зарядлар тақсимоти исток-таглик р-п ўтишнинг тескари вольтампер ва вольтфарад характеристикаларини, сизиш токини ва тешилиш кучланишини ўзгартириши бўйича натижалари «Легирилган кремний сирти ва ҳажмидаги квант ўлчамли эффектлар ҳамда уларнинг р-п-структуралардаги заряд ташувчилар фотогенерация ва рекомбинация жараёнларига таъсири» фундаментал лойиҳасида кремний асосидаги р-п ўтишларда заряд ташувчилар фотогенерация жараёнларини ўрганишда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 20 декабрдаги 89-03-4389-сон маълумотномаси). Илмий натижаларни қўллаш р-п ўтишдаги ток ташувчилар фотогенерация жараёнларига кристалл сирт эффектларининг таъсирини тушунтириш имконини берган;

Кельвин пробаси услубида зарядланган оксид қатлами сирти ва яримўтказгичнинг кутбланган сиртларини тажрибавий ўрганиш натижалари, хорижий журналларда (Journal of Physics and Chemistry of Solids, 89, 7-14, 2016, IF: 2.207; Journal of Crystal Growth, 510, 56-64, 2019, IF 1.742; Materials Science in Semiconductor Processing, 55, 32-45, 2016, IF: 2.593 ва бошқалар) нанометр масштабидаги яримўтказгич намуналар сиртида юзага келадиган локал электр потенциалларни ўлчашда, турли яримўтказгич сиртларида ҳар хил материаллардан наноишларни ўстириш поғоналарини ўрганишда фойдаланилган. Илмий натижалардан фойдаланиш турли шаклдаги яримўтказгич нанотузилмаларни олиш усулларини ривожлантириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари Урганч давлат университети, Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Физика-техника институти ва Лакуила университети (Италия) илмий семинарларида ҳамда илмий анжуманларда, жумладан 6 та халқаро ва 11 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 32 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 11 та мақола, жумладан, 9 та хорижий ва 2 та республика журналларида чоп этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация иши жами 172 саҳифалардан иборат бўлиб, таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 53та расм, 2та жадвал ва 4та иловани ўз ичига олган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг «**МДЯ асбоблар, уларнинг хоссалари ва кўлланилиши**» деб номланган биринчи бобда адабиётларда келтирилган маълумотлар тахлили асосида МДЯ транзисторларга ионизацияловчи нурланиш ва термик ишловлар таъсири, Si-SiO₂ чегарасида радиация таъсирида индукцияланадиган зарядларнинг тўпланиш жараёнини ўрганиш бўйича кўплаб тадқиқотлар ва шу зарядлар тўпланиш жараёни механизмини тавсифловчи моделлар кўрилган. Диэлектрик қатламга зарядлар киритилишининг хусусиятлари ва имкониятлари ўрганилган, МДЯ асбоблар асосида наноструктураларни шакллантириш физикаси асослари ва уларни кўллаш аспекти тахлил қилинган. Адабиёт шарҳидан келиб чиқиб, тадқиқот объектларига талаблар, диссертациянинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

«**Ионизацияловчи нурланиш, термик-майдон ва термик ишловнинг МДЯ транзисторлар диэлектрик-яримўтказгич чегараси хоссаларига ва ток характеристикаларига таъсири**» деб номланган иккинчи бобда намуналарни нурлантириш учун фойдаланилган юқори энергияли тормозловчи нурланишнинг ва Со-60 гамма квантларнинг дозиметрияси асосий тушунчалари келтирилган, ютилган дозадан нурланиш энергия кўчирилишига ўтиш ифодалари келтирилиб чиқарилган, вольтампер характеристикасини ўлчаш қурилмалари тавсифи ва ўлчаш мазмуни кўриб ўтилган, МДЯ транзистор оксид-яримўтказгич чегарасида юқори энергияли тормозловчи нурланиш, Со-60 манба гамма-квантларининг, термик ва термик-майдон ишловидан кейинги юза сатхлар энергетик спектрини ва юза сатхлар интеграл зичлигини, сток сизиш токи ва бўсаға кучланишини ўрганиш натижалари келтирилган.

Намунани юқори энергияли тормозловчи нурланиш билан нурлантиришда юқори интенсивликни таъминлаш мақсадида камерали усулдан фойдаланилган. Намуна жойлашган жойда нурланиш энергия оқими зичлиги $I=0.195$ Вт/см² ни ташкил қилган. Ўлчаш натижалари намунанинг жойлашган жойида энергия кўчирилиши F га нисбатан нормалланган. Энергия кўчирилиши F нурланиш энергия оқими зичлиги I орқали топилади. Со-60 квантлари билан нурлантириш Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти гамма-нурланиш қурилмасида амалга

оширилган. Нурланишни назорат қилиш ДОГ-25/200 дозиметр ёрдамида экспозицион доза орқали бажарилган. Нурлантириш жойида Со-60 квантлар энергия оқими зичлиги 0.12 Вт/см^2 ни ташкил қилган.

Диссертация ишида МДЯ транзистор чиқиш ва ўтиш вольтампер характеристикалари ҳам ўлчанган. Чиқиш вольтампер характеристикаси сток токининг сток-исток кучланишига боғланишини билдиради. Ўтиш вольтампер характеристикасини аниқлаш учун сток-исток кучланиши доимий сақланган ҳолда, сток токининг затвор-исток кучланишига боғланиши ўлчанган. Ўтиш характеристикадан транзисторнинг бўсаға кучланиши аниқланади. Ўтиш вольтампер характеристикаси затвор кучланишининг бўсағадан юқори ва бўсағадан паст соҳасида ўлчанган.

Бўсаға кучланиши V_T қиймати сифатида сток токи $I_{DS} = 30 \text{ мкА}$ га тўғри келадиган затвор кучланиши қабул қилинган, бунда сток-исток кучланиши $V_{DS} = 90 \text{ мВ}$ қийматида ушлаб турилган. Затвор кучланиши В7-34А вольтметр ёрдамида назорат қилинган. Затворга кучланиш Б5-21 ва стокга Б5-50 доимий ток манбаларидан берилиб турилган. Ўлчашларда исток-база кучланиши нолга тенг қилиб олинган.

Юза сатҳлар зичлиги сирт потенциалининг $0.3 \text{ В} - 0.6 \text{ В}$ оралиғида аниқланган. Натижалар шуни кўрсатадики, юқори энергияли тормозловчи нурланиш билан нурлантирилганда Si-SiO₂ чегарасидаги сирт ҳолатлар зичлиги, ўрганилган сирт потенциаллар оралиғида, нурлантириш вақти ортиши билан монотон ортиш характерига эга. Нурланиш энергияси кўчирилиши $F = 7.6 \cdot 10^3 \text{ Ж/см}^2$ га мос бўлган катта вақт давомида нурлантириш натижасида, бутун ўрганилган сирт потенциали соҳасида, юза сатҳлар зичлигининг ўзгариши 10^{11} см^{-2} тартибга эга. Олинган натижалар адабиётлардан олинган натижалар (нурланиш энергияси кўчирилиши $0.87 \cdot 10^2 \text{ Ж/см}^2$ ва $0.87 \cdot 10^3 \text{ Ж/см}^2$ бўлган ҳолдаги Со-60 квантлари билан нурлантириш натижалари) билан таққосланган. Со-60 гамма-квантлари нурланиш энергияси кўчирилиши юқори энергияли тормозловчи нурланишдагига нисбатан бир тартибга кичик бўлган ҳолда ҳам, бутун ўрганилган сирт потенциали соҳасида, сирт зичлиги тахминан бир тартибга кўпроқ ўзгаради. Бундай ўзгаришлар фарқининг сабаби кўрилатган нурланишларнинг энергетик спектрларининг фарқланишидадир.

Сирт ҳолатлари ҳақида қўшимча маълумотлар олиш мақсадида нурлантирилмаган МДЯ транзисторларга, $100^0 - 250^0 \text{ С}$ оралиғида ҳар бир ўрганилган ҳароратда 120 дақиқа давомида, оксидда затвордан тагликка йўналган $5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ кучланганликли электр майдон қўйилган ҳолда, термик –майдон ишлов (ТМИ) берилган. Натижалар шуни кўрсатдики, $100^0, 150^0, 200^0 \text{ С}$ ҳароратлардаги ТМИ энергетик спектрнинг деярлик ўзгаришларига олиб келмайди, аммо 250^0 С да, сирт потенциали 0.6 В га тенг бўлганда, яъни валент зонадан 0.25 эВ масофадаги сатҳга мос келганда, сирт сатҳлар дифференциал зичлиги кескин ортади. ТМИ натижасида юқори ҳарорат таъсирида оксид қатламида делокализацияланган коваклар электр майдон таъсирида яримўтказгич сирт чегараси томонга дрейфланиб, Si-SiO₂ чегара

соҳасида таранг боғларни узилиши билан боғлиқ бўлган нуқсонларни шакллантиришга олиб келадиган реакцияларда қатнашади.

Si-SiO₂ чегара юза сатҳлар интеграл зичлиги ва сток сизиш токига юқори энергияли тормозловчи нурланиш таъсири билан Co-60 квантларнинг таъсири ҳам таққосланган. 1- ва 2-жадвалларда юқори энергияли тормозловчи нурланиш (1-жадвалга қаранг) ва Co-60 манба гамма-квантлари (2-жадвалга қаранг) энергия кўчирилишининг тўртта қийматларига мос келувчи сток сизиш токининг нисбий ўзгаришлари келтирилган.

1-жадвал

Сток сизиш токи ўзгаришининг тормозловчи нурланиш энергия кўчирилиши, сирт сатҳлар интеграл зичлиги ва ток ташувчилар харакатчанлигига боғлиқлиги билан таққослаш

№	F, Дж/см ² , юқори энергияли тормозловчи нурланиш энергия кўчирилиши	ΔN_{ss} , см ⁻² , сирт сатҳлар интеграл зичлиги	μ/μ_0 , харакатчанлик нисбий ўзгариши, μ_0 – нурланишдан олдинги харакатчанлик	I_D/I_{D0} , Сток сизиш токининг нисбий ўзгариши, I_{D0} – нурланишдан олдинги сток сизиш токи
1	10 ¹	1.2 · 10 ¹⁰	0.95	1.70
2	10 ²	1.5 · 10 ¹⁰	0.90	0.85
3	10 ³	2.0 · 10 ¹⁰	0.72	2.00
4	5 · 10 ³	1.3 · 10 ¹¹	0.22	3.70

2-жадвал

Сток сизиш токи ўзгаришининг Co-60 квантлар нурланиш энергия кўчирилиши, сирт сатҳлар интеграл зичлиги ва ток ташувчилар харакатчанлигига боғлиқлиги билан таққослаш

№	F, Дж/см ² , Co-60 квантлар нурланиш энергия кўчирилиши	ΔN_{ss} , см ⁻² , сирт сатҳлар интеграл зичлиги	μ/μ_0 , харакатчанлик нисбий ўзгариши, μ_0 – нурланишдан олдинги харакатчанлик	I_D/I_{D0} , Сток сизиш токининг нисбий ўзгариши, I_{D0} – нурланишдан олдинги сток сизиш токи
1	10 ¹	7.0 · 10 ¹⁰	0.60	3.6
2	10 ²	9.0 · 10 ¹⁰	0.40	3.7
3	10 ³	1.9 · 10 ¹¹	0.10	3.8
4	5 · 10 ³	8.3 · 10 ¹¹	-	3.70

Сизиш токи I_d нинг қиймати базага нисбатан сток кучланиши 5 В бўлганда ва исток билан затвор ерга уланган ҳолда ўлчанган. Тормозловчи нурланиш ва Co-60 квантлар билан нурлантирганда ҳам юза сатҳлар зичлигининг ортиши кузатилади, аммо бу ўзгаришларнинг тезлиги турлича бўлади. Сизиш токининг ўзгариши эса бу ҳоллар учун кескин фарқ қилади.

1-жадвалдан кўринадикки тормозловчи нурланиш билан нурлантирилганда I_d нинг ўзгариши номонотон: кичик нурланиш энергия кўчиришларида камайиб, энергия кўчиришларининг каттароқ қийматларида ортади. Сизиш токининг бундай номонотон ўзгаришлари иккита механизмнинг, яъни ток ташувчилар ҳаракатчанлигининг камайиши ва сиртий концентрациясининг ўзгариш механизмларининг рақобатлашиши билан тушунтирилиши мумкин.

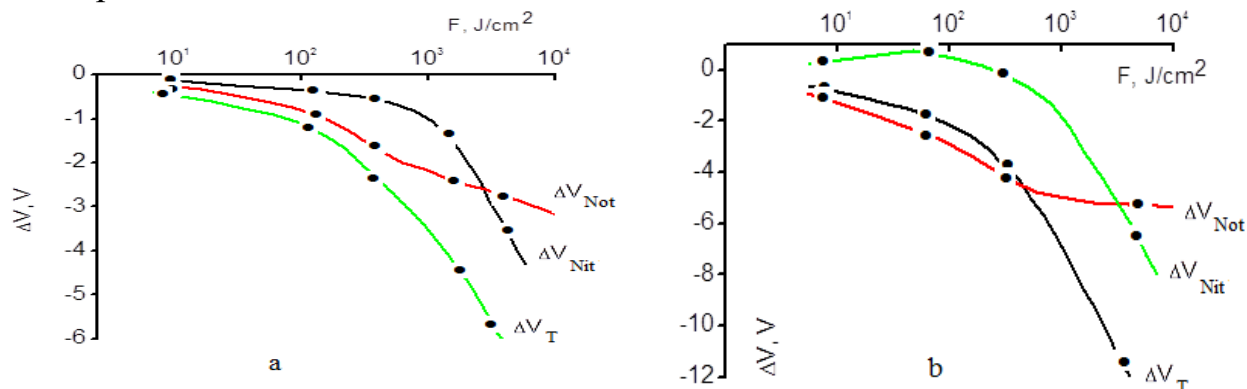
Юқори энергияли тормозловчи нурланишининг таъсирдан фарқли равишда, $Co-60$ квантларининг таъсирида, нурланиш энергия кўчирилишларининг кичик қийматларида ҳам сизиш токи I_d нинг кескин ортиши ва тезда тўйиниши кузатилади (2-жадвалга қара). Сизиш токининг бундай ўзгаришлари ҳаракатчанлик $\mu_{эфф}$ нинг ўзгаришлари билан корреляцияга эга эмас. Инверсион қатламдаги ҳаракатчанлик, юқори энергияли тормозловчи нурланиш таъсиридаги каби, $Co-60$ квантларининг таъсирида ҳам камаяди, аммо бунда ўзгариш тезлиги фарқ қилади. Ҳаракатчанлик камайишига қарамасдан, сизиш токи кичик нурланиш энергия кўчирилишларида ҳам сезиларли ортади. Сизиш токининг бундай ўзгаришлари, $Co-60$ квантларининг ҳатто кичик энергия кўчиришларда ҳам, диэлектрик қатламга киритилган заряд таъсирида сиртий концентрациянинг ўзгариши билан боғлиқ бўлган механизмнинг кучлироқ эканлигидан келиб чиқади. Аёнки, бунинг сабаби тормозловчи нурланиш ва $Co-60$ квантларнинг энергетик спектрларининг фарқи билан боғлиқ. Спектрида фақат иккита чизиқ - 1.17 МэВ ва 1.23 МэВ га эга бўлган $Co-60$ квантлар билан нурлантирилганда оксид қатлами ва $Si-SiO_2$ фазавий чегарада нурланиш ютилиш дозаси, спектрида юқори энергияли квантларга (30 МэВ гача) эга бўлган юқори энергияли тормозловчи нурланиш билан нурлантирилгандагига нисбатан юқорироқ бўлади.

Ушбу бобда юқори энергияли тормозловчи нурланишнинг ва навбатдаги термик-майдон ишловнинг бўсағавий кучланишга ва бўсаға кучланишининг оксид қатламда зарядлар тўпланиши билан боғлиқ ташкил этувчиси ва кремний оксиди-кремний чегарасидаги зарядлар билан боғлиқ ташкил этувчисига таъсири кўрилган. Радиациянинг таъсир механизмини аниқлаш учун бўсаға кучланишининг ўзгариши иккита ташкил этувчига ажратилган: чегарада тўпланган зарядлар ҳисобига ўзгариши ΔV_{Nit} ва оксид қатламида тўпланган зарядлар ҳисобига ўзгариши ΔV_{Not} . ΔV_{Nit} бўсағадан паст ўтиш характеристикасини ўлчаш натижаларидан қуйидаги ифода ёрдамида ҳисобланган:

$$\Delta V_{Nit} = \frac{\Delta S \varphi_B q}{kT \ln(10)},$$

бунда S_{ox} – оксид қатлами сигими, ΔS – бўсағадан паст ўтиш вольтампер характеристикаси тиклигининг ўзгариши, φ_B – база чуқурлигидаги потенциал, T – температура, k – Больцман доимийси. ΔV_{Not} компонента бўсаға кучланиши ўзгариши ΔV_T дан ΔV_{Nit} ни айириш орқали ҳисобланади. 1-расмда ΔV_T ва унинг ташкил этувчилари ΔV_{Nit} ва ΔV_{Not} ларнинг Co^{60} квантлар ва юқори энергияли тормозловчи нурланишнинг энергия

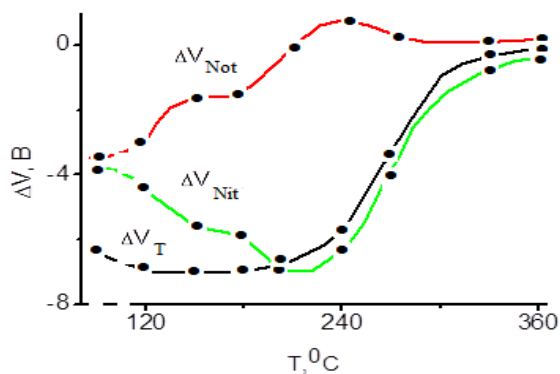
кўчирилишига боғланиши келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, иккала нурланиш учун ҳам бўсаға кучланиш ўзгариши монотон характерга эга, лекин ўзгариш тезликлари бир-биридан фарқ қилади. ΔV_{Not} нинг ўзгариш характери ҳам иккала нурланиш учун бир хил характерга эга ва монотон, ammo ΔV_{Nit} нинг ўзгаришлари бир-биридан фарқ қилади. Бўсаға кучланишининг ўзгариш тезликларининг фарқ қилиши радиациявий эффектларнинг нурланиш интенсивлигига боғлиқлигидан келиб чиқиши аёндыр.



1-расм. Бўсаға кучланиши ўзгариши ΔV_T ва унинг ташкил этувчилари ΔV_{Nit} ва ΔV_{Not} ларнинг юқори энергияли тормозловчи нурланиш (а) ва Со-60 квантларнинг энергия кўчирилишига боғланиши.

Юқори энергияли тормозловчи нурланиш билан нурлантирилган МДЯ транзисторнинг параметрлари тикланишини ўрганиш учун 50-400⁰ С температура оралиғида паст температурали изохрон термик ишлов амалга оширилган. Ҳар бир 30 минутлик термик ишловдан кейин, бўсаға кучланиши ва бўсаға кучланишининг ΔV_{Nit} ва ΔV_{Not} ташкил этувчиларини аниқлаш учун, бўсағадан паст ўтиш характеристикаси ўлчанган. 2-расмда шу ўлчашлар натижалари тасвирланган. Бу расмдан кўриниб турибдики, 210⁰ С гача бўсаға кучланиши кичик ўзгаради, $|\Delta V_{\text{Nit}}|$ эса 120⁰ С дан бошлаб орта бошлайди ва 210⁰ С максимал қийматига эришади. Бу Si-SiO₂ чегарада юза сатхлар зичлигининг ортишини билдиради. Эҳтимол, юза сатхлар зичлигининг ортиши оксид қатламидаги мусбат зарядли шаклланишларнинг сиртга дрейфи билан боғлиқдыр. Оксид қатламидаги мусбат зарядлар камайиши $|\Delta V_{\text{Not}}|$ нинг температура ортиши билан камайишида аксланади. 210⁰ С температурада оксид қатламида радиация таъсирида индукцияланган зарядлар тўлиқ аннигиляцияланадилар.

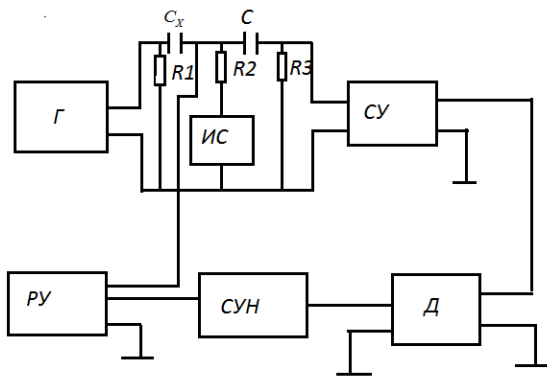
210⁰ С дан юқори температураларда бўсаға кучланишининг ўзгариши деярлик тўлиқ $|\Delta V_{\text{Nit}}|$ нинг ўзгариши, яъни Si-SiO₂ чегарадаги зарядларнинг ўзгариши билан боғлиқдыр. Сиртдаги зарядлар 360⁰ С температурада деярлик тўлиқ аннигиляцияланади. Юза сатхлар зичлигининг камайиши узилган боғларнинг Cl ионлари билан тўйиниши ҳисобига ва чегаравий сатхларнинг аннигиляциясига олиб келувчи ҳаракатчан водород атомларнинг пайдо бўлиши билан боғлиқ бўлиши мумкин.



2-расм. Юқори энергияли тормозловчи нурланиш билан нурлантирилган МДЯ транзистор бўсага кучланиши ΔV_T ва унинг ташкил этувчилари ΔV_{Nit} ва ΔV_{Not} ларнинг ўзгаришининг термик ишлов температурасига боғланиши.

Диссертациянинг «МДЯ асбоблар хоссаларига радиация ва майдон таъсирини экспериментал тадқиқ қилиш» деб номланган учинчи бобида юқори частотали вольтфарад характеристикасини (ЮЧ ВФХ) ўлчаш қурилмалари тавсифи ва ўлчаш мазмуни кўриб ўтилган, ионизацияловчи нурланиш ва ориентацияланган электр майдонининг МДЯ транзистор ён ўтишларининг тескари токи, тешилиш кучланиши ва вольтфарад характеристикаларига таъсирини экспериментал ўрганиш натижалари ва атом кучли микроскопи асосидаги Кельвин проба усули ёрдамида оксид қатламига локал зарядлар киритиш ва унинг потенциалини ўрганиш имкониятлари кўрилган.

ЮЧ ВФХ усули реал МДЯ тузилмасининг юқори частотали сиғимини берилган кучланишга боғлиқ равишда экспериментал ўлчаш ва уни худди шундай параметрли идеал МДЯ транзисторнинг назарий ҳисобланган сиғими билан таққослашдан иборат. Назарий вольтфарад характеристика МДЯ тузилма назарияси асосида ҳисобланади. ЮЧ C-V характеристикаларни ўлчаш ЮЧ кўприкли сиғим ўлчагич ёрдамида, силжитиш кучланиши қўлда бошқариладиган ўзгармас ток манбаи томонидан берилган ҳолда амалга оширилган. Қурилма (3-расм) аррасимон кучланиш генератори (Г), силжитиш манбаи (ИС), селектив кучайтиргич (СУ), синхрон детектор (СД), ноль ўрнатиш занжири (СУН), регистрация қурилмаси (РУ) дан ташкил топган. RC-бўлгичдаги токни ажратиб оладиган қаршилик ўрганилаётган МДЯ транзистор тўлиқ қаршилигидан анча кичик қилиб олинади. Бунда, агар МДЯ транзистор актив қаршилиги ҳисобга олинмаса, кучайтиргич киришидаги сигнал: $V_{вх} = V_{тс} R \omega C$ бўлади, бу ерда $V_{тс}$ – тест сигнал кучланиши, ω – тест сигнал частотаси. Бунда чиқишдаги сигнал ўлчанаётган сиғимга пропорционал бўлади. Тест сигнал частотаси 100 КГц га, амплитудаси 30 мВ га тенг. Синусоидал шаклдаги ўзгарувчан кучланиш ўлчанаётган сиғимга (тузилмага) сиғим ва қаршиликдан иборат бўлган бўлгич орқали берилади. Юклама қаршилигидан олинладиган кучланиш селектив кучайтиргичга берилади. Кучайтиргичдан сигнал селектив детекторга ва кейин ноль ўрнатиш занжири орқали чиқиш ва қайд қилиш қурилмасига боради. Сиғимнинг кучланишга боғланишини ўрганиш учун МДЯ тузилмага силжитиш манбаидан бошқариладиган кучланиш берилади.

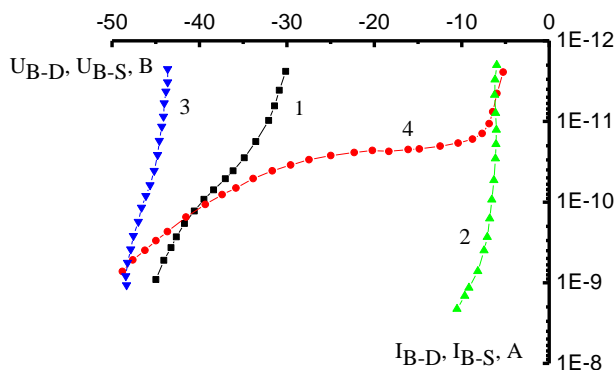


3-расм.МДЯ тузилма юкори частотали C-V характеристикасини ўлчаш курилмаси блок-схемаси.

Ушбу бобда МДЯ транзистор исток-база ва сток-база ўтишларининг тескари токи ва тешилиш кучланишларига бир вақтнинг ўзида $Co-60$ гамма квантларнинг ва йўналтирилган электр майдонининг таъсири натижалари ҳам келтирилган. Нурлантириш вақтида йўналтирилган электр майдон билан таъсир қилиш мақсадида МДЯ транзистор затворида стокга нисбатан $U_{G-D} = +10$ В кучланиш берилган, бунда исток билан база ерга уланган бўлади. Кремний сиртига яқин соҳаларда майдон кучланганлигининг ташкил этувчиси 10^7 В/м тартибда бўлади. Натижалар шуни кўрсатадики, В-D ўтишнинг тескари вольтампер характеристикаси деярлик нурлантиришдан олдинги кўринишда бўлади, лекин кичикроқ тешилиш кучланишга эга бўлади (4-расм, 1 ва 2 эгри чизиқлар). В-S ўтишнинг тескари токи нурлантиришдан кейин ортади, аммо тешилиш кучланишининг ўзгариши кичик бўлади (4-расм, 3 ва 4 эгри чизиқлар). В-S ва В-D ўтишларининг тескари токининг бундай ўзгариши уларнинг сиртида ионизацияловчи гамма нурланиш таъсирида кремний билан оксид чегарасидаги кремний чегара сиртида зарядлар миқдорининг ўзгариши, яъни унинг тўпланиши билан боғлиқдир. Si-SiO₂ чегарасида ва оксид қатламида мусбат зарядлар тўпланиши МДЯ транзисторнинг бўсаға кучланишининг ўзгаришида номоён бўлади. 5×10^6 Р дозаси билан нурлантиришда барча намуналарда бўсаға кучланиши 6-8 В га каттароқ манфий кучланишлар соҳасига силжиган. Оксид қатламида ва чегарада тўпланган мусбат зарядлар базанинг ҳажмидан (n - соҳадан) электронларни сиртга тортади. Оксид қатлами сток соҳасининг қандайдир қисмини ҳам қоплагани учун оксиддаги мусбат зарядлар сток соҳасидаги электронларни сиртга тортади ва етарли даражада мусбат заряд тўпланганда p⁺- сток соҳасининг сирт қисмининг ўтказувчанлик тури ўзгариб, n- p⁺ ўтишда сиртий ўтказувчан канал ҳосил бўлади. Сиртий ўтказувчан канал иккала В-S ва В-D ўтишларда ҳам ҳосил бўлади, аммо бу каналларнинг, эҳтимол, кесими ва геометрияси турлича бўлиши мумкин.

В-D ўтишда тешилиш кучланишининг пасайиши, оксидда тўпланган мусбат зарядлар томонидан сиртга тортиладиган электронлар концентрациясининг ортишдан келиб чиқадиган ўтиш кенглигининг торайиши билан боғлиқ бўлиши мумкин. Ўтишнинг сиғими, яъни конденсатор ёндашишида, ўтиш сиртининг ўтиш кенглигига нисбати билан аниқланганлиги учун ва ўтиш сиғими деярлик ўзгармаганлиги ўтиш сиртининг ҳам мос равишда камайишини билдиради. Тескари вольтампер

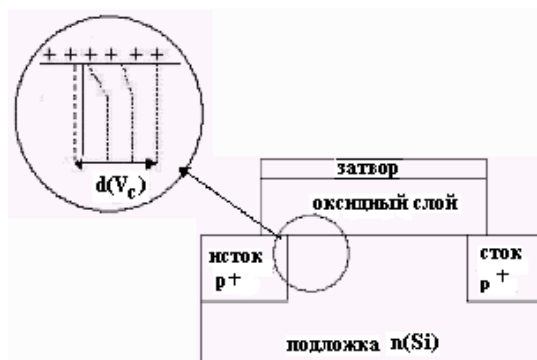
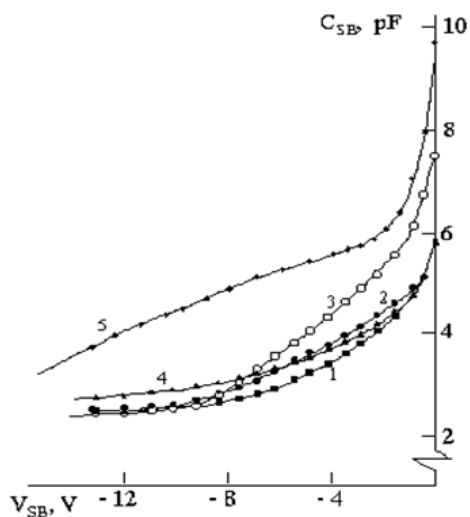
характеристика бу ҳолда электр тешилишига мос бўлган, лекин кичик тешилиш кучланишли вольтампер характеристикага ўхшаган бўлади (4-расмга қаранг). Эҳтимол шундай ўзгаришлар ҳисобига ўтишнинг айрим қисмларида тешилишнинг бошқа механизмлари (масалан, туннел тешилиш) ҳам сезиларли бўлиб қолади.



4-расм. МДЯ транзистор В-Д (1,2) ва В-С (3,4) ўтишларининг нурлантиришдан олдинги (1,3) ва кейинги (2,4) тескари вольтампер характеристикалари.

Оксид қатламида зарядларнинг нотекис тақсимланишининг МДЯ транзистор ён ўтишларининг $C-V$ характеристикаларига таъсири кўрилган. Оксид қатламида радиация томонидан индукцияланган зарядларнинг нотекис тақсимланишига эришиш учун экспозицион дозаси 300 Р/с бўлган Со-60 гамма-квантлар билан нурлантириганда намуналарнинг биринчи гуруҳида стокга нисбатан истокга ± 10 В кучланиш берилган. Затвор ва база манбанинг мусбат кутбига уланган. Таққослаш учун намуналар иккинчи гуруҳи кучланиш берилмаган ҳолда нурлантирилган. Ўрганиладиган намуналар сифатида солиштирма қаршилиги $\rho=7.5$ Ом·см ва канал узунлиги 11 мкм бўлган p-каналли МДЯ транзисторлар олинган. Биринчи ва иккинчи гуруҳ намуналарининг S-V ўтишларининг типик $C-V$ боғланишлари 5-расмда ва МДЯ транзисторнинг схематик расми 6-расмда келтирилган. Натижалар шуни кўрсатадики, бу боғланишларнинг ўзгаришлари асосан биринчи гуруҳ намуналарда сезиларли кечади. S-V ўтиш p^+-n ўтиш бўлганлиги учун унинг нурланишдан олдинги $C-V$ боғланиши p^+-n ўтишнинг сиғим моделига мос келади (5-расм, 1 эгри чизик). Лекин оддий p^+-n ўтишдан фарқли равишда МДЯ транзистор S-V ўтишининг сирти оксид қатлами билан қопланган, ва шу сабабли оксид қатламида ва S-V ўтишнинг сиртидаги радиациявий индуцирланган заряд n-Si тагликнинг ҳажмидан электронларни сиртга тортади. Яримўтказгич сиртига тортиладиган электронлар концентрацияси киритилган зарядларнинг потенциалига ҳам боғлиқ бўлади. Сиртда электронлар концентрациясининг ортиши ҳажмий зарядлар соҳасининг (ХЗС) кенглигининг камайишига ва, демак, S-V ўтиш чегарасининг эгриланишига олиб келади (6-расм, қўшимча). ХЗС кенглигининг камайиши эса ўтиш сиғимининг ортишига олиб келади (5-расм, 3- эгри чизик). Нурлантириш дозаси ортиши билан, $C-V$ боғланишда сиғим, кучланиш бўйича биржинсли бўлмаган ҳолда, каттароқ қийматлар соҳасига силжийди (5-расм, 5 - эгри чизик) ва бунда катта бўлмаган экспозицион дозаларда

($5 \cdot 10^6$ P гача) қандайдир критик кучланиш V_C дан каттароқ кучланишларда сиғим ўзгармайди (5-расм, 3- эгри чизик). Бундай ҳолат S-V ўтиш чегарасининг V_C кучланишдан каттароқ кучланишларда тўғриланиши билан боғлиқ бўлиши мумкин (6-расм, қўшимча). V_C дан каттароқ кучланишларда сиғим нурлантиришдан олдинги ҳолатига мос ХЗС кенглиги билан белгиланади. ХЗС нинг V_C га мос d_C кенглиги, киритилган зарядлар томонидан яримўтказгич сиртининг асосий заряд ташувчилар билан бойитилган соҳасининг чизикли ўлчамини белгилайди.

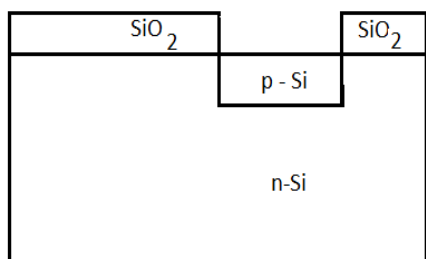


5-расм. S-V ўтишнинг нурлантиришдан олдинги (эгри чизик 1) ва электродларда кучланишсиз 10^7 P экспозиция билан (эгри чизик 2), истокда +10 В ва экспозиция $5 \cdot 10^6$ P (эгри чизик 3), истокда -10В $5 \cdot 10^6$ P экспозиция билан (эгри чизик 4), истокда +10 В 10^7 P экспозиция билан (эгри чизик 5) нурлантиригандан кейинги C-V боғланишлари.

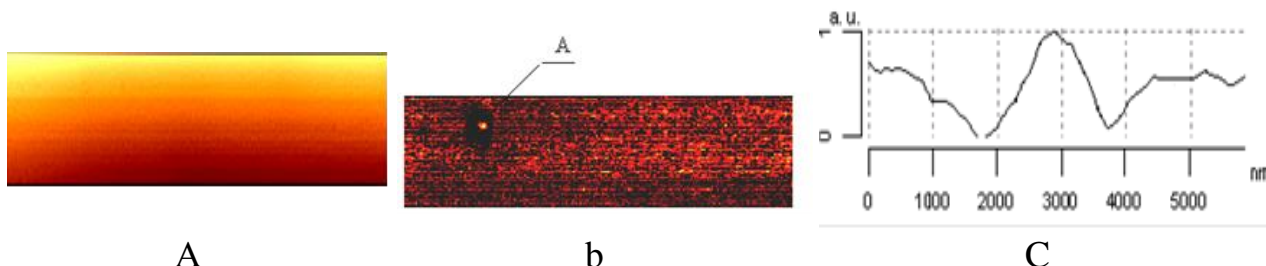
6-расм. p-каналли МДЯ транзисторнинг схематик расми. Қўшимчада S-V ўтишнинг сиртидаги оксид қатламининг бир қисми кўрсатилган, штрих чизиклар билан ўтишга турли кучланишлар берилганда шу ўтишнинг чегаралари кўрсатилган. $d(V_C)$ – V_C кучланишдаги ўтиш кенглиги.

Ушбу бобда шунингдек, атом кучли микроскопи (АКМ) асосида Кельвин проба усулини диэлектрик қатламга киритилган зарядларнинг потенциалини ўрганиш учун қўллаш имкониятларини тадқиқ қилиш натижалари ҳам келтирилган. Оксид қатламга АКМ ёрдамида зарядлар киритиш ва уни детекторлаш имкониятларини ўрганиш учун 7-расмда кўрсатилган, махсус, диэлектрик-яримўтказгич тузилмаси тайёрланган. SiO_2 сиртига зарядлар киритиш («ёзиш») учун бу сиртга яқинлаштирилган АКМ нинг игнасига контактсиз режимда n - Si га нисбатан +10 В кучланиш 15 мин давомида берилган. Зарядланган соҳанинг олинган Кельвин тасвири шуни кўрсатадики, ёруғ марказий соҳа атрофида ҳалқасимон қора соҳа ҳосил бўлади. Эҳтимол бу ҳолда, «ўқиб олиш» жараёнида локал зарядлардан узоқроқ масофада, тагликга манфий кучланиш берилгани учун, игнада мусбат заряд тўпланади. Мусбат локал зарядлар устидан ўтаётганда игнада

индукцияланган зарядлар ўзгаради ва куч градиенти контурида минимум максимумга ва яна тескарисига ўзгаради (8-расмга қаранг). Куч градиенти контури ўзгаришига мос равишда тасвир марказида ёруғ доғга айланадиган қора соҳадан иборат бўлади ва шунга ўхшаш тасвир бизда кузатилмоқда.



7-расм. Оксид қатламига АКМ ёрдамида заряд киритилишини ўрганиш учун тайёрланган намуна тузилмаси.



8-расм. Топография (а), зарядланган соҳа сирт потенциали тасвири (б) ва шунга мос шу соҳага кўндаланг йўналишдаги потенциал тақсимоти (с). Зарядланган соҳа А харф билан кўрсатилган.

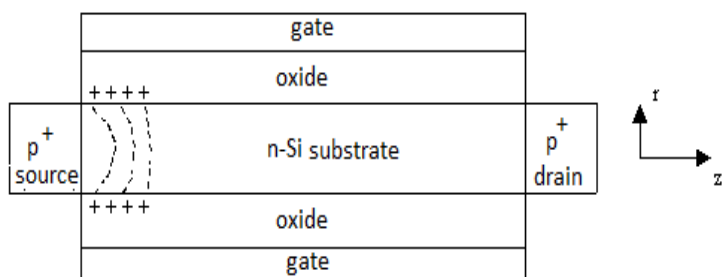
Диссертациянинг «Оксид қатламига киритилган зарядларнинг МДЯ транзистор ён вольтфарад характеристикасига таъсирини ўрганиш» деб номланган тўртинчи бобда МДЯ транзистор ён ўтишларининг вольтфарад характеристикаларини ишлаб чиқилган усул ва мос дастур ёрдамида моделлаштирилиши кўрилган. Шу дастур ёрдамида оксид қатламига киритилган зарядларнинг МДЯ транзистор ён ўтишларининг вольтфарад характеристикасига таъсири ўрганилган.

МДЯ транзисторнинг ён исток-база ўтиши одатда кескин p^+-n (ёки n^+-p) ўтиш бўлганлиги сабабли унинг сиғимини ҳисоблашда ясси конденсатор ёндашишидан фойдаланиб, ҳажмий заряд соҳаси кенглигини баҳолаш мақсадида ток ташувчилар концентрациясининг тақсимотини аниқлаш мумкин. База соҳасида ташувчилар концентрацияси тақсимотини аниқлаш учун шу соҳада потенциаллар тақсимотини аниқлаш керак.

Умумийликни йўқотмаган ҳолда, ҳисоблашни соддалаштириш учун, МДЯ транзистори цилиндрик шаклда олинган (9-расмга қаранг). Оксид қатламига мусбат зарядлар киритилган ҳолда яримўтказгич базасининг исток-база ўтишининг ҳажмий зарядлар соҳасида ташувчилар концентрациясининг цилиндр ўқиға нисбатан перпендикуляр (r) ва параллел (z) йўналишлардаги тақсимоти нафақат ўтишдаги потенциал тақсимоти $\varphi(z)$, балки оксид қатламига киритилган зарядлар потенциали $\psi(z,r)$ га ҳам боғлиқ бўлади:

$$p_n(z, r) = p_{n0} \exp(e(\varphi(z) - \psi(z, r)) / kT),$$

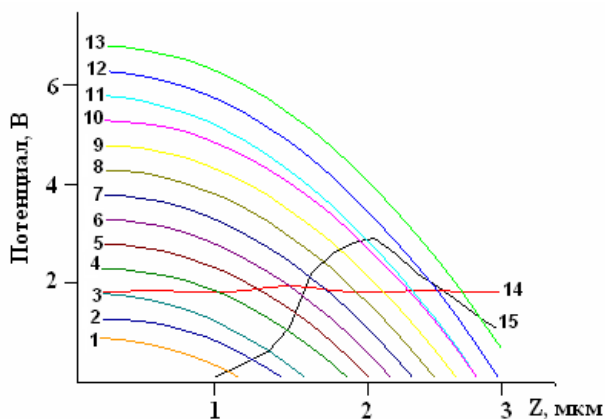
бу ерда p_{n0} – база ҳажмидаги асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси. Соддароқ бўлиши учун ўтишдаги потенциал тақсимоти фақат z га боғлиқ деб қараймиз. Бу ҳолда мувозанатли концентрацияга эга $p_n(z,r)=p_{n0}$ ли нуқталарнинг координаталари $\varphi(z)=\psi(z,r)$ шартдан аниқланади.



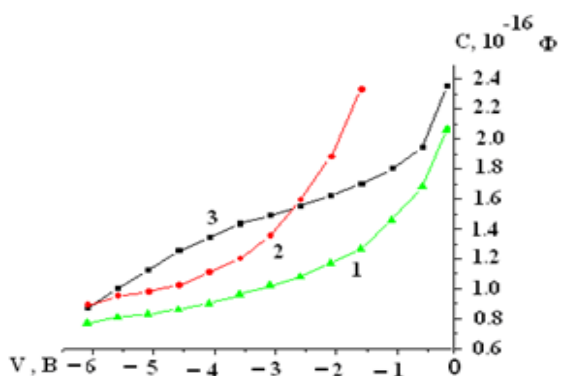
9-расм. Оксид қатламига киритилган зарядли цилиндрик коаксиал МДЯ тузилиши.

Ўтишдаги турли кучланишлар учун $\varphi(z)$ ва турли r лардаги $\psi(z,r)$ боғланишларни тузамиз ва металлургик чегарага z ўқининг бошини боғлаб, бу тақсимотларнинг кесишиш нуқталари орқали ток ташувчилар концентрацияси мувозанатли бўлган нуқталарининг z ўқидаги координатасини топамиз. Бу координаталар яримўтказгич сиртидан (Si-SiO_2 оралиқ чегарасидан) r масофада, берилган кучланишда, ўтиш кенглиги d ни топишга имкон беради. d нинг маълум қийматидан ясси конденсатор ёндашишида ўтишнинг сиғимини баҳолаш мумкин бўлади.

10-расм (1-13 эгри чизиклар) да турли V кучланишларда ўтишдаги $\varphi(z)$ нинг тақсимоти ва маълум r даги $\psi(z,r)$ (10-расм, 14 - эгри чизик) тақсимоти келтирилган. 10-расмда 14-эгри чизик билан тасвирланган $\psi(z,r)$ потенциали Пуассон тенгламасини сонли усул билан ечиб топилган. У оксид қатламида, зичлиги $\rho=500$ Кл/м³, исток-сток оралиғи маркази устида, $\Delta z=300$ нм интервалда локаллашган зарядлар майдони потенциалининг тақсимотини тасвирлайди. Расмдаги $\varphi(z)$ тақсимотларнинг z ўқлари билан кесишиш нуқталари ўтишнинг, оксид қатламига зарядлар киритилмасдан олдинги, ҳажмий заряд соҳаси билан мувозанатли концентрация бошланадиган нуқталарнинг координаталари, ва улар ўтиш кенглигини аниқлаб берадиган нуқталардир. Натижалар шуни кўрсатадики, оксид қатламига зарядлар киритилгандан кейинги ҳажмий заряд соҳаси ўлчамлари, ва демак, ўтиш кенглиги ўзгаради. Бу ўлчамлар мувозанатли концентрация бошланадиган нуқталарнинг координаталари билан аниқланади, ва бу координаталар энди $\varphi(z)$ нинг z ўқи билан кесишиш нуқталари эмас, балки $\psi(z,r)$ тақсимоти билан кесишиш нуқтасининг z координатаси билан аниқланади. 9-расмдан олинган маълумотлар асосида МДЯ транзистор оксид қатламига зарядлар киритилган ва киритилмаган ҳоллардаги $C-V$ боғланишларни тузиш мумкин (11-расмга қаранг). Графикдан кўриниб турибдики, сиғим кўриляётган барча кучланишлар соҳасида ортади. $C-V$ боғланишнинг бундай характери экспериментал натижаларда ҳам кўринади.



10-расм. Кўрилатган исток-база ўтишига қадами 0.5 В билан 0 дан 6 В гача кучланишлар берилганда ундаги потенциал тақсимотлари (1-13 - эгри чизиқлар), оксид қатламига киритилган зарядларнинг, яримўтказгич базанинг сиртдан 300 нм чуқурликда ҳосил қиладиган потенциал тақсимоти (14 - эгри чизиқ) ва МДЯ транзисторининг тажрибада олинган C-V боғланишига мос боғланишни ҳосил қиладиган оксид қатламига киритилган зарядлар потенциали тақсимоти (15 - эгри чизиқ).



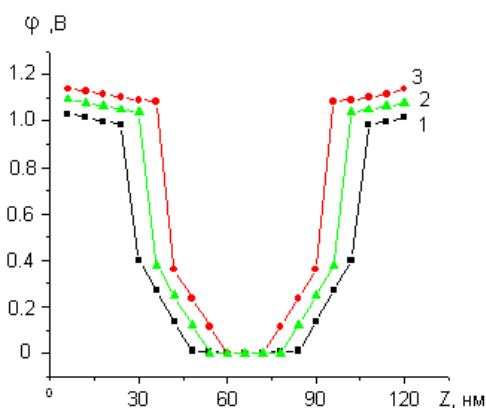
11-расм. МДЯ транзистор исток-база ўтишининг ҳисобланган C-V боғланишлари: 1 - оксид қатламига зарядлар киритилмаган ҳолда; 2, 3- оксид қатламига 15-расмда келтирилган, мос равишда 14- ва 15 - эгри чизиқлар билан берилган потенциал тақсимотига эга бўлган зарядлар киритилган ҳолда.

«Диэлектрик-яримўтказгич чегараси ёнидаги наноструктураларни назарий тадқиқ қилиш ва МДЯ транзистор ён сиғимини моделлаштириш» деб номланган бешинчи бобда диэлектрик билан чегарага эга яримўтказгич сирти ва ҳажмида бошқариладиган квант чуқурликлар назарий ўрганилган ва TCAD Sentaurus дастури ёрдамида диэлектрик қатламида локал зарядларга эга МДЯ транзистор ён исток-база ўтишларининг вольтфарад характеристикалари моделлаштирилган. Боб охирида олинган натижалар бўйича қисқа хулосалар келтирилган.

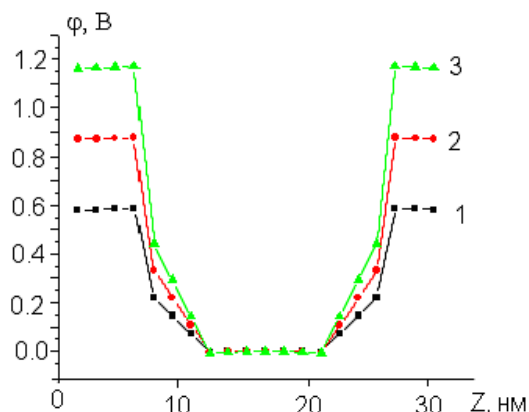
Ушбу бобда аналитик ва сонли усуллар ёрдамида оксид қатламида тақсимланган зарядлар орқали кремний оксиди-кремний чегарасида наномасштабли потенциал чуқурликлар шакллантирилиш имкониятлари ҳам кўрилган. Диэлектрик қатламига иккита зарядланган халқа киритилган ҳолда, улар орасидаги турли масофаларда ва турли заряд зичликларида, кўрилатган цилиндр оқи бўйлаб потенциалнинг тақсимотини ҳисоблаш натижалари 12- ва 13-расмларда келтирилган.

Расмлардан кўриниб турибдики, оксид қатламига киритилган зарядларнинг кўрилатган тақсимотида цилиндр ўқида бир ўлчамли потенциал чуқурлик шаклланади. Халқалар орасидаги масофа камайиши потенциал чуқурлиқнинг торайишига ва чуқурлиқнинг ортишига олиб келади. Потенциал чуқурлиги зарядлар зичлигига жуда боғлиқ (13-расмга қараганг),

кенглиги эса асосан халқалар орасидаги масофа билан белгиланади (12-расмга қаранг).



12-расм. Оксид қатламига иккита зарядланган халқа киритилган цилиндрнинг ўқи бўйлаб потенциал тақсимоти. Зарядлар зичлиги $1.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ва халқалар қалинлиги 24 нм, халқалар орасидаги масофа 36 нм (1), 24 нм (2), 12 нм (3). Цилиндр радиуси 30 нм.

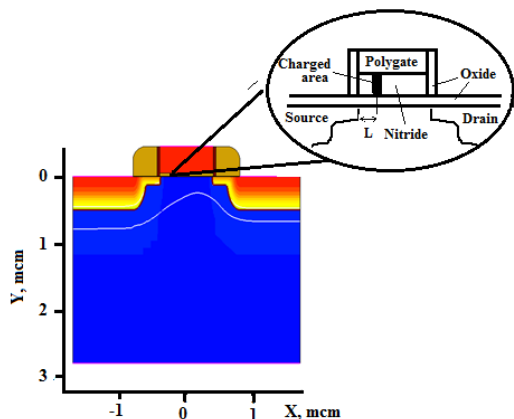


13-расм. Оксид қатламига иккита зарядланган халқа киритилган цилиндрнинг ўқи бўйлаб потенциал тақсимоти. Зарядлар зичлиги $3.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (1), $5.7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (2), $7.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (3), халқалар қалинлиги 6 нм, улар орасидаги масофа 9 нм.

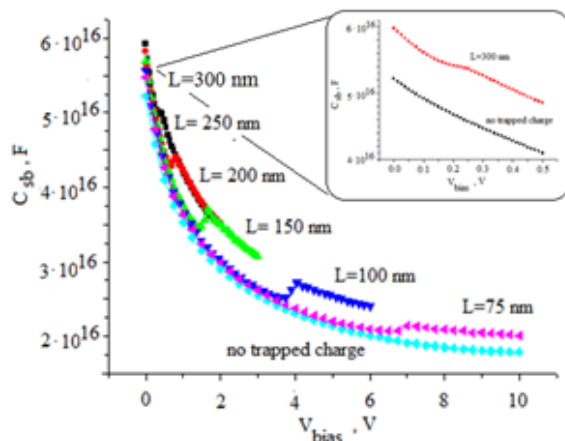
TCAD Sentaurus дастури ёрдамида шунингдек металл-нитрид-оксид-яримўтказгич (МНОЯ) транзисторининг нитрид қатламига канал бўйлаб истокдан турли масофаларда киритилган локал зарядларнинг исток-база ён ўтишининг вольтфарад характеристикасига таъсирининг икки ўлчамли моделлаштирилиши амалга оширилган. Поликремний затворининг узунлиги 800 нм, SiO_2 ва нитрид қатламларининг қалинликлари, мос равишда, 3 ва 50 нм. Р-базанинг легирланиш концентрацияси 10^{16} см^{-3} бўлиб, исток ва сток n-соҳалари концентрациялари Гаусс тақсимоти билан максимал концентрация 10^{20} см^{-3} дан пасайиб, $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ гача тушади. Локал зарядлар канал бўйлаб чекли ўлчамларга эга бўлган бир жинсли зарядланган соҳа билан моделлаштирилган. Бу соҳанинг заряд зичлиги $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, канал бўйлаб узунлиги эса 80 нм қилиб олинган.

14-расмда моделлаштирилган транзистор кўриниши келтирилган ва локал зарядларнинг жойлашиши тасвирланган. Ҳисоблаш учун дрейф-диффузия модели ишлатилган ва Шокли - Рид - Холл рекомбинацияси, кучли майдонда тезлик тўйиниши модели ва майдоннинг нормал ташкил этувчиларининг таъсири эътиборга олинган. Вольтфарад характеристикасини ҳисоблаш учун частотаси 1 МГц бўлган кучсиз ўзгарувчан сигнал усули ишлатилган. Моделлаштиришда фойдаланилган физик модель экспериментал ўлчанган исток-база ўтишларнинг C-V характеристикалари асосида калибровкаланган. Калибровкаланган модель ўрганилган транзистор исток-база ўтишининг вольтфарад характеристикаларини моделлаштиришда ишлатилган. Моделлаштириш натижалари шуни кўрсатадики (15-расмга

қаранг), локал зарядларнинг нитрид қатламига киритилиши вольтфарад характеристикада, кучланишнинг қандайдир V_{jump} қийматларидан бошлаб, сиғимнинг сакрашига олиб келади. Расмдан кўришиб турибдики, V_{jump} нинг қиймати локал зарядларнинг истокга нисбатан жойлашиш масофасига боғлиқ бўлар экан.



14-расм. Моделлаштирилган транзистор. Қўшимчада зарядланган соҳа ва унинг истокдан унгача бўлган масофаси L кўрсатилган.



15-расм. МНОЯ транзистор исток–база ўтишининг нитрид қатламига локал зарядлар киритилмаган ва истокдан турли L масофаларда зарядлар киритилган ҳоллардаги C - V характеристикалари.

ХУЛОСА

Микрометр ва нанометр ўлчамлардаги МДЯ транзистор характеристикаларига юқори энергияли тормозловчи нурланиш, Со-60 гамма квантлар, термик-майдон, термик ишловлар таъсирини ва диэлектрик қатламга нотекис киритилган зарядларнинг ён ўтишлар вольтфарад характеристикаларига таъсирини экспериментал ва моделлаштириш бўйича тадқиқотлар натижалари асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Радиация ва майдон таъсири, диэлектрик-яримўтказгич чегараси бўйлаб радиациявий индукцияланган зарядлар тақсимотиға боғлиқ равишда, МДЯ транзисторнинг исток-таглик ва сток-таглик ўтишларининг сизиш тоқлари ва тешилиш кучланишларининг ўзгаришига олиб келиши кўрсатилган.

2. Иккала турдаги радиация таъсирида ҳам бўсаға кучланиши ва унинг оксид қатламида тўпланган зарядлар билан боғлиқ бўлган ташкил этувчиси, нурланиш энергия кўчирилиши ортиши билан ортишлари, аммо Со-60 квантлари билан нурлантирганда ортиш тезлиги, юқори энергияли тормозловчи нурланиш билан нурлантиргандагига нисбатан деярлик икки баробар юқори эканлиги аниқланган.

3. Нурланиш энергия кўчирилиши $F = 5 \cdot 10^3$ Дж/см² бўлган юқори энергияли тормозловчи нурланиш билан нурлантирилган МДЯ транзистор бўсаға кучланиши ва унинг ташкил этувчилари 360⁰ С температура билан термик ишлов берилганда қайта тикланиши аниқланган.

4. Оксид қатламида радиациявий индукцияланган зарядлар таъсирида юзага келадиган рақобатли иккита механизм, яъни ток ташувчилар ҳаракатчанлиги камайиши ва яримўтказгич сиртининг асосий заряд ташувчиларнинг концентрациясининг камбағаллашиши, таъсирлари туфайли нурланиш энергияси кўчирилишининг ортиши билан сизиш токининг номонотон ўзгариши аниқланган.

5. Ионизацияловчи Co-60 квантлар ва ориентирланган электр майдонининг бир вақтнинг ўзида таъсири, диэлектрик қатламида зарядларнинг нотекис тақсимланганлиги сабабли, МДЯ транзистор ён исток-таглик ўтишининг вольтфарад характеристикасининг кучланишлар ўқи бўйлаб нотекис ўзгаришига олиб келиши илк бор кўрсатилган. Бунда сиғимнинг ўзгариши нурлантириш вақтидаги электр майдон ориентациясига боғлиқ бўлиши аниқланган.

6. МДЯ транзисторнинг Si-SiO₂ чегарасига киритилган зарядларни ва унинг чегара бўйлаб тақсимланишини аниқлаш ва зарядларнинг канал бўйлаб чизиқли ўлчамини баҳолаш усули таклиф қилинган. Истокга мусбат 10 В кучланиш берилган ҳолда Co-60 квантлар билан кичик экспозицион дозаларда ($5 \cdot 10^6$ Р) нурлантирилганда радиациявий индукцияланган зарядлар асосан оксид қатламнинг исток соҳасига яқин соҳада тўпланиши кўрсатилган. Истокдаги бундай кучланиш остида нурлантириш дозасининг ортиши (10^7 р) заряд соҳасини кенгайтишига олиб келиши, кучланиш берилмаган ҳолдаги нурлантириш эса зарядларнинг асосан оксид қатламининг марказий соҳасида тўпланишига олиб келиши аниқланган.

7. Атом кучли микроскоп асосидаги Кельвин пробаси ёрдамида, Si-SiO₂ тузилманинг SiO₂ сиртига йўналтирилган микроскоп зондига тузилманинг n-Si таглигига нисбатан 15 дақиқа вақт давомида, контактсиз модада +10 В кучланиш бериб оксид қатламига 1000 нм тартибдаги чизиқли ўлчамда зарядлар киритиш («ёзиш») усули таклиф этилган.

8. Сонли моделлаштириш орқали, зичлиги $\rho = 500$ Кл/м³ бўлган зарядларнинг оксид қатламида исток-сток оралиғи марказий соҳасида $\Delta z = 300$ нм интервалда киритилиши МДЯ транзистор ён ўтиши сиғимининг вольтфарад характеристикасининг барча кучланишлар соҳасида ортишига олиб келиши кўрсатилган, аммо сиғимнинг ортиш катталиги, берилган кучланишда, заряднинг потенциали тақсимотига боғлиқ эканлиги ҳам кўрсатилган.

9. Диэлектрик-яримўтказгич цилиндрик тузилмаси диэлектрик қатламида ҳалқасимон битта ёки иккита зарядлар соҳаси киритилса, цилиндр ўқида бир ўлчамли потенциал чуқурлиқ ҳосил бўлиши, ва унинг параметрлари ҳалқанинг қалинлиги ва зарядларнинг зичлигига боғлиқлиги кўрсатилган. Иккита ҳалқа киритилганда потенциал чуқурлиқ параметрлари ҳалқалар орасидаги масофага ҳам боғлиқ бўлади.

10. Цилиндрик диэлектрик-яримўтказгич тузилманинг диэлектрик қатламига ҳалқасимон зарядлар киритилганда яримўтказгич сиртида, диэлектрик билан оралиқ чегара яқинида, потенциал чуқурлиқ

шакллантириш усули таклиф этилган. Киритилган иккита ҳалқанинг зарядлар зичлиги $9.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, ҳалқа кенгликлари 6 нм дан ва ҳалқалар орасидаги масофа 9 нм бўлганда яримўтказгич сиртида ҳосил бўладиган квант симнинг z йўналишидаги чуқурлиги 0.4 В ва радиуси бўйлаб 0.15 В га етиши мумкин.

11. TCAD Sentaurus дастури ёрдамида моделлаштириш орқали, базасининг легирланиш концентрацияси 10^{16} см^{-3} бўлган МНОЯ транзистор нитрид қатламига канал бўйлаб чизиқли ўлчами 80 нм бўлган локал зарядлар киритилганда ён ўтишларининг вольтфарад характеристикасида сиғимнинг кескин сакраши илк бор аниқланган ва унинг вазияти локал зарядларнинг истокга нисбатан вазиятига боғлиқ бўлиши кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM/T.34.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

УРГЕНЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АТАМУРАТОВ АТАБЕК ЭГАМБЕРДИЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СВОЙСТВА
ГРАНИЦЫ ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК, И
МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕТРОВЫХ
И НАНОМЕТРОВЫХ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSc) ДИССЕРТАЦИИ
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2019

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2017.3.DSc/FM97.

Докторская диссертация выполнена в Ургенческом государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, и резюме на английском языке) размещен на веб-странице Научного совета (www.fti.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziynet» (www.ziynet.uz).

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

Официальные оппоненты: **Антонио Гарсиа Лоурейро**
доктор наук, профессор (Испания)
Каримов Иброхим Набиевич
доктор физико-математических наук
Гулямов Абдурасул Гафурович
доктор физико-математических наук

Ведущая организация: **Каракалпакский государственный университет**

Защита диссертации состоится «___»_____2019 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 при Физико-техническом институте. Адрес: 100084, г.Ташкент, ул. Чингиз Айтматов, 2Б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ___). (Адрес: 100084, г.Ташкент, ул. Чингиз Айтматов, дом 2Б. Тел/Факс: (+99871) 235-30-41).

Автореферат диссертации разослан «___»_____2019г.

(реестр протокола рассылки № _____ от _____ 2019г.).

Н.Р. Аvezова
председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней, д. т. н.

О.А. Абдулхаев
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней,
доктор философии по ф.-м. н.

А.В. Каримов
председатель Научного семинара при
Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м. н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире одним из перспективных направлений, в ускоренно развивающейся области физики полупроводниковых приборов, является создание приборов на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), стойких к различным внешним воздействиям и имеющих достаточно малые размеры обеспечивающие большую степень интеграции в интегральных микросхемах. В последние годы МДП структуры широко применяются в качестве основного составного элемента современных электронных устройств в различных сферах, среди которых можно отметить полупроводниковые элементы памяти, мобильные устройства связи, различные медицинские имплантационные датчики и техника космической промышленности. В связи с этим исследование свойств МДП структур и приборов на его основе является актуальной задачей физики полупроводниковых приборов.

В сегодняшний день в мире обращается большое внимание изучению влияния на характеристики МДП транзисторов различных внешних воздействий, а также раскрытию влияния заряда в диэлектрическом слое и на границе раздела диэлектрик-полупроводник на параметры и характеристики транзистора. В связи с этим важными задачами физики полупроводниковых приборов считаются выявление механизма генерации поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник при воздействии ионизирующего излучения, определение закономерностей влияния неравномерного накопления заряда в диэлектрическом слое и на границе диэлектрик-полупроводник, обусловленного воздействием радиации и электрического поля.

В Республике Узбекистан уделяется большое внимание развитию науки, в частности особое внимание уделяется развитию физики полупроводниковых приборов и электроники. В этом плане учеными республики получены важные результаты по получению новых полупроводниковых материалов, структур на их основе и влиянию различных внешних воздействий на их характеристики. В стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы указаны задачи стимулирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии. В этом аспекте одной из важных задач является разработка новых материалов электронной техники и структур на их основе, стойких к различным внешним воздействиям и эффективных методов контроля их параметров.

Данное диссертационное исследование в определённой степени соответствует задачам, обозначенным 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. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации¹. Научные исследования по влиянию зарядов на граничных состояниях и в подзатворном диэлектрическом слое и их распределения на характеристики приборов на основе МДП структур, как при влиянии радиационного ионизирующего излучения, так и при термообработках, активно ведутся в ведущих научных центрах и университетах мира: Институт космической и оборонной электроники университета Вандербилт, Национальная лаборатория Сандиа, Стенфордский университет (США), Межуниверситетский центр электроники (Бельгия), Университет Сейжонг (Южная Корея), Институт радиотехники и электроники РАН, Московский инженерно-физический институт, Санкт-Петербургский государственный университет (Российская Федерация), Университет Нагоя, Техническая исследовательская лаборатория Ниппон Хосо Кио Каи и Техническая лаборатория полупроводниковых приборов Тошиба (Япония), Технический университет Рейн Вестфаль Аачен (Германия), Физико-технический институт, Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, Национальный университет Узбекистана, Каракалпакский, Андижанский и Ургенчский государственные университеты (Узбекистан).

В мире по исследованиям в направлении влияния зарядов на граничных состояниях и в подзатворном диэлектрическом слое и их распределения на характеристики, стабильность, надежность МДП приборов на основе различных полупроводников, как при влиянии радиационного ионизирующего излучения, так и при термообработках, был решен ряд

¹ Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе Fleetwood D.M. //Microelectronics Reliability, 2018, Volume 80, Pages 266-277.; Kaczer B., Franco J., Weckx P., Roussel Ph. J., Putcha V., Bury E., Simicic M., Chasin A., Linten D., Parvais B., Catthoor F., Rzepa G., Waltl M., Grasser T.// Microelectronics Reliability. 2018, Volume 81, Pages 186-194.; Heesoon Chae, Somyeong Shin, Jaehoon Choi, Sunae Seo.//Current Applied Physics, 2015, Volume 15, Issue 11, Pages 1412-1416.; Гольдман Е.И., Ждан А.Г. Новый подход к созданию нанoeлектронных систем в размерно-квантующем потенциальном рельефе встроенных зарядов в изолирующих слоях у поверхности полупроводника//Письма в ЖТФ. 2000. Т. 29. № 1. С. 38-41.; Ho-Myoung An; Eui Bok Lee; Hee-Dong Kim; Yu Jeong Seo; Tae Geun Kim; A New Class of Charge-Trap Flash Memory With Resistive Switching Mechanisms. Electron Devices, 2010, V. 57, Issue:10, pp. 2398 – 2404.и другие источники.

актуальных задач и получены важные научные результаты: разработаны модели накопления радиационно-индуцированного заряда в оксидном слое и на границе раздела оксид-полупроводник МДП структур в Институте космической и оборонной электроники Университета Вандербилт (США), Национальной лаборатории Сандиа (Альбукерка, США); предложены принципиально новые наноразмерные электронные системы на основе распределения зарядов на границе диэлектрик-полупроводник в Лаборатории исследований физических явлений на поверхности и границах раздела твердых тел Института радиотехники и электроники РАН; разработаны методы для регистрации распределения заряда в диэлектрическом слое около границы диэлектрик-полупроводник на основе измерения емкости в Стенфордском университете (США), Технической исследовательской лаборатории Ниппон Хосо Киокаи, Технической лаборатории полупроводниковых приборов Тошиба.

В настоящее время в мире проводятся теоретические и экспериментальные научно-исследовательские работы по изучению влияния термополевых воздействий на характеристики при облучении МДП структур для детального исследования природы оксидных и граничных дефектов, температурной нестабильности прибора при отрицательном (или положительном) смещении, а также возможности определения дефектов и их распределения в оксидном слое и на границе раздела МДП приборов для приложения в элементах полупроводниковой памяти.

Степень изученности проблемы. К настоящему времени все работы, посвященные изучению влияния внешних воздействий на свойства границы диэлектрик-полупроводник и характеристики приборов на основе этих структур, ограничивались в основном рассмотрением влияния гамма-квантов от источника Co^{60} , электронных, протонных и нейтронных пучков, ультрафиолетового облучения и температуры, но сравнительно мало работ в которых рассматривается влияние высокоэнергетического тормозного излучения. В этих направлениях учеными США J.R. Schwank, P.S. Winokur и F.B. McLean проводилось много исследований процессов накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела Si-SiO₂ и предложены модели описывающие механизмы этого накопления. J.R. Schwank предложил модель, согласно которой радиационно-индуцированные дырки разрывают связи Si-H, высвобождая атомы водорода, которые диффундируют к границе и разрывают там связи Si-H. При этом образуются оборванные связи (поверхностные состояния) и молекулярный водород. Этот механизм объясняет дозовую зависимость накопления заряда в оксидном слое и на границе, но не объясняет полевую зависимость этого накопления. Модель, предложенная P.S. Winokur и F.B. McLean, основанная на образовании ионизированного водорода, под действием генерированных излучением дырок, объясняет полевую зависимость образования поверхностных состояний, но не объясняет временную динамику и зависимость накопления от толщины подзатворного оксидного слоя. В настоящее время нет модели, которая бы объясняла все наблюдаемые в

экспериментах явления накопления заряда на границе оксид-полупроводник. Учеными России (В.Я. Урицкий, Е.А. Ладыгин, В.А. Гуртов и др.) исследовались распределения концентрации радиационно- индуцированных дефектов и зарядов в диэлектрическом слое и на границе, деградация подвижности носителей на поверхности полупроводника под действием радиации. Изменения этих величин в основном исследовались методами измерения токов через затвор, сток (исток) или подложку и входной вольтемкостной характеристики. Но эти методы показывают только интегральные свойства, и не дают возможности определения точного распределение встроенного заряда вдоль границы и их влияние на характеристики МДП приборов.

Учеными Узбекистана А.В. Каримовым, С. И. Власовым, И.Н. Каримовым, Х.С. Далиевым, А. Юсуповым и др. проводились исследования характеристик МДП структур и полевых транзисторов. В частности, А.В. Каримовым исследовались различные структурные эффекты в полевых транзисторах на основе р-п переходов, С.И. Власовым развиты усовершенствованные методы $C-V$ характеристик для исследования границы раздела диэлектрик-полупроводник в МДП структурах. И.Н. Каримовым исследовались различные внешние влияния на граничные состояния в МДП структурах, Х.С. Далиевым экспериментально показано, что обработка МДП структур в атмосфере Cl приводит к значительной пассивации состояний на границе $Si-SiO_2$. А. Юсуповым исследовались влияния локальных зарядов в диэлектрическом слое на параметры МДП транзисторов. Но в этих работах не достаточно рассматривалось влияние высокоэнергетического тормозного излучения на характеристики и составляющие порогового напряжения МДП транзисторов обусловленных оксидным и граничным ловушечным зарядом.

Несмотря на большое количество работ связанных с исследованием процессов накопления заряда в ловушках в оксидном слое и на граничных состояниях в МДП приборах до сих пор не разработана целостная модель накопления поверхностного заряда в этих приборах. Нет систематического исследования влияния неоднородного накопления оксидного и граничного заряда на характеристики МДП приборов. Исследования по развитию технологии формирования различных полупроводниковых наноструктур в основном направлены на выращивание полупроводниковых слоев с ограниченными в определенных пространственных направлениях размерами и очень мало работ по исследованию возможности создания полупроводниковых наноструктур в виде потенциальных рельефов, сформированных с определенным заданным распределением заряда.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках планов научных проектов по фундаментальным исследованиям Ургенческого государственного университета по темам: ОТ-Ф2-67 «Новый подход к методу исследования природы и латерального распределения

дефектов на границе диэлектрик-полупроводник» (2017-2020); «Моделирование физических процессов в полупроводниках и полупроводниковых приборах», утвержденной ученым советом Ургенческого государственного университета (протокол № 4 от 28.12.2016).

Целью исследования является выявление свойств границы диэлектрик-полупроводник и изменений характеристик МДП приборов микрометровых и нанометровых размеров при воздействии высокоэнергетического тормозного излучения, а также установления механизмов формирования наноструктур.

Задачи исследования:

формулирование требований к параметрам внешних воздействий, подбор режимов, интенсивности и энергии облучения высокоэнергетического тормозного гамма-излучения, влияние которых на МДП-приборы исследуется;

исследование воздействия высокоэнергетического тормозного гамма-излучения и термополевых обработок на плотность поверхностных состояний границы раздела Si-SiO₂, пороговое напряжение и токовые характеристики МОП транзистора микрометровых размеров и сравнение с влиянием гамма-квантов от источника Co⁶⁰;

исследование воздействия термических обработок на пороговое напряжение, его составляющие обусловленные зарядом, накопленным в оксидном слое и на границе раздела Si-SiO₂ МОП транзистора;

исследование одновременного влияния ионизирующего излучения и полевого воздействия на вольтамперные характеристики боковых переходов МДП транзисторов;

исследование влияния встроенного в оксиде заряда на боковые вольтемкостные характеристики МДП транзисторов;

теоретическое исследование свойств низкоразмерных электронных структур на поверхности полупроводника около границы с диэлектриком, сформированных зарядом, распределенным в диэлектрическом слое;

моделирование емкости бокового перехода МДП транзистора нанометровых размеров с зарядом, встроенным в оксидном слое.

Объектом исследования являются структура металл-диэлектрик-полупроводник, структура металл-нитрид-оксид-полупроводник, микрометровые и нанометровые МДП-транзистор, низкоразмерные электронные структуры в структурах металл-оксид-полупроводник.

Предметом исследования являются процессы влияние радиационного облучения, термической и термополевой обработки, неоднородного распределения заряда, встроенного в диэлектрическом слое на вольтамперные и вольтфарадные характеристики МДП приборов.

Методы исследований. В работе применены комплексные методы экспериментальной физики: метод высокочастотных вольт-фарадных, метод подпороговых передаточных вольтамперных и выходных вольтамперных характеристик структур с несколькими переходами, а также методы

теоретико-аналитических расчетов и компьютерного моделирования электронных процессов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые показано, что изменение составляющей порогового напряжения МДП транзистора, обусловленной оксидным зарядом при облучении высокоэнергетическим тормозным излучением, как и в случае облучения квантами от источника Со-60, увеличивается, монотонно переходя в насыщение при переносах энергии излучения больших 10^3 Дж/см²;

установлено, что при одновременном воздействии ионизирующего излучения и приложении ориентированного электрического поля в оксидный слой МДП транзистора, наблюдается неоднородное встраивание заряда вдоль границы раздела оксид кремния-кремний;

показано, что при облучении МДП транзистора гамма-квантами от источника Со-60 и одновременном приложении на затвор напряжения +10 В относительно стока, напряжение пробоя перехода сток-подложка изменяется от -30 В до -5 В, в то время как напряжение пробоя перехода исток-подложка почти не изменяется;

впервые экспериментально показано, что облучении квантами от источника Со-60, при приложении напряжения ± 10 В к истоку МДП транзистора относительно стока, вызывает изменение вольт-фарадной характеристики бокового перехода исток-подложка, которое зависит как от знака прикладываемого напряжения, так и дозы облучения, что обусловлено неравномерным встраиванием заряда в диэлектрическом слое;

показано, что с помощью Кельвин пробы на основе атомного силового микроскопа, подачей на зонд, направленного на поверхность SiO₂ структуры Si-SiO₂, напряжения +10 В относительно Si(n) подложки структуры, в течении 15 минут в бесконтактной моде, можно встроить («записать») заряд с линейными размерами порядка 1000 нм в оксидный слой;

на основе теоретических расчетов получены выражения распределения потенциала в полупроводнике цилиндрической структуры оксид-полупроводник с зарядом, распределенным в оксидном слое и зависимость этого потенциала от параметров распределенного заряда;

впервые моделировано изменение вольтемкостной характеристики бокового перехода металл-нитрид-оксид-полупроводник (МНОП) транзистора при встраивании локального заряда в нитриде и показано, что встроенный локальный заряд вызывает скачок емкости бокового перехода при напряжении, зависящем от положения локального заряда относительно истока.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

получена зависимость порогового напряжения кремниевого МДП транзистора и его составляющих, обусловленных оксидным и граничным зарядом от переноса энергии облучения высокоэнергетического тормозного гамма излучения с максимальной энергией квантов 30 МэВ и гамма-квантов от источника Со-60, что позволит на практике предварительно оценивать

степень возможной деградации порогового напряжения МДП транзистора при его использовании в условиях радиационной обстановки;

выявлена зависимость изменения формы вольт-фарадной характеристики бокового перехода исток-подложка МДП транзистора от положения локального дискретного заряда на границе раздела и в оксидном слое, которое может использоваться для детектирования локальных зарядов на границе или в оксидном слое, что позволит повысить экспрессность диагностики границы или приграничной области полупроводника с диэлектриком;

получена зависимость распределения потенциала на поверхности и в глубине полупроводника граничащем с диэлектрическим слоем структуры диэлектрик-полупроводник, от параметров и геометрии распределения заряда встроенного в диэлектрический слой, которая может быть использована при формировании управляемых квантово размерных систем путем распределения заряда в диэлектрическом слое около границы с полупроводником, что может упростить процесс получения управляемых полупроводниковых наноструктур.

Достоверность результатов исследования обосновывается применением в диссертационной работе современных методов и подходов емкостной спектроскопии полупроводниковых структур, стандартных приборов для измерения электрофизических параметров образцов, измерения вольтамперных характеристик и дозиметрии радиационного излучения. Моделирования проведены с использованием стандартной программы TCAD Sentaurus, в которых используемые физические модели калибровались с данными опубликованных экспериментальных результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость проведенных в рамках данной диссертации исследований заключается в формировании новых представлений об изменении порогового напряжения и его составляющих обусловленных оксидным и граничным ловушечным зарядом при воздействии высокоэнергетического тормозного гамма-излучения на МДП транзисторы.

Практическая значимость полученных результатов диссертации определяется тем, что установленная зависимость вольт-фарадной характеристики переходов исток-подложка или сток-подложка от неравномерности распределения заряда встроенного в диэлектрический слой или на границе раздела диэлектрик-полупроводник, может быть использована при контроле распределения дефектов на границе раздела диэлектрик-полупроводник в технологических процессах получения МДП приборов, а полученные зависимости распределения потенциала на поверхности или в объеме полупроводника от распределения заряда в диэлектрическом слое, граничащем с полупроводником, могут быть использованы при создании перестраиваемых полупроводниковых наноразмерных структур.

Внедрение результатов исследования.

Результаты экспериментального изучения влияния ионизирующих излучений, термических, термополевых обработок на входные и переходные характеристики, а также вольтамперные и вольт-фарадные характеристики

его боковых переходов и моделирования влияния заряда неравномерно распределенного в диэлектрическом слое МДП транзисторов на вольт-фарадные характеристики его боковых переходов были использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

Результаты по моделированию изменений вольт-фарадной характеристики бокового перехода металл-нитрид-оксид-полупроводник (МНОП) транзистора при встраивании локального заряда в нитриде были использованы в проекте «Разработка инструментов моделирования и расчетов продвинутых полупроводниковых приборов: приложение для изучения флуктуаций собственных параметров» выполненном в Центре сингулярных исследований по смарт технологиям (CITIUS) Университета Сантьяго де Компостелла (Испания), для разработки инструментов моделирования продвинутых полевых транзисторов (справка центра CITIUS Университета Сантьяго де Компостелла от 29.04.2019). Использование научных результатов способствовало разработке физических моделей и инструментов для моделирования наноразмерных полевых транзисторов, в частности для моделирования характеристик вертикальных полевых транзисторов при флуктуациях их собственных параметров;

результаты по исследованию влияния заряда встроенного в диэлектрический слой МДП транзистора, посредством воздействия ионизирующего излучения от источника Со-60 и воздействия электрического поля на область объемного заряда и тем самым на обратные вольтамперные, вольт-фарадные характеристики, токи утечки и напряжение пробоя р-п переходов исток-подложка, использованы в фундаментальном проекте Ф-2-28 «Поверхностные и объемные квантовые эффекты и их влияние на процессы фотогенерации и рекомбинации носителей заряда в р-п переходах», при изучении процессов фотогенерации носителей заряда в р-п переходах на основе кремния (справка № 89-03-4389 Министерства Высшего и среднего специального образования от 20.12.2018). Использование научных результатов позволило объяснить влияние поверхностных эффектов на процессы фотогенерации носителей в р-п переходах;

экспериментальные результаты полученные в диссертации по исследованию заряженной поверхности оксидного слоя и полярных поверхностей полупроводников методом Кельвин пробы были использованы при исследованиях локального электрического потенциала возникающего на поверхности полупроводниковых образцов нанометровых масштабов, изучения различных стадий роста нанопроволок из различных материалов на поверхности различных полупроводников в зарубежных журналах (Journal of Physics and Chemistry of Solids, 89, 7-14, 2016, IF: 2.207; Journal of Crystal Growth, 510, 56-64, 2019, IF 1.742; Materials Science in Semiconductor Processing, 55, 32-45, 2016, IF: 2.593 и т.д.). Использование научных результатов позволило разработать методы получения различных полупроводниковых наноструктур.

Апробация результатов исследований. Результаты данного исследования обсуждались на семинарах Ургенческого государственного университета, Физико-технического института Академии наук Республики

Узбекистан, университета Лакуила (Италия) и докладывались на 6 международных и 11 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 32 научных работ, из них 11 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций и которые полностью отражают содержание диссертации, из них 9 статей в зарубежных и 2 статьи в республиканских научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы, 4 приложений, 172 страниц основного текста, включая 53 рисунка и две таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе диссертации **«МДП приборы, их свойства и применение»** на основе анализа литературных данных рассматриваются особенности влияния ионизирующего излучения и термических обработок на МДП приборы. Рассмотрены особенности и возможности встраивания заряда в диэлектрическом слое транзистора, исследований процессов накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела Si-SiO₂ и предложенные модели, описывающие механизмы этого накопления. Анализируются аспекты применения встроенного заряда, а также физические основы формирования наноструктур на основе МДП приборов. Исходя из обзора, сформулированы требования к объектам исследования, цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации **«Влияние ионизирующего излучения, термополевых и термических обработок на свойства границы раздела диэлектрик-полупроводник и токовые характеристики МДП транзистора»** приводятся основные понятия дозиметрии высокоэнергетического тормозного излучения и гамма-квантов от источника Co-60, которые использовались для облучения образцов, получены выражения для перехода от поглощенной дозы к переносу энергии излучения, рассматриваются сущность методов и описание установок для измерения вольтамперных характеристик МДП приборов, приводятся результаты исследований энергетического спектра поверхностных состояний и интегральной плотности поверхностных состояний на межфазной границе оксид кремния – кремний, тока утечки стока и порогового напряжения после

воздействия высокоэнергетического тормозного излучения, гамма-квантов от источника Co-60 и термической и термополевой обработки.

Облучение образцов высокоэнергетическим тормозным излучением производилось внутрикамерным способом, что обеспечивало высокую интенсивность излучения. В месте расположения образца плотность потока энергии излучения составляла $I = 0.195 \text{ Вт/см}^2$. Результаты измерений нормировались на перенос энергии излучения F в месте расположения образца. Перенос энергии излучения F определялся по плотности потока энергии излучения I . Облучение гамма-квантами от источника Co-60 производилось на гамма-установке Института ядерной физики АН Республики Узбекистан. Мониторинг излучения производился по экспозиционной дозе с помощью дозиметра ДОГ-25/200. В месте расположения образца плотность потока энергии гамма-квантов Co⁶⁰ составляла 0.12 Вт/см^2 .

В диссертационной работе также проводилось измерение выходной и переходной вольтамперных характеристик. Выходная вольтамперная характеристика представляла собой зависимость тока стока от напряжения сток-исток. При снятии переходной вольтамперной характеристики измерялся ток стока в зависимости от напряжения затвор-исток при неизменном напряжении на стоке относительно истока. По переходной характеристике определялось пороговое напряжение транзистора. Переходная характеристика измерялась как в надпороговой, так и в подпороговой области напряжений на затворе.

Значение порогового напряжения V_T представляющее собой напряжение затвор-исток, при котором ток стока I_{DS} достигает значения 30 мкА, отсчитывают по измерителю напряжения, в качестве которого служил вольтметр В7-34А. При этом напряжение сток-исток $V_{DS} = 90 \text{ мВ}$, которое контролировалось по вольтметру В7-34А и задавалось источником питания постоянного тока Б5-50. Напряжение на затвор подавалось источником постоянного тока Б5-21. При измерениях напряжение подложка-исток выбиралось нулевым.

Энергетический спектр поверхностных состояний (ПС) определялся в диапазоне поверхностного потенциала от 0.3 В до 0.6 В. Результаты показали, что, при облучении высокоэнергетическим тормозным гамма излучением, плотность ПС на межфазовой границе (МФГ) Si-SiO₂ в исследуемом диапазоне поверхностного потенциала имеет характер монотонного роста с увеличением времени облучения. При больших временах облучения (650 мин), соответствующих переносу энергии излучения $F = 7.6 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^2$, изменение плотности ПС имеет порядок $10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ во всем рассматриваемом диапазоне поверхностного потенциала. Полученные результаты сравнивались с результатами влияния гамма квантов от источника Co-60 при переносах энергии $0.87 \cdot 10^2 \text{ Дж/см}^2$ и $0.87 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^2$, полученных другими авторами. При этом обнаружено, что при облучении гамма квантами Co-60 с переносом энергии излучения примерно на порядок меньших по сравнению с переносом энергии высокоэнергетического тормозного излучения плотность поверхностных состояний изменяется на

порядок больше во всем диапазоне изменения поверхностного потенциала. Причина такого различия связана с различием в спектре этих излучений.

Для получения дополнительных представлений о поверхностных состояниях проводилась термополевая обработка (ТПО) необлученных МДП транзисторов в диапазоне температур 100° - 250° С с выдержкой при каждой температуре 120 минут и напряженности электрического поля $5 \cdot 10^5$ В/см в оксиде, направленного от затвора к подложке. ТПО при 100° , 150° , 200° С не приводит к заметным изменениям спектра, но при 250° С вызывает существенное увеличение дифференциальной плотности ПС при поверхностных потенциалах около 0.6 В, что соответствует уровню энергии примерно 0.25 эВ над потолком валентной зоны. Это, указывает на то, что при термополевой обработке дырки делокализованные в оксидном слое под действием температуры, дрейфуют к границе с полупроводником под действием поля, где участвуют в реакциях приводящих к формированию дефектов, связанных с разрывом напряженных связей в области МФГ Si-SiO₂.

Проводилось также сравнительное исследование влияния высокоэнергетического тормозного излучения и гамма-квантов Со-60 на интегральную плотность поверхностных состояний межфазной границы Si-SiO₂ и тока утечки стока. В таблицах 1 и 2 приведены относительные значения тока утечки стока при четырех значениях переноса энергии излучения как при облучении высокоэнергетическим тормозным гамма излучением (смотрите таблицу 1), так и при облучении гамма квантами от источника Со-60 (смотрите таблицу 2). Ток утечки I_d измерялся при потенциале на стоке относительно подложки 5 В, при заземленных истоке и затворе. В обоих случаях облучения, с увеличением переноса энергии излучения интегральная плотность ПС увеличивается, хотя скорость изменения разная. Но поведение токов утечки в рассматриваемых случаях облучения совершенно отличаются. Как видно из таблицы 1 изменение величины I_d при облучении тормозным излучением является немонотонным: при малых переносах энергии уменьшается, и при больших переносах существенно увеличивается. Такое немонотонное поведение тока утечки можно объяснить конкурирующим действием двух механизмов: уменьшения подвижности и изменения поверхностной концентрации носителей.

Таблица 1

Взаимосвязь изменения тока утечки стока с переносом энергии тормозного излучения, интегральной плотностью ПС и подвижностью носителей

№	F, Дж/см ² , перенос энергии высокоэнергетического тормозного излучения	ΔN_{ss} , см ⁻² , интегральная плотность поверхностных состояний	μ/μ_0 , относительное из- менение подвиж- ности, μ_0 – под- вижность до облучения	I_D/I_{D0} , мкА, Относительное изменение тока утечки стока, I_{D0} – ток утечки стока до облучения
1	10^1	$1.2 \cdot 10^{10}$	0.95	1.70
2	10^2	$1.5 \cdot 10^{10}$	0.90	0.85
3	10^3	$2.0 \cdot 10^{10}$	0.72	2.00
4	$5 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^{11}$	0.22	3.70

Таблица 2

Взаимосвязь изменения тока утечки стока с переносом энергии излучения квантов Co-60, интегральной плотностью ПС и подвижностью носителей

№	F, Дж/см ² , перенос энергии излучения квантов от источника Co-60	ΔN_{ss} , см ⁻² , интегральная плотность поверхностных состояний	μ/μ_0 , относительное изменение подвижности, μ_0 - подвижность до облучения	I_D/I_{D0} , мкА, Относительное изменение тока утечки стока, I_{D0} –ток утечки стока до облучения
1	10^1	$7.0 \cdot 10^{10}$	0.60	3.6
2	10^2	$9.0 \cdot 10^{10}$	0.40	3.7
3	10^3	$1.9 \cdot 10^{11}$	0.10	3.8
4	$5 \cdot 10^3$	$8.3 \cdot 10^{11}$	-	3.70

В отличие от облучения высокоэнергетическим тормозным излучением, при облучении гамма-квантами от источника Co-60 уже при сравнительно малых величинах переноса энергии излучения наблюдается резкое увеличение I_d (см. таблицу 2) и его быстрое насыщение. Такое изменение тока утечки не коррелирует с изменением $\mu_{эфф}$. Эффективная подвижность дырок в инверсионном слое при облучении гамма-квантами от источника Co-60, как и в случае облучения высокоэнергетическим тормозным излучением, уменьшается, но скорость этого изменения различна. Несмотря на это ток утечки уже при малых переносах энергии существенно увеличивается. Это связано с доминированием механизма, связанного с изменением поверхностной концентрации носителей вызванного зарядом, встроенным в оксидном слое уже и при малых переносах энергии излучения гамма квантов от источника Co-60. Очевидно, это связано с отличием спектров тормозного излучения и гамма-квантов от Co-60. При облучении МДП-транзистора гамма-квантами Co-60, в спектре которого имеются всего две линии с энергиями 1.17 и 1.23 МэВ, окисным слоем и на межфазной границе Si-SiO₂ поглощается большая доза, чем при облучении тормозным излучением, в спектре которого имеются кванты с большими энергиями (до 30 МэВ).

В данной главе также рассмотрены влияние высокоэнергетического тормозного излучения и последующей термополевой обработки на пороговое напряжение и на его составляющие обусловленные зарядами, встроенными на границе оксид кремния – кремний и в оксидном слое МДП транзистора. Для изучения механизма влияния радиации, изменение порогового напряжения было разделено на две составляющие: изменение, связанное с накоплением заряда на границе раздела ΔV_{Nit} и зарядом, накопленным в оксидном слое ΔV_{Not} . Компонента ΔV_{Nit} вычислялась из результатов измерений подпороговой передаточной вольтамперной характеристики по формуле:

$$\Delta V_{Nit} = \frac{\Delta S \varphi_B q}{kT \ln(10)}$$

Здесь C_{ox} – емкость оксидного слоя, ΔS – изменение крутизны передаточной подпороговой вольтамперной характеристики, φ_B – потенциал глубины подложки, T – температура, k – постоянная Больцмана. ΔV_{Not} компонента вычислялась простым вычитанием ΔV_{Nit} составляющей из изменений порогового напряжения ΔV_T . На рисунке 1 представлены зависимости изменений порогового напряжения ΔV_T и его составляющих ΔV_{Nit} и ΔV_{Not} от переноса энергии излучения как для источника Co-60, так и для высокоэнергетического тормозного излучения.

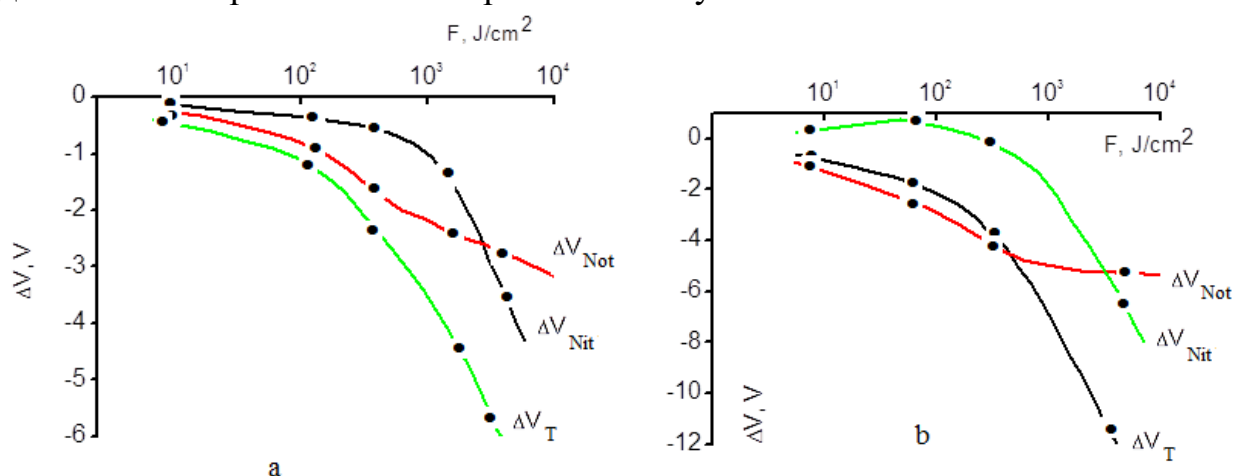


Рис. 1. Зависимости изменений порогового напряжения ΔV_T и его составляющих ΔV_{Nit} и ΔV_{Not} от переноса энергии излучения как для высокоэнергетического тормозного излучения (рисунок а) так и для источника Co^{60} (рисунок б)

Как видно из рисунка характер изменения порогового напряжения от переноса энергии излучения является монотонным и одинаковым, но при этом скорость изменения порогового напряжения для указанных двух случаев во всем диапазоне переносов энергии излучения отличается. Характер изменения составляющей ΔV_{Not} для обоих случаев также является монотонным, но изменения составляющей ΔV_{Nit} несколько отличаются. Различия в скоростях изменений порогового напряжения от переноса энергии, очевидно связано с зависимостью радиационных эффектов от интенсивности излучения.

Для исследования восстановления параметров МОП-транзистора, облученного высокоэнергетическим тормозным излучением, проводили низкотемпературный изохронный отжиг в диапазоне температур $50^0 - 400^0$ С. После каждого 30-минутного процесса термообработки измеряли подпороговую передаточную характеристику для определения порогового напряжения и компонент смещения порогового напряжения, обусловленного зарядами на границе ΔV_{Nit} и зарядом в окисном слое ΔV_{Not} . На рисунке 2 представлены результаты этих измерений. Как видно из этого рисунка, при температурах до 210^0 С пороговое напряжение изменяется слабо, а величина $|\Delta V_{Nit}|$ начинает возрастать при 120^0 С и достигает

максимального значения при 210 °С. Это свидетельствует о повышении плотности поверхностных состояний на границе Si – SiO₂. Вероятно, возрастание плотности поверхностных состояний связано с дрейфом положительных формирований из оксидного слоя к границе раздела Si – SiO₂, где величина положительного заряда уменьшается. Об этом свидетельствует уменьшение значения $|\Delta V_{\text{Not}}|$ с увеличением температуры. При температуре 210 °С радиационно-индуцированный заряд в оксидном слое полностью отжигается.

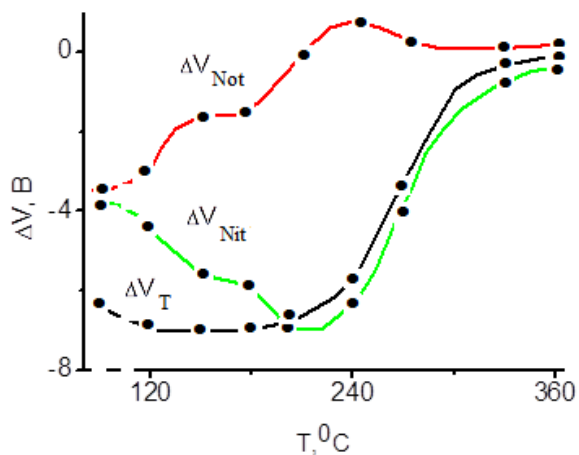


Рис.2 Зависимости изменения порогового напряжения ΔV_T и его компонент ΔV_{Nit} и ΔV_{Not} МОП-транзистора, облученного высокоэнергетическим тормозным излучением, от температуры отжига T.

При температурах выше 210 °С поведение порогового напряжения практически полностью определяется изменением $|\Delta V_{\text{Nit}}|$, т. е. изменением заряда на границе Si-SiO₂. Поверхностный заряд почти полностью отжигается при температуре 360 °С. Уменьшение плотности граничных состояний может быть вызвано как насыщением разорванных связей ионами Cl, так и возникновением подвижных атомов водорода, которые способствуют аннигиляции граничных состояний.

В третьей главе диссертации «**Экспериментальное исследование влияние радиационного и полевого воздействия на свойства МДП приборов**» описывается сущность метода и описание установок для измерения высокочастотных (ВЧ) вольтфарадных характеристик (ВФХ) МДП приборов, приводятся результаты экспериментального исследования одновременного влияния ориентированного электрического поля и ионизирующего излучения на обратный ток, напряжение пробоя и вольтемкостные характеристики боковых переходов МДП транзисторов, а также рассматривается возможность применения Кельвин пробы на основе атомно силового микроскопа для встраивания и изучения потенциала заряда локализованного в оксидном слое.

Метод ВЧ ВФХ основывается на измерении экспериментальной высокочастотной емкости реальной МДП-структуры в зависимости от приложенного напряжения и в сравнении ее с теоретической расчетной емкостью идеальной МДП-структуры с такими же величинами толщины окисла и концентрации легирующей примеси в подложке. Расчет теоретических ВФХ производится на основе теории МДП – структуры. Измерения ВЧ C-V-характеристик осуществлялись с помощью ВЧ мостово-

го измерителя емкости (см.рис.3) при подаче напряжения смещения от управляемого вручную источника постоянного напряжения. Установка состоит из генератора пилообразного напряжения (Г), источника смещения (ИС), селективного усилителя (СУ), синхронного детектора (Д), схемы установки нуля (СУН), регистрирующего устройства (РУ). Токосъемное сопротивление в RC-делителе выбирается много меньше полного сопротивления исследуемой МДП-структуры. При этом, если пренебречь активной проводимостью МДП-структуры, напряжение на входе усилителя будет: $V_{вх} = V_{тс} R \omega C$, где $V_{тс}$ -напряжение тестового сигнала, ω - частота тестового сигнала. Сигнал на выходе будет пропорционален измеряемой емкости. Частота тестового сигнала составляла 100 кГц, амплитуда тестового сигнала - 30 мВ. Переменное напряжение синусоидальной формы подаётся на измеряемую емкость (структуру) через делитель, состоящий из емкости и сопротивления. Напряжение, снимаемое с сопротивления нагрузки, подаётся на селективный усилитель. Сигнал из усилителя идет на селективный детектор и далее через схему установки нуля идет на выход и регистрирующее устройство. Для изучения зависимости емкости от напряжения на МДП структуру подаётся регулируемое напряжение от источника смещения ИС.

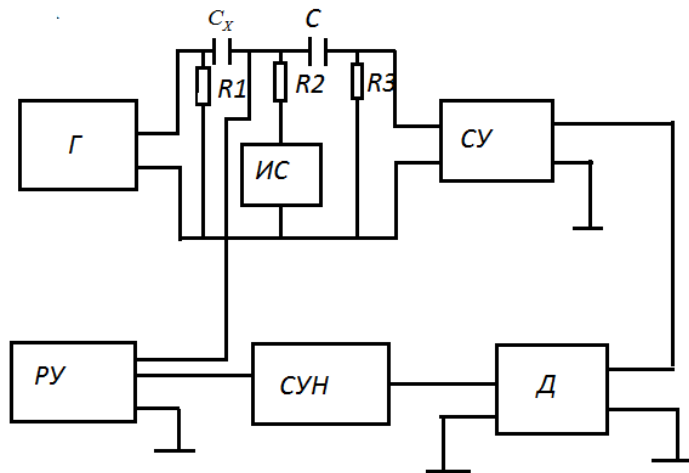


Рис.3. Блок-схема установки для измерения высокочастотных C-V-характеристик МДП-структур

Приведены также результаты исследования влияния гамма-квантов Со-60 и одновременно ориентированного электрического поля на обратный ток и напряжение пробоя переходов исток-подложка и сток-подложка МОП транзистора. Для направленного воздействия поля во время облучения на затвор МОП-транзистора подавали напряжение $U_{G-D} = +10$ В относительно стока, а исток и подложка были заземлены. Максимальная составляющая напряженности поля около поверхности кремния имела порядок 10^7 В/м.

Результаты измерений показывают, что обратная вольтамперная характеристика (ВАХ) В-D-перехода имеет примерно такой же вид, как и до облучения, но с меньшим напряжением пробоя (см. рис.4, кривые 1 и 2). Обратный ток В-S-перехода после облучения несколько увеличивается, но напряжение пробоя изменяется слабо (рис.4, кривые 3 и 4). Такое поведение обратного тока В-S- и В-D-переходов, видимо, вызвано изменением

количества заряда на границе кремния с оксидом кремния, на поверхности этих переходов под действием ионизирующего гамма-излучения. В частности, происходит накопление положительного заряда у границы Si-SiO₂. Свидетельством накопления положительного заряда в оксидном слое и на границе Si-SiO₂ является изменение величины порогового напряжения МДП-транзистора. После облучения дозой 5·10⁶ Р пороговое напряжение во всех образцах сместилось на 6-8 В в сторону больших отрицательных значений.

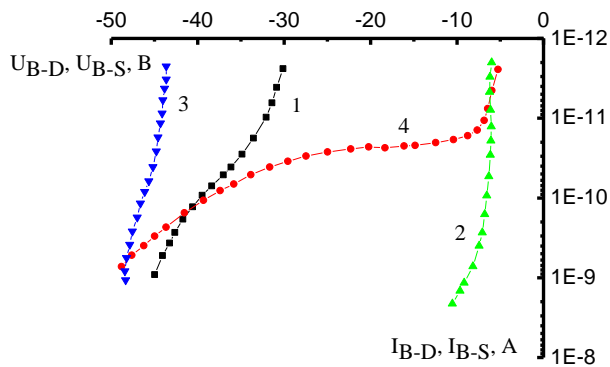


Рис.4. Обратные ВАХ переходов В-Д (1,2) и В-С (3,4) до (1,3) и после (2,4) облучения МОП транзистора.

Этот положительный заряд, накопленный в оксидном слое и на границе притягивает электроны из объема подложки (n-области) к поверхности. Из-за перекрытия определенной части области стока оксидным слоем, индуцированный положительный заряд притягивает электроны и из области стока к поверхности около границы подложка-сток. При достаточно большой величине положительного заряда на поверхности концентрация основных носителей у поверхности p^+ - стока может увеличиться настолько, что тип проводимости p^+ -полупроводника у поверхности инвертируется – становится электронным – и образуется канал поверхностной проводимости у $n - p^+$ перехода. Канал поверхностной проводимости, по-видимому, образуется как у В-S- так и у В-D-перехода. Но сечения и геометрия этих каналов, вероятно, различны.

В В-D-переходе уменьшение напряжения пробоя может быть связано с уменьшением ширины перехода у поверхности, которое вызывается увеличением концентрации электронов у поверхности, притягиваемых положительным зарядом, встроенным около поверхности В-D перехода. Но так как емкость перехода в приближении плоского конденсатора определяется соотношением площади к ширине перехода, слабое изменение емкости свидетельствует также о соответствующем уменьшении и площади перехода. Обратная ветвь ВАХ в этом случае имеет такой же вид, как и для лавинного или туннельного пробоя, но с меньшим напряжением пробоя (см. рис.4). Возможно также, что из-за этих изменений начинает играть заметную роль в некоторых частях этого перехода и другой механизм пробоя (например, туннельный).

Рассматривалось влияние неоднородного накопления заряда в оксидном слое на С-V характеристики боковых переходов МДП транзистора. Для

достижения неоднородного накопления радиационно-индуцированного заряда в оксидном слое во время облучения МДП-транзистора гамма-квантами от источника Co-60 с мощностью экспозиционной дозы 300 Р/с в первой группе образцов на исток подавалось смещение ± 10 В относительно стока. Затвор и подложка были закорочены на положительный полюс источника питания. Для сравнения вторая группа образцов облучалась без смещения на электродах. Исследуемые образцы представляют собой р-канальный МДП-транзистор с кремниевой подложкой с $\rho=7.5$ Ом·см и длиной канала 11 мкм.

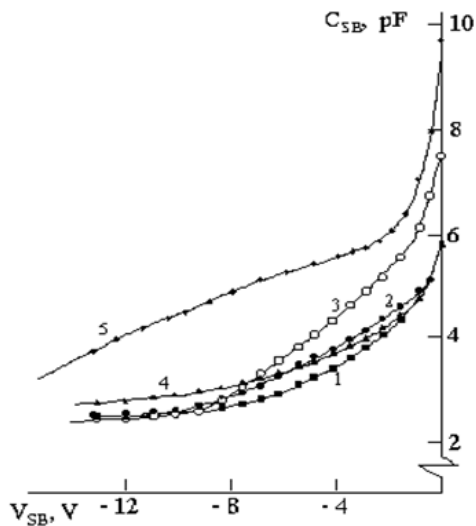


Рис. 5. С-V зависимость S-B перехода до облучения (кривая 1) и после облучения с экспозициями: 10^7 Р без смещения на электродах (кривая 2), $5 \cdot 10^6$ Р со смещением +10 В на истоке (кривая 3), $5 \cdot 10^6$ Р со смещением -10 В на истоке (кривая 4), 10^7 Р со смещением +10 В на истоке (кривая 5).

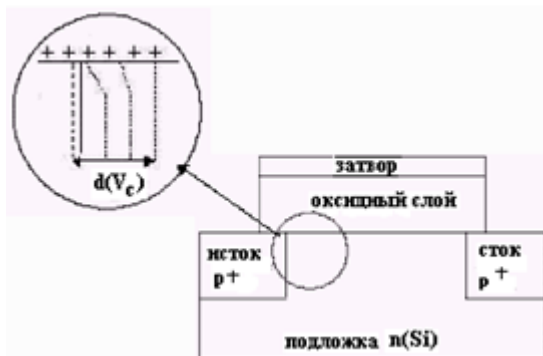


Рис. 6. Схематический рисунок р-канального МДП транзистора. В вставке показана часть оксидного слоя с зарядом над S-B переходом, штрихованные линии соответствуют границе области объемного заряда указанного перехода при различных смещениях на этом переходе. $d(V_c)$ – ширина перехода соответствующая напряжению V_c .

Типичные С-V зависимости S-B перехода первой и второй группы образцов и схематический рисунок р-канального МДП транзистора представлены на рисунках 5 и 6. Результаты показывают, что заметные изменения этих зависимостей наблюдаются в основном в образцах первой группы. Так как, S-B переход является p^+ -n переходом его С-V зависимость до облучения (см. рис. 5, кривая 1) соответствует модели емкости p^+ - n перехода. Однако в отличие от обычного p^+ - n перехода поверхность S-B перехода МДП-транзистора покрыта оксидным слоем, поэтому радиационно-индуцированный заряд в оксидном слое и на поверхности S-B перехода притягивает электроны из объема n-подложки к поверхности. Концентрация электронов, притягиваемых к поверхности полупроводника будет зависеть от потенциала поля встроенного заряда. Увеличение концентрации основных носителей у поверхности приводит к соответствующему уменьшению

ширины ОПЗ и, следовательно, к искривлению границы S-V перехода (см. рис.6, вставка). Уменьшение же ширины ОПЗ вызывает увеличение емкости перехода (рис.5, кривая 3). С увеличением дозы облучения, емкость в C-V зависимости, неравномерно по напряжению, сдвигается в область больших значений (см. рис.5, кривая 5), при этом, при небольших экспозиционных дозах (до $5 \cdot 10^6$ Р), емкости соответствующие напряжениям на переходе большим некоторого критического напряжения V_C , не изменяются. Очевидно это связано с выпрямлением границы S-V перехода при напряжениях больших V_C (рис. 6 вставка). При напряжениях больших V_C емкость определяется шириной ОПЗ соответствующей значению до облучения. Ширина ОПЗ S-V перехода d_C соответствующая напряжению V_C , будет представлять собой оценку линейного вдоль канала размера области поверхности полупроводника где происходит обогащение основными носителями, индуцированными встроенным зарядом.

В данной главе также представлены результаты исследования возможности применения метода Кельвин пробы на основе атомно-силового микроскопа (АСМ) для исследования потенциала заряда, локализованного в диэлектрическом слое. Для исследования возможности встраивания заряда в оксидный слой и его детектирования с помощью АСМ, был изготовлен специальный образец с переходом диэлектрик-полупроводник, структура которого изображена на рисунке 7. Для встраивания заряда в оксидном слое был использован атомно-силовой микроскоп. Для записи заряда на поверхности SiO_2 слоя на иглу подводимую к этой поверхности подавалось напряжение +10 В относительно $\text{Si}(n)$ подложки структуры в течении 15 минут в бесконтактной моде АСМ, при выбранной позиции иглы. Особенность полученного изображения Кельвин пробы состоит в том, что вокруг яркой центральной области имеется кольцеобразная темная область.

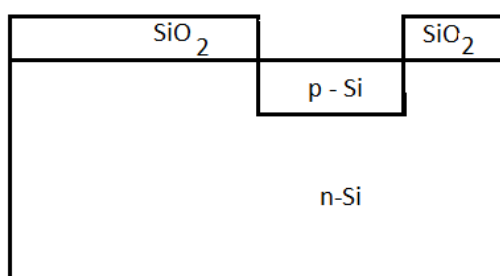


Рис.7. Структура образца для исследования встраивания заряда в оксидный слой с помощью АСМ .

Вероятно, в процессе «чтения» вдали от локализованного заряда на игле индуцируется положительный заряд так как на подложку приложено отрицательное смещение, а при прохождении непосредственно над локальным положительным зарядом индуцированный на игле заряд меняется и соответственно в контуре градиента силы минимум плавно переходит в максимум и обратно (см. рис. 8). В соответствии с изменением контура градиента силы изображение будет представлять собой темную область переходящую в центре в яркое пятно, что и наблюдается в нашем случае.

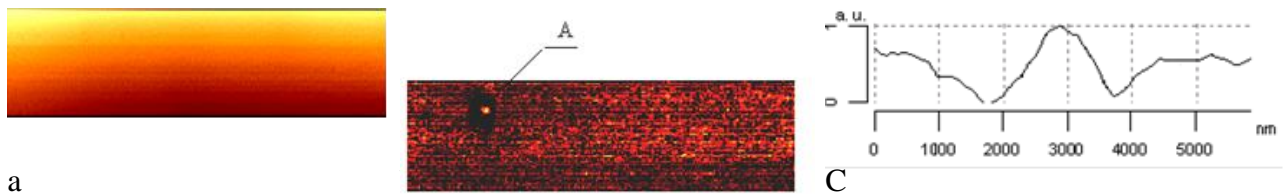


Рис. 8. Топография (а), изображение поверхностного потенциала (б) заряженной области и соответствующее распределение потенциала поперек этой области (с). Заряженная область указана буквой А.

В четвертой главе «Исследование влияния встроенного в оксиде заряда на боковые вольтемкостные характеристики МОП транзисторов» приведены результаты моделирования вольт-фарадных характеристик боковых переходов МДП транзисторов с помощью разработанного метода и соответствующей программы. С помощью этой программы рассматривается влияние заряда встроенного в оксидном слое на вольт-фарадные характеристики боковых переходов МДП транзистора.

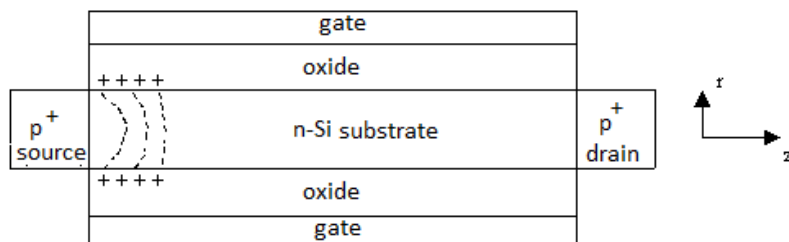


Рис. 9. Цилиндрическая коаксиальная МДП структура с встроенным в оксидном слое зарядом.

Так как боковой переход исток-подложка (сток-подложка) МДП транзисторов является обычно резким $p^+ - n$ (или $n^+ - p$) –переходом то для вычисления емкости, используя приближение емкости плоского конденсатора, нужно определить распределение концентрации носителей для оценки ширины области пространственного заряда в переходе. Для упрощения расчетов, без потери общности результатов, МДП транзистор выбирался цилиндрической формы (см. рис. 9). При наличии встроенного положительного заряда в слое оксида рассматриваемой структуры над областью пространственного заряда (ОПЗ) перехода исток-подложка, распределение концентрации неосновных носителей в полупроводниковой подложке в направлениях перпендикулярном (r) и параллельном (z) к оси цилиндра оказывается связанным не только с распределением потенциала $\varphi(z)$ на переходе исток-подложка, но и с потенциалом поля встроенного заряда $\psi(z,r)$:

$$p_n(z, r) = p_{n0} \exp(e(\varphi(z) - \psi(z, r))/kT)$$

здесь p_{n0} – равновесная концентрация неосновных носителей в объеме подложки. Для упрощения расчетов было принято, что распределение потенциала на переходе зависит только от z . В этом случае координаты точек с равновесной концентрацией $p_n(z,r)=p_{n0}$ будут определяться из условия $\varphi(z)=\psi(z,r)$. Построив зависимости $\varphi(z)$ для различных напряжений на переходе и $\psi(z,r)$ при конкретных r , введя начало отсчета по z от металлургической границы перехода, по точкам пересечения этих кривых

можно определить координаты z точек где концентрация неосновных носителей становится равновесной. Эти координаты дают возможность определить ширину перехода d для данного напряжения на определенном расстоянии r от границы Si-SiO₂. По известной величине d можно оценить емкость перехода в приближении плоского конденсатора.

На рисунке 10 (кривые 1-13) показано распределение $\phi(z)$ при различных напряжениях V на переходе и $\psi(z,r)$ (кривая 14) при определенном значении r . Распределение потенциала $\psi(z,r)$, показанное на рисунке 10 кривой 14 и рассчитанное численным решением уравнения Пуассона соответствует распределению потенциала заряда плотностью $\rho = 500 \text{ Кл/м}^3$ встроенного в оксидном слое над центральной областью промежутка исток-сток и локализованного в интервале $\Delta z=300 \text{ нм}$. На рисунке точки пересечения кривых $\phi(z)$ с осью Z дают значения координаты точек где начинается равновесная концентрация или граница области объемного заряда, определяющая ширину перехода до встраивания заряда в оксидный слой.

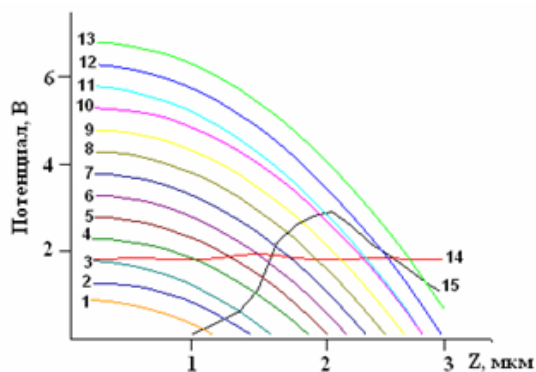


Рис. 10. Распределение потенциала рассматриваемого перехода исток-подложка при напряжениях на переходе от 0 до 6 В с шагом 0.5В (кривые 1-13), распределение потенциала заряда встроенного в оксидном слое, создаваемое на расстоянии 300 нм от поверхности в глубину полупроводниковой подложки (кривая 14) и распределение потенциала рассчитанного для получения C-V зависимости подобной экспериментальной зависимости бокового перехода МОП транзистора с встроенным в оксиде зарядом (кривая 15).

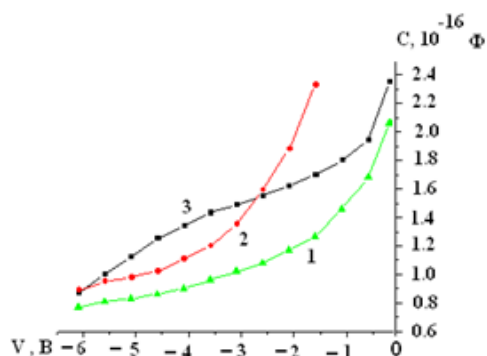


Рис. 11. Рассчитанные C-V зависимости перехода исток-подложка МОП транзистора: 1- без встроенного в оксидном слое заряда; 2, 3- с зарядом встроенным в оксидном слое, имеющим распределение потенциала около поверхности полупроводника, показанное на рисунке 15 кривой 14 и 15, соответственно.

После встраивания заряда в оксидный слой размеры области объемного заряда (ширина перехода) изменяются. Эти размеры определяются координатой точек начала равновесной концентрации, которые после встраивания заряда уже определяются координатой z точки пересечения кривых $\phi(z)$ не с осью z , а с кривой $\psi(z,r)$. Из данных полученных из рисунка 10 можно построить C-V зависимость до встраивания и после

встраивания заряда в оксидном слое МОПТ (см. рис. 11). На графике видно, что при равномерном встраивании заряда в оксидном слое емкость возрастает почти во всем диапазоне рассматриваемых напряжений. Неоднородно встроенный заряд приводит к локальным изменениям в вольт-фарадной характеристике. Такой характер изменения $C-V$ зависимости наблюдается и в экспериментальных результатах и имеет место качественное согласие расчетных и экспериментальных результатов.

В пятой главе «Теоретические исследования наноструктур около границы диэлектрик-полупроводник и моделирование боковой емкости МДП транзистора» теоретически изучаются управляемые квантовые ямы около поверхности и в объеме полупроводника на границе с диэлектриком, а также с помощью коммерческой программы TCAD Sentaurus моделируется вольт-фарадная характеристика бокового перехода исток-подложка МДП транзистора с локальным зарядом в диэлектрическом слое. В конце главы даются краткие выводы.

В данной главе с помощью аналитических и численных методов рассматривается так же формирование наномасштабной потенциальной ямы на границе оксид-кремний зарядом, распределенным в оксидном слое. Для случая встраивания двух заряженных колец в диэлектрическом слое результаты вычислений распределения потенциала по оси рассматриваемой цилиндрической структуры при различных расстояниях между заряженными кольцами и различных плотностях заряда показаны на рисунках 12 и 13. Как видно из рисунков, при рассматриваемом распределении заряда в оксидном слое, на оси структуры формируется одномерная потенциальная яма. С уменьшением расстояния между заряженными кольцами потенциальная яма сужается, и глубина увеличивается. Глубина потенциальной ямы существенно зависит от плотности заряда (см. рис.13), а ширина в основном определяется расстоянием между кольцами. (см. рис.12).

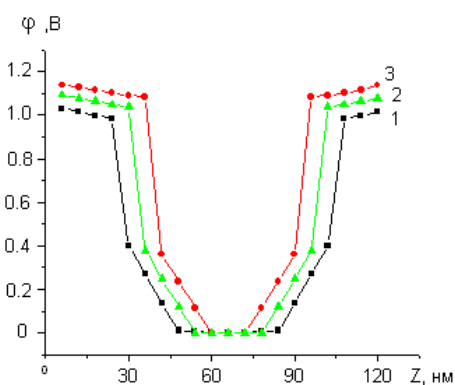


Рис.12. Распределение потенциала по оси цилиндра с двумя заряженными кольцами с плотностью заряда $1.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и толщинами по 24 нм, расстояние между которыми 36 нм (1), 24 нм (2), 12 нм (3). Радиус цилиндра 30 нм.

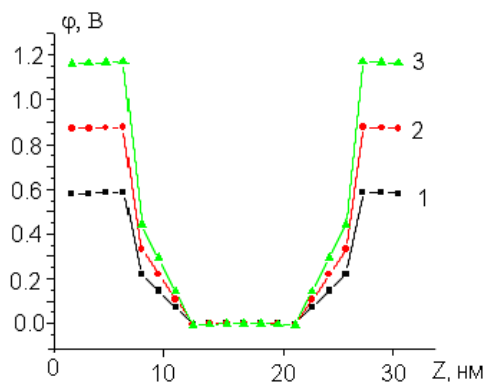


Рис.13 Распределение потенциала по оси цилиндра с двумя заряженными кольцами с плотностью заряда $3.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (1), $5.7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (2), $7.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (3), толщинами по 6 нм, расстояние между которыми 9 нм.

С помощью программы TCAD Sentaurus проводилось так же 2D моделирование вольт-фарадной характеристики перехода исток-подложка МНОП транзистора с локальным зарядом, встроенным в нитридный слой на различных расстояниях L от истока вдоль канала. Длина поликремниевого затвора составляет 800 нм, толщина слоя SiO_2 и нитридного слоя равны 3 нм и 50 нм соответственно. Концентрация легирования р-подложки составляет 10^{16} см^{-3} , истоковая и стоковая n-области легированы гауссовым профилем с максимальной концентрацией 10^{20} см^{-3} спадающей до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ около перехода исток-база. Локальный заряд моделировался однородно заряженной областью с ограниченными линейными размерами вдоль канала. Плотность заряда этой области выбиралась равной $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и длина области вдоль канала равна 80 нм.

На рис. 14 показана моделируемая структура транзистора, во вставке которой показан встроенный локальный заряд. Применялась диффузионно-дрейфовая модель, в которой учитывалась рекомбинация Шокли-Рида-Холла, модель насыщения скорости при высоких полях и влияние нормальной составляющей поля. Для определения вольт-фарадной характеристики использовался метод слабого переменного сигнала с частотой 1 МГц. Используемая при моделировании модель калибровалась на основе экспериментальных результатов измерения C-V характеристики перехода исток-подложка. Калиброванная модель использовалась для моделирования вольт-фарадной характеристики перехода исток-подложка рассматриваемого транзистора. Результаты моделирования показывают (см. рис. 15), что встраивание локального заряда приводит к скачку емкости на вольт-фарадной характеристике начиная с определенного напряжения смещения V_{jump} . Из рисунка видно, что значение V_{jump} зависит от положения локального заряда относительно истока.

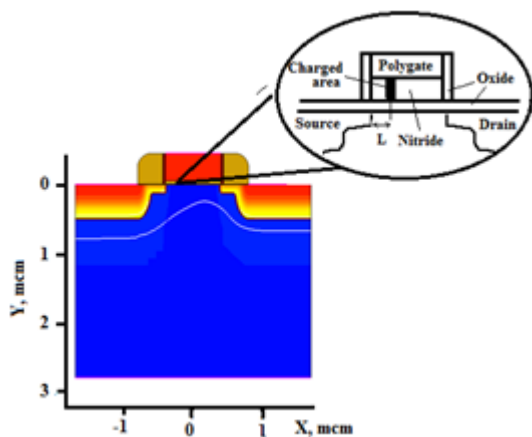


Рис.14 Моделируемая транзисторная структура. Во вставке показана заряженная область и расстояние L от истока до локального заряда.

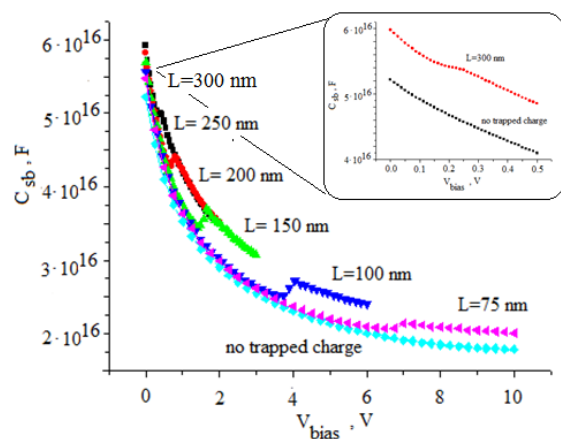


Рис 15. C-V характеристика перехода исток-подложка без встроенного в нитридном слое заряда и при встраивании заряда на различных расстояниях L от истока в МНОП транзисторе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа результатов изучения влияния различных внешних воздействий на свойства границы раздела диэлектрик-полупроводник и моделирования характеристик микрометровых и нанометровых МДП транзисторов можно сделать следующие основные выводы.

1. Показано, что радиационно-полевое воздействие на МОП транзисторы приводит к изменениям тока утечки, напряжения пробоя переходов исток-подложка и сток-подложка, которые зависят от распределения радиационно-индуцированного заряда вдоль границы раздела диэлектрик-полупроводник.

2. Показано, что при обоих радиационных воздействиях пороговое напряжение и составляющая связанная с накоплением заряда в оксидном слое монотонно растет с увеличением переноса энергии излучения, но скорость их изменения в случае облучения квантами от источника Со-60 примерно в два раза больше чем при облучении высокоэнергетическим тормозным излучением.

3. Установлено, что пороговое напряжение и его составляющие для МДП-транзистора, облученного высокоэнергетическим тормозным излучением с переносом энергии излучения $F=5 \cdot 10^3$ Дж/см², уменьшаясь, восстанавливается при температуре отжига 360 °С.

4. Обнаружено немонотонное поведение тока утечки стока МДП транзистора с увеличением переноса энергии высокоэнергетического тормозного излучения, что обусловлено конкурирующим действием механизмов, связанных с уменьшением подвижности и обеднением поверхности полупроводника основными носителями под действием встроенного в оксидный слой радиационно-индуцированного положительного заряда.

5. Впервые показано, что одновременное воздействие ионизирующего излучения от источника Со-60 и ориентированного электрического поля на МДП транзистор приводит к неравномерному по оси напряжений изменению емкости в вольт-фарадной характеристике бокового перехода исток-подложка и изменение емкости зависит от ориентации поля во время облучения, что вызвано неравномерностью накопления заряда.

6. Предложен метод детектирования и оценки линейного размера и пространственного распределения заряда, встроенного вдоль границы Si-SiO₂ МДП транзистора. Показано, что облучение при малых экспозиционных дозах ($5 \cdot 10^6$ Р), с положительным смещением 10 В на истоке, приводит к преимущественной локализации встроенного заряда в боковой (около истоковой) области окисного слоя. Установлено, что увеличение дозы облучения (10^7 Р) при таком же смещении на истоке расширяет область локализации заряда, облучение же без смещения приводит к преимущественному накоплению заряда в центральной области оксидного слоя.

7. Предложен метод встраивания («записи») заряда с линейными размерами порядка 1000 нм в оксидный слой структуры Si-SiO₂ с помощью установки Кельвин пробы на основе атомного силового микроскопа, подачей на зонд, направленного на поверхность SiO₂, напряжения +10 В относительно Si(n) подложки структуры, в течении 15 минут в бесконтактной моде.

8. Численным моделированием показано, что встраивание локального заряда плотностью $\rho = 500 \text{ Кл/м}^3$ в оксидном слое над центральной областью промежутка исток-сток и локализованного в интервале $\Delta z = 300 \text{ нм}$ приводит к увеличению емкости бокового перехода МОП транзистора во всем интервале напряжений вольт-фарадной характеристики, но величина изменения емкости при определенном смещении зависит от формы распределения потенциала заряда.

9. Показано, что в рассматриваемой цилиндрической структуре диэлектрик-полупроводник, при встраивании в оксидном слое кольцеобразного заряда или двух заряженных колец, на оси цилиндрической структуры формируется одномерная потенциальная яма, параметры которой зависят от толщины и плотности заряда кольца. В случае встраивания двух заряженных колец параметры потенциальной ямы зависят и от расстояния между кольцами.

10. Предложен метод формирования потенциальной ямы в полупроводнике около границы с диэлектриком в цилиндрической структуре диэлектрик-полупроводник путем встраивания кольцеобразного заряда в диэлектрическом слое. При плотности заряда $9.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, ширине заряженных колец 6 нм и расстоянии между ними 9 нм глубина потенциала квантовой проволоки в направлении оси z может достигать 0.4 В и в направлении радиуса - 0.15 В, соответственно.

11. Впервые моделированием с помощью программы TCAD Sentaurus, установлено, что при встраивании локального заряда, линейным размером вдоль канала 80 нм, в нитридном слое МНОП транзистора с концентрацией легирования подложки 10^{16} см^{-3} , на боковой вольт-фарадной характеристике проявляется скачок емкости и показано, что положение этого скачка зависит от положения встроенного заряда относительно истока.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING
OF SCIENTIFIC DEGREES DSc.30.05.2018.FM/T.34.01
AT PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE**

URGANCH STATE UNIVERSITY

ATAMURATOV ATABEK EGAMBERDIEVICH

**EXTERNAL INFLUENCES TO THE DIELECTRIC-SEMICONDUCTOR
INTERFACE AND SIMULATION OF THE CHARACTERISTICS OF
MOSFET WITH MICROMETER AND NANOMETER SIZES**

01.04.10- Physics of semiconductors

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF SCIENCE (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT – 2019

The theme of the doctoral dissertation (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.3.DSc/FM97

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

Abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the Scientific Council at www.fti.uz and on Information and educational portal «ZiyoNet» www.ziyo.net.

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

Official opponents: **Antonio Garsia Loureiro**
Doctor of Science, Professor

Karimov Ibrohim Nabievich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Gulyamov Abdurasul Gafurovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organisation: **Karakalpak state university**

The defense of the dissertation will be held on «__» _____ 2019 at ____ at the meeting of Scientific Council No DSc.30.05.2018. FM/T.34.01 at the Physicotechnical Institute (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, Chingiz Aytmatov street, 2 «B». Phone/Fax: (99871) 235-42-91; e-mail: ftikans@uzsci.net).

The doctoral dissertation can be looked through in the Information Resource Centre at the Physical-technical Institute (registered under № ____) (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, Chingiz Aytmatov street, 2 «B». Phone/Fax: (99871) 235-42-91; e-mail: ftikans@uzsci.net).

Abstract of dissertation was distributed on «__» _____ 2019.

(Mailing report № ____ on «__» _____ 2019).

N. R. Avezova
Chairman of the Scientific Council of Award of Scientific Degrees, Doctor of Technical Sciences

O. A. Abdulkhaev
Scientific Secretary of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, PhD in Physics and Mathematics

A. V. Karimov
Chairman of Scientific Seminar of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of physical and mathematical Sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Actuality and demand of the theme of dissertation. Investigation of the properties of metal - oxide - semiconductor (MOS) structures and devices on his base attract attention of the wide world researchers' community. The research dielectric-semiconductor interface as well as characteristics of submicron and nano size MOS devices under different external influences is actual task of semiconductor micro- and nanoelectronics. Most burning task in this context is research of effects of influences of ionizing radiations, electric field, charge injection and thermic treatment to the properties of dielectric-semiconductor interface in micrometer as well as in nanometer size MOS structures. In the range with investigations of radiation hardness one of the most important tasks is the forming of stable, transformable and selforganized nanostructures on the MOS devise base.

Degree of knowledge of the problem. Up to these days in most researches connected with external influence to properties of dielectric-semiconductor interface it is restricted with consideration of influence of Co-60 quantum, X-rays, electrons, protons, neutrons beams, UV light and practically was not considered the influence of high energy bremsstrahlung. In this field many researches was done by USA scientists J.R. Schwank, P.S. Winokur, F.B. McLean and it was proposed models which describes mechanism of trapping the charges in oxide layer and Si-SiO₂ interface. Russian scientists V.Ya. Uritskiy, V.A.Gurtov, E.A. Ladygin investigated the degradation of carrier mobility at Si-SiO₂ interface under radiation influence and radiation induced interface defect distribution. Scientists of Uzbekistan A. Karimov, S.I. Vlasov, X.S. Daliev and A. Yusupov investigated influence processing of MOS structures in Cl atmosphere and found that silicon surface states passivized by Cl atoms, developed modified C-V methods for investigation of characteristics of MOS structures, influence of Co-60 quantum to the threshold voltage is considered and it is found that MOS devices is more sensitive to quantum Co-60 than to high energy bremsstrahlung.

The aim of research work is the defining properties of dielectric-semiconductor interface and characteristics of MOS devices of submicron and nanometer sizes under different external influences and influence of oxide trapped and interface trapped charges to properties of dielectric-semiconductor interface from point of view to form different nano size structures.

Scientific novelty of research consists of the following results:

it was shown at first time the change of component of threshold voltage due to oxide trapped charge is increased and tend to saturation at radiation energy transfer higher than 10^3 J/cm² under influence of high energy bremsstrahlung as well as under influence of Co-60 quantum;

it was ascertained under simultaneous influence of high energy bremsstrahlung and the oriented electrical field it was visible nonuniform trapping of the charge along the Si-SiO₂ interface;

it was shown under influence of Co-60 quantum and simultaneous applied voltage +10 V to the gate relatively drain the breakdown voltage of the drain-

substrate transition is decreased from -30 V up to -5 V, while the breakdown voltage of the source-substrate transition practically is not changed;

it was shown experimentally for the first time influence of Co-60 quanta at applied ± 10 V to the source relative drain of MOSFET change the C-V dependence of the source-substrate transition, which depend on polarity of applied voltage and radiation dose;

it was shown the charge with order of linear size 1000 nm can be trapped («written») in SiO₂ layer of Si-SiO₂ structure by applying +10 V to the tip of atomic force microscope during 15 minutes relative Si(n) substrate at non contact mode;

for the first time theoretically it was deduced distribution of the potential of the charge distributed in oxide layer of cylindrical structure dielectric-semiconductor and his dependence on parameters of the distributed charge;

for the first time it was simulated the change of the C-V dependence of lateral transitions of MNOSFET (metal-nitride-oxide-semiconductor field effect transistor) at trapping the localized charge in nitride layer and it is shown the trapped charge induces jump of the lateral capacitance at the voltage which depend on position of the trapped localized charge.

Scientific and practical significance of the research results.

Scientific significance of the research results of the work is creation of new ideas about the changing of the threshold voltage and his components due to oxide trapped charge and interface trapped charge under influence the high energy bremsstrahlung, particularly it was shown this parameters is changed approximately two times faster under influence of Co-60 quanta than at influence of high energy bremsstrahlung.

The practical significance of the research results of the work is determined by the fact, that the C-V dependence of source-substrate (or drain-substrate) transition depend on non uniformity of charge distribution in oxide layer or at oxide-semiconductor interface and it can be used for monitoring interface defects at semiconductor device technology; and the deduced dependence of the potential distribution at surface or in volume of semiconductor on oxide or interface trapped charge distribution can be used for developing reorganizable semiconductor nanostructures.

Application of the research results. The results of experimental studying of influence the ionizing radiations, thermic and field processing and simulation the influence of nonuniform distributed charge in dielectric layer of MOSFET to I-V and C-V dependences of lateral transitions were used in the following scientific researches:

transport models used at simulation characteristics of MOS devices and theoretical calculations of field distributions on the Poisson equation base in the dielectric-semiconductor structures were used in part of the project «Development of modelling and simulation tools for advanced semiconductor devices: application to the study of intrinsic parameter fluctuations» of University of Santiago de Compostela supported by the Ministerio de Ciencia e Innovacion, Spanish Government, Spain for developing the tools for simulation the advanced field effect transistors (letter of implementation the Research Center CITIUS of the University

of Santiago de Compostela, Spain from 29.04.2019). The use of the scientific results has allowed to develop physical models and tools to simulate nanometer size field effect transistors, particularly, to simulate characteristics of FinFETs at fluctuation initial parameters;

the results connected with influence of charge trapped in oxide layer, induced by influence Co-60 quantum and field, to depletion layer and therefore to I-V, C-V characteristics, leakage current and breakdown voltage of the source-substrate p-n transition were used in fundamental project Φ -2-28 «Surface and body quantum effects and his influence to the charge carrier photo generation and recombination processes in p-n junctions» carried out in Andijan State University at study carrier photo generation processes in silicon based p-n junctions (Reference №89-03-4389 of Ministry of Higher and Secondary Special Education on December 20, 2018). The use of scientific results has allowed to explain some surface effects and his influence to carrier photo generation processes in p-n junctions;

experimental results of dissertation connected with investigation charged oxide surface and polar surfaces of semiconductors with Kelvin probe methods, were used for measuring the local electric potential, which is induced at surfaces of nanometer size samples as well as for study the different stage of growth nanowires from different materials on the surfaces of different semiconductors (Journal of Physics and Chemistry of Solids, 89, 7-14, 2016, IF: 2.207; Journal of Crystal Growth, 510, 56-64, 2019, IF 1.742; Materials Science in Semiconductor Processing, 55, 32-45, 2016, IF: 2.593 and so on).

Structure and volume of dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusion, a list of used references and applications. The text of the dissertation is printed in 172 pages, including 53 figures.

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

I бўлим (I часть, part I)

1. A.E. Atamuratov, Z.A. Atamuratova, A. Yusupov, A. Ghani. Characterising lateral capacitance of MNOSFET with localised trapped charge in nitride layer // Results in Physics. – 2018. – V.11. – P. 656-658. (№3, Scopus, IF=2.01)

2. A.E. Atamuratov, U.A. Aminov, Z.A. Atamuratova, M. Halillaev, A. Abdikarimov, H. Matyakubov. The lateral capacitance of nanometer MNOSFET with a single charge trapped in oxide layer or at SiO₂ – Si₃N₄ interface // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. – 2015. – V.6, №6. P. 837-842. (01.00.00, №5)

3. A. E. Atamuratov, D. Yu. Matrasulov, and P. K. Khabibullaev. Influence of the Field of the Built_in Oxide Charge on the Lateral C–V Dependence of the MOSFET // Doklady Physics. – 2010. – Vol. 55, No. 2. – P. 52-54. (№3, Scopus, IF=0.61)

4. J. D. Wei, S. F. Li, A. Atamuratov, H.-H. Wehmann, and A. Waag. Photoassisted Kelvin probe force microscopy at GaN surfaces: The role of polarity // Appl. Phys. Lett. – 2010. – V. 97, – P. 172111 (№3, Scopus, IF=3.25)

5. A. N. Georgobiani, A. E. Atamuratov, U. A. Aminov, and T. A. Atamuratov. Tunable SiO₂/Si-Based Nanostructures // Inorganic Materials. – 2009. – Vol. 45, No. 8. – P. 900-904. (№3, Scopus, IF=0.69)

6. А.Э. Атамуратов, Д.У. Матрасулов. Моделирование влияния заряда, встроенного в оксидном слое на боковую вольтемкостную характеристику коаксиального МОП транзистора // Uzbek Journal of Physics. – 2009. – V.11, №5-6. – P.302-306. (01.00.00, №5)

7. A.E. Atamuratov. Modeling of quantum wires in the interface layer of the semiconductor-oxide structures with charge built in oxide // Complex Phenomena in Nanoscale Systems. NATO Science for Peace and Security Series-B:Physics and Biophysics. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Recent Advances in Nonlinear Dynamics and Complex System Physics; From natural to Social Sciences and Security. Tashkent, Uzbekistan. – 2008, 12-17 October. – P.229-237. (№3, Scopus, IF=0.15)

8. A. E. Atamuratov, D. U. Matrasulov, and P. K. Khabibullaev. Detection of a Charge Built in the Oxide Layer of a Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor by Lateral C- V Measurement // Doklady Physics. – 2007. – Vol. 52, No. 6. – P. 322-325. (№3, Scopus, IF=0.61)

9. A.E. Atamuratov. Influence of the high-energy bremsstrahlung on field transistor threshold voltage // Uzbek Journal of Physics. – 2003. – V.5, №5-6. – P.356-358. (01.00.00, №5)

10. Atamuratov A.E., Yusupov A., Adinaev K. Experimental Assesment of the Nonuniform Radiation – Induced Space – Charge Distribution in the Surface

Region of Silicon // Inorganic Materials. – 2001. – Vol. 37, No. 8. – P.767. (№3, Scopus, IF=0.69)

11. Zainabidinov S., Atamuratov A.E., Yusupov A., Adinaev K. Ionizing Radiations and annealing influence on MOSFET charge states // Tr. J. of Physics. – 1999. – V.23, No. 3. – P.485. (№3, Scopus, IF=0.49)

И бўлим (II часть, part II)

12. Атамуратов А.Э., Юсупов А., Аминов У.А. Влияние высокоэнергетического тормозного излучения и термообработки на параметры МОП транзистора // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2003. – №4. – С. 54-56.

13. A.E. Atamuratov, Z.A.Atamuratova, A. Yusupov. New fast method for reading charge bit stored in MNOSFET / EuroScicon Conference on Applied Science, Biofuels &Petroleum Engineering. – November 12-13, 2018 Athens, Greece. – p.40.

14. А.Э. Атамуратов, Т. Саидов, З. Атамуратова. Моделирование влияния заряда встроенного в оксидном слое коаксиального МОП транзистора на распределение концентрации неосновных носителей в подложке / Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики». – 18-19 май 2007, Ташкент. – С . 205-207.

15. А.Э. Атамуратов. Моделирование распределения потенциала поля заряда, встроенного около границы Si-SiO₂ / Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики». – 18-19 май 2007, Ташкент. – С. 207-208.

16. A.E. Atamuratov. Modeling of lateral C-V dependence of coaxial MOSFET with built-in charge in oxide layer / Materials of conference «Magnetic and superconducting materials». – 25-30 September 2007, Khiva. – P. 28.

17. A. E. Atamuratov, Charulata Barge, H.-H Wehmann. Features of the charged area image on a SiO₂ surface / Materials of Conference «Fundamental and Applied Problems of Physics», Tashkent – 2006. – P. 146-148.

18. Атамуратов А.Э., Юсупов А., Бабаджанов К. Распределение поверхностной концентрации неосновных носителей в цилиндрически канальном МОП транзисторе с встроенным зарядом в оксидном слое / Сборник тезисов докладов IV Республиканской конференции по физической электронике. – 2-4 ноября, Ташкент, 2005. – С.48.

19. Атамуратов А.Э. Модуляция распределения поверхностной концентрации носителей около границы Si-SiO₂ / Сборник тезисов докладов IV Республиканской конференции по физической электронике. – 2-4 ноября, Ташкент, 2005. – С.143.

20. Атамуратов А.Э., Юсупов А., Бабаджанов К., Жуманиязов Б. Дозовая и полевая зависимость изменения емкости перехода исток-подложка МОП транзистора при радиационно-полевым воздействием / Материалы IV

Республиканской конференции «Рост, свойства и применение кристаллов».- 27-29 октября 2005, Нукус. – С. 97-98.

21. А.Е. Atamuratov, Н.-Н. Wehmann. Determination of the longitudinal charge distribution at the Si-SiO₂ interface of MOSFET by C–V measurements / Materials of Second International Conference «Fundamental and Applied Problems of Physics», Tashkent. – 2004. – P.222-224.

22. А.Е. Atamuratov. «Scanning» of nonuniform charge distribution on Si-SiO₂ interface of the MOSFET by capacitance measurements / Proceedings of conference «Photoelectric phenomena in semiconductors». – 20-21 April 2004, Tashkent. – P. 60.

23. Атамуратов А.Э. Метод чтения зарядовых изображений на поверхности полупроводника боковым емкостным измерением / Материалы конференции «Фотоэлектрические явления в полупроводниках». – 20-21 апреля 2004, Ташкент. – С.138.

24. А.Е. Atamuratov, А. Yusupov, А. Kashetov, D. Saidov, К. Rusimov. Radiation induced localization of a charge in limited space of oxide layer in MOS transistor / Proceedings of the Fifth International Conference «Modern problems of nuclear physics». – 12-15 August 2003. – P.176.

25. Атамуратов А.Э., Юсупов А., Бабаджанов К. Способ оценки линейного размера области неоднородного распределения заряда на границе Si-SiO₂ МОП транзистора / Труды конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». – 27-28 ноября, Ташкент, 2003. – С. 194-195.

26. Атамуратов А.Э., Юсупов А., Адинаев К., Рузимов К., Саидов Д. Влияние радиационно-полевого воздействия на обратную токовую характеристику перехода исток-подложка МОП транзистора / Труды III национальной конференции «Рост, свойства и применение кристаллов». – 22-23 октября 2002, Ташкент. – С.157-158.

27. Атамуратов А.Э., Юсупов А., Юлдашев Ш., Адинаев К. Влияние термической обработки на зарядовые состояния двуокиси кремния около границы раздела Si-SiO₂ МОП транзистора / Тезисы докладов 1-ой национальной конференции «Рост кристаллов». – 2-3 октября 1997, Ургенч. – С. 50.

28. Атамуратов А.Э., Адинаев К.М., Асадова У. Влияние плотности поверхностных состояний на ток стока МОП-транзистора / «Ёш физик ва математиклар» илмий анжумани материаллари.-1995 Тошкент. – С. 43.

29. Арипов Г., Атамуратов А.Э. Адинаев К., Асадова У., Аскарров О. МОП транзисторлар Si-SiO₂ чегарасининг юза сатхлар зичлигининг стабиллиги хакида/ Урганч Давлат университетининг илмий конференцияси докладлари тезислари.- 1995, Урганч. – С. 9.

30. Зайнабидинов С., Далиев Х.С., Атамуратов А.Э., Адинаев К. Особенности изменения спектра поверхностных состояний на межфазной границе Si-SiO₂ МОП-транзистора после ионизирующего облучения и термической обработки / «Яримутказгичлар ва диэлектриклар физикасининг хозирги замон муаммолари» номли Халкаро илмий анжуман тезислари. – 20-22 декабрь 1995, Тошкент. – С. 142.

31. Зайнобидинов С.З., Далиев Х.С., Атамуратов А.Э., Арипов Г., Адинаев К. Изменение зарядовых состояний МОП транзистора при радиационной и термической обработке / «Ўзбекистон олий ўқув юртларида физика фанининг ютуклари» Конференция маърузалари матни. – 5-6 сентябрь 1995, Тошкент. – С.67-72.

32. Атамуратов А.Э., Далиев Х.С., Зайнабидинов С. Изменение тока утечки МОП транзистора связанное с генерацией поверхностных состояний на межфазной границе Si-SiO₂ / Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Электрическая релаксация в высокоомных материалах». – 3-7 октября 1994, Санкт-Петербург. – С. 90-91.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририясида таҳрирдан
ўтказилди (15.05.2019 йил)

Босишга рухсат этилди: _____ 2019 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 4. Адади: 100. Буюртма: № _____.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.