ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.326.07 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (РТУ МИРЭА) МИНОБРНАУКИ РОССИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 29.10.2024 №66

О присуждении Мяконьких Андрею Валерьевичу ученой степенидоктора физико-математических наук.

Диссертация «Фундаментальные основы плазменных технологий структурирования для наноэлектроники»в виде рукописи по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» принята к защите 19 сентября 2024 года, протокол № 42 диссертационным советом 24.2.326.07, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), Минобрнауки РФ, Москва, 119454, проспект Вернадского, 78. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 22 человек приказом от 26.01.2023 (№ 86/нк).

Соискатель Мяконьких Андрей Валерьевич, 01.05.1983 года рождения, гражданин Российской Федерации. В 2006 году соискатель окончил Московский физико-технический институт (государственный университет), присуждена степень магистра по направлению «Прикладные физика и математика». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Мониторинг плазмохимических процессов формирования микро- и наноструктур методами зондовой диагностики» по специальности 05.27.01 — «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» защитил в 2009 году в диссертационном совете, созданном на базе Физико-технологического института РАН. В настоящее время работает в должности старшего научного сотрудника Отделения физико-технологических исследований им. К.А. Валиева КК НБИКС-ПТ Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Диссертация выполнена в Лаборатории микроструктурирования и субмикронных приборов и Лаборатории функциональных диэлектриков микроэлектроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук (с 11 октября 2024 года реорганизован в форме присоединения к Национальному исследовательскому центру «Курчатовский институт» на основании распоряжения Правительства РФ от 30.05.2024 № 1322-р).

**Научный консультант** – Руденко Константин Васильевич, доктор физико-математических наук, доцент, Заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник ФТИАН им. К.А. Валиева РАН. После реорганизации ФТИАН им. К.А. Валиева РАН - главный научный сотрудник Отделения физико-технологических исследований им. К.А. Валиева КК НБИКС-ПТ Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

**Официальные оппоненты**:

1. Агеев Олег Алексеевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования Южного Федерального Университета (ЮФУ), профессор Института нанотехнологий, электроники и приборостроения;

2. Лебедев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), главный научный сотрудник, и.о. зав. Лабораторией плазмохимии и физикохимии импульсных процессов.;

3. Путря Михаил Георгиевич, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (НИУ МИЭТ), профессор Института интегральной электроники имени академика К.А. Валиева

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» в своем положительном заключении, составленном Рахимовым Александром Турсуновичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим Отделом микроэлектроники Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и утвержденном Федяниным А.А., доктором физико-математических наук, профессором, проректором МГУ, указала, что диссертационная работа Мяконьких А.В. была обсуждена и получила положительную оценку на заседании Совета отдела микроэлектроники научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова 14 ноября 2024 года, диссертация выполнена на высоком научном уровне и соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (в редакции от 25.01.2024), а сам Андрей Валерьевич Мяконьких, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Соискатель является автором более 130 работ, индексированных в системе Scopus, и имеет 88 публикаций по теме диссертации, индексированных в системе цитирования Scopus (51 статья в рецензируемых журналах и 37 статей по докладам на международных научных конференциях). Из них 20 статей в российских журналах из списка ВАК. Кроме того, по теме работы получено 5 патентов РФ, зарегистрирована программа для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на более чем 25 всероссийских и международных конференциях. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Мяконьких А.В., Куваев К.Ю., Татаринцев А.А., Орликовский Н.А., Руденко К.В., Гущин О.П., Горнев Е.С. Исследование процесса сквозного плазмохимического травления HkMG стека нанотранзистора с критическим размером 32 нм. Микроэлектроника. 2018. Т. 47. № 5. С. 44-50.
2. Мяконьких А.В., Орликовский Н.А., Рогожин А.Е., Татаринцев А.А., Руденко К.В. Влияние дозы экспонирования на стойкость негативного электронного резиста HSQ в процессах плазмохимического и химического травления. Микроэлектроника. 2018. Т. 47. № 3. С. 179-186.
3. Chesnokov Y.M., Miakonkikh A.V., Rogozhin A.E., Rudenko K.V., Vasiliev A.L. Microstructure and electrical properties of thin HfO2 deposited by plasma-enhanced atomic layer deposition, Journal of Materials Science, 2018, V. 53(10), pp. 7214–7223.
4. Руденко М.К., Мяконьких А.В., Лукичев В.Ф. Моделирование методом Монте-Карло дефектов профиля тренча в процессе глубокого криогенного травления кремния. Микроэлектроника. 2019. Т. 48. № 3. С. 191-200.
5. Rezvanov A.A., Miakonkikh A.V., Seregin D.S., Vishnevskiy A.S., Vorotilov K.A., Rudenko K.V., Baklanov M.R. Effect of terminal methyl group concentration on critical properties and plasma resistance of organosilicate low-k dielectrics, Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films, 2020, V. 38(3), Art. No. 33005.
6. Мяконьких А.В., Смирнова Е.А., Клементе И.Э. Применение метода спектральной эллипсометрии для исследования процессов атомно-слоевого осаждения. Микроэлектроника. 2021. Т. 50. № 4. С. 264-273.
7. Руденко М.К., Мяконьких А.В., Лукичев В.Ф. Численное моделирование криогенного травления: модель с отложенной десорбцией. Микроэлектроника. 2021. Т. 50. № 1. С. 58-67.
8. Popov V.P., Tikhonenko F.V., Antonov V.A., Tyschenko I.E., Miakonkikh A.V., Simakin S.G., Rudenko K.V. Diode‐like current leakage and ferroelectric switching in silicon sis structures with hafnia‐alumina nanolaminates, Nanomaterials, 2021, V. 11(2), Art. No. 291, pp. 1–14, DOI: 10.3390/nano11020291.
9. Мяконьких А.В., Шишлянников А.В., Татаринцев А.А., Кузьменко В.О., Руденко К.В., Горнев Е.С. Исследование плазмостойкости электронного резиста HSQ высокого разрешения для прототипирования приборов наноэлектроники. Микроэлектроника. 2021. Т. 50. № 5. С. 333-338.
10. Popov V.P., Antonov V.A., Miakonkikh A.V., Rudenko K.V. Ion Drift and Polarization in Thin SiO2 and HfO2 Layers Inserted in Silicon on Sapphire, Nanomaterials, 2022, V. 12(19), Art. No. 3394.
11. Rudenko M., Kuzmenko V., Miakonkikh A., Lukichev V. On temperature and flux dependence of isotropic silicon etching in inductively coupled SF6 plasma, Vacuum, 2022, V. 204, Art. No. 111326.
12. Tarkov M., Tikhonenko F., Popov V., Antonov V., Miakonkikh A., Rudenko K. Ferroelectric Devices for Content-Addressable Memory, Nanomaterials, 2022, V. 12(24), Art. No. 4488.
13. Popov V.P., Tikhonenko F.V., Antonov V.A., Zarubanov A.A., Gluhov A.V., Tatarintsev A.A., Miakonkikh A.V., Rudenko K.V. Parallel nanowire sensors with a high-k gate oxide for the sensitive operation in liquids, Solid-State Electronics, 2022, V. 194, Art. No. 108326.
14. Гайдукасов Р.А., Мяконьких А.В., Руденко К.В. Применение метода регуляризации Тихонова в задачах эллипсометрической порометрии low-k диэлектриков. Микроэлектроника. 2022. Т. 51. № 4. С. 243-254.
15. Мяконьких А.В., Кузьменко В.О., Ефремов А.М., Руденко К.В. Особенности кинетики гетерогенных процессов при травлении кремния в плазме CF4 и C2Br2F4. Микроэлектроника. 2022. Т. 51. № 6. С. 505-512.
16. Miakonkikh A., Kuzmenko V., Efremov A., Rudenko K. A comparison of CF4, CBrF3 and C2Br2F4 plasmas: Physical parameters and densities of atomic species, Vacuum, 2022, V. 200, Art. No. 110991.
17. Kuzmenko V., Lebedinskij Y., Miakonkikh A., Rudenko K. Selective atomic layer etching of Al2O3, AlNx and HfO2 in conventional ICP etching tool, Vacuum, 2023, V. 207, Art. No. 111585.
18. Kuzmenko V.O., Miakonkikh A.V., Rudenko K.V. Investigation of Fluorocarbon Film Deposition from Ar/CF4/H2 Plasma for the Implementation of the Atomic Layer Etching Process, High Energy Chemistry, 2023, V. 57, pp. S100–S104.
19. Miakonkikh A.V., Kuzmenko V.O., Melnikov A.E., Rudenko K.V. Tapered Silicon Oxide Etching for Creation of Capacitor Structures for Measurement of Dielectric Characteristics, Russian Microelectronics, 2023, V. 52(6), pp. 535–539.
20. Miakonkikh A.V., Kuzmenko V.O., Rudenko K.V. Cryo Plasma Etching of Porous Low-k Dielectrics, High Energy Chemistry, 2023, V. 57, pp. S115–S118.
21. Мяконьких А. В., Кузьменко В. О., Ефремов А. М., Руденко К. В. Параметры и состав плазмы в смеси CF4+H2+Ar: эффект соотношения CF4/H2. Микроэлектроника. 2024. Т. 53. № 1, С. 90–100.
22. Antonov V.A., Tikhonenko F.V., Popov V.P., Miakonkikh A.V., Rudenko K.V., Sverdlov V.A. SOS pseudo-FeFETs after furnace or rapid annealings and thining by thermal oxidation, Solid-State Electronics, 2024, V. 215, Art. No. 108821.
23. Гайдукасов Р.А., Мяконьких А. В., Применение спектральной эллипсометрии для диэлектрических, металлических и полупроводниковых пленок в технологии микроэлектроники. Микроэлектроника. 2024. Т. 53. № 1, С. 63–73.
24. Miakonkikh A., Kuzmenko V. Formation of Black Silicon in a Process of Plasma Etching with Passivation in a SF6/O2 Gas Mixture, Nanomaterials, 2024, V. 14(11), Art. No. 945.
25. Kuzmenko V., Melnikov A., Isaev A., Miakonkikh A. Revealing the controlling mechanisms of atomic layer etching for high-k dielectrics in conventional ICP etching tool, Journal of Vacuum Science and Technology A, 2024, V. 42, Art. No. 052602.

На автореферат диссертации поступило 9 отзывов, **все отзывы положительные**:

1) Отзыв от начальника лаборатории математического моделирования технологических процессов АО «НИИМЭ», д.х.н. профессора Ефремова Александра Михайловича. В отзыве указано, что к замечаниям по содержанию и форме организации автореферата следует отнести отсутствие должного внимания к описанию химии исследуемых процессов. Поэтому некоторые выводы по механизмам и взаимосвязям отдельных подсистем формально (то есть исключительно по мнению автора данного отзыва) носят декларативный характер.

В отзыве отмечается также, что работа оставляет положительное впечатление, обусловленное убедительным обоснованием ее актуальности, корректной формулировкой задач, достоверностью полученных результатов и корректностью их интерпретации.

2) Отзыв ведущего инженера отдела «Исследования и испытания» АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», д.т.н. Киреева Валерия Юрьевича. В отзыве отмечается, что тема диссертационной работы является весьма актуальной, как в теоретическом, так и в практическом аспектах. Указаны следующие замечания:

1. При исследовании механизмов непрерывного процесса анизотропного травления кремния в плазме смеси газов SF6 и C4F8 автор в автореферате не приводит информацию о зависимости скорости травления кремния от площади обрабатываемой поверхности и температуры пластины при заданных значениях рабочего давления и ВЧ мощности. А, именно, эти зависимости указывают на лимитирующую стадию реакции травления кремния, связанную либо с доставкой реагента, либо с кинетикой самой химической реакции. Только наличие этой информации позволит адаптировать различные производственные установки к условиям исследования автора на его установке.

2. На стр. 16 во второй формуле не расшифровано значение R0, а на четвертой строке снизу, напечатано вместо «глубина травления» «глубина отравления».

3. На стр. 23, первый абзац сверху, последняя строка, в структуре роlу- Si(100 нм)/ TaN(15 нм)/ HfN(2 нм)/ HfO2(4 нм)/IL/Si-пластина не расшифровано обозначение IL и его толщина и состав. Эта информация приведена только на стр. 27, что очень неудобно для понимания.

4. На стр. 25, второй абзац снизу, последняя строка, напечатано: «концентрации радикалов в плазме, измеренным методом зонда Ленгмюра». Однако, известно, что с помощью зонда Ленгмюра можно измерять температуру и концентрацию электронов в плазме, и потенциал самой плазмы.

5. На стр. 32, последняя строка, напечатано: «плотности атомов F и Вг», а надо печатать «плотности или концентрации атомов F и Вг в плазме».

В отзыве отмечается, что указанные недостатки не носят принципиального характера и не снижают ценности диссертационной работы, которая, без сомнения, является завершенным научным трудом, выполненном на высоком научно-техническом уровне и содержащим решение важной научной и народнохозяйственной проблемы, а, именно: «развитие фундаментальных основ ключевых плазменных технологических процессов формирования элементов приборных структур микро- и наноэлектроники на основе экспериментального исследования физических явлений.

3) Отзыв профессора ФГБОУ ВО «МТГУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)», д.ф.м.н., профессора Рыжкова Сергея Витальевича содержит одно замечание:

- В автореферате недостаточно полно рассмотрен механизм образования полимерных пленок на разных поверхностях.

Вместе с тем, указывается, что это замечание не снижает общего положительного впечатления от автореферата диссертационной работы, а в целом работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора физико-математических наук.

4) Отзыв профессоров КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева д.ф.м.н. профессора Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича и д.ф.м.н. профессора Тимеркаева Бориса Ахуновича. В отзыве отмечены следующие вопросы и замечания к тексту автореферата:

1. В автореферате для многих исследуемых процессов не указан диапазон давлений, в котором они проводятся.

2. В главах, посвященных моделированию, в частности, кинетике элементарных процессов не указано, учитывался ли вынос продуктов травления и конверсии рабочих газов из разрядной области.

Авторы отзыва отмечают, что указанные замечания не являются существенными и ни в коей мере не снижают общую научную ценность работы. Отмечается также, что выполненное в работе исследование фундаментальных аспектов взаимодействия плазма-поверхность, позволило автору сформулировать новые технологические подходы.

5) Отзыв начальника лаборатории кинетики слабоионизированной плазмы АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», д.ф.м.н., профессора Акишева Юрия Семеновича. Отзыв не содержит замечаний. Отмечается, что автореферат достаточно полно раскрывает актуальность темы, научную новизну, достоверность и обоснованность полученных результатов, демонстрирует их практическую значимость.

6) Отзыв профессора кафедры микро- и наноэлектроники Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» д.ф.м.н. профессора Абрамова Игоря Ивановича. Отзыв содержит следующие замечания:

1. Целесообразно было бы рассмотреть токовые и частотные свойства полученных с использованием предлагаемых методом нанотранзисторов.

2. Из автореферата не ясны границы применимости предложенного в работе нового метода анизотропного травления кремния в цикле «окисление-травление», в частности было бы интересно понять наноструктуры каких размеров могут быть получены таким методом.

3. К сожалению, в автореферате не отражены возможности использования структур «кремний-на-сегнетоэлектрике» для изготовления микросхем, включая вычислительные системы со встроенной универсальной энергонезависимой памятью, нейроморфные системы SoC на матрицах FeFET, реализацию новых архитектур «вычислений в памяти».

Автор отзыва указывает, что отмеченные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы в целом.

7) Отзыв главного научного сотрудника отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, д.ф.м.н. профессора Скворцовой Нины Николаевны. Отзыв содержит следующие замечания к автореферату:

1. На рисунке 2б приведено два графика, соответствующих разным величинам VG, однако в подрисуночной подписи и в тексте автореферата не поясняется, что это за величина.

2. На рисунке 3 нет масштабного маркера.

3. Обилие англоязычной специальной терминологии (например, Cap-слой, backgate, notch, FD SOI-FET и др.), никак не объясненной автором, затрудняет чтение работы.

В отзыве отмечается, что указанные замечания носят незначительный характер и не влияют на хорошее впечатление от работы, которая несомненно выполнена на высоком научном уровне. Отмечается, что исследование фундаментальных основ технологических применений плазмостимулированных процессов позволило предложить новые технологические подходы к формированию приборных наноструктур.

8) Отзыв от ведущего научного сотрудника лаборатории лазеров и сверхкоротких импульсов Института лазерной физики СО РАН, д.ф.м.н. Автаевой Светланы Владимировны. Отзыв не содержит замечаний. Отмечается, что результаты, полученные соискателем, являются новыми и имеют несомненную научную и практическую значимость.

9) Отзыв главного научного сотрудника кафедры технологии приборов и материалов электронной техники Ивановского государственного химико-технологического университета, д.х.н, профессора Рыбкина Владимира Владимировича.

Отзыв содержит следующее замечание:

Неясно как обрабатывались результаты измерений зондами Лэнгмюра. Непонятно также как определялась концентрация атомов кислорода и на основе каких данных находились потоки активных частиц на поверхность.

Вместе с тем отмечается, что работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их высокой профессиональной квалификацией и наличием признанных достижений в областях, соответствующих тематике представляемой работы.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**выдвинута** и впоследствии решена новая научная проблема, о том, что неодинаковые транспортные свойства радикалов фтора и кислорода в высокоаспектных структурах могут приводить к формированию дефектов травления и шероховатости на стенках, что позволило разработать процессы не склонные к таким недостаткам; **введены** новые представления о формировании структур черного кремния при анизотропном травлении; **предложен и обоснован** процесс атомно-слоевого травления для оксидов гафния, алюминия и кремния и нитрида алюминия, основанный на осаждении полимерной пленки в плазме смеси газов CF4+H2+Ar с последующей активацией ионами аргона; **показано,** чтоорторомбическая фаза оксида гафния стабилизированная наноламинатами оксида алюминия проявляет высокую термическую стабильность в составе внутреннего диэлектрического слоя в структурах «кремний на сегнетоэлектрике» на подложках с-сапфира и кремния (001); **предложены** новые процессы плазмохимического травления пористых диэлектриков с ультранизкой диэлектрической проницаемостью, позволяющие избежать их деградации диэлектрического материала за счет предварительной конденсации паров фторбромуглеродных газов в пленки при пониженных температурах образца.

**Теоретическая значимость** исследования определяется тем, что:

**показано**, что формирующиеся при травлении в непрерывном процессе анизотропного плазменного травления с фторуглеродной пассивацией стенок дефекты кристаллической решетки кремния fin-структур сконцентрированы в приповерхностной области глубиной 2-3 нм, что подтверждается восстановлением проводимости таких структур после удаления нарушенного слоя жидкостным травлением.

**раскрыты** теоретические закономерности влияния параметров разряда и газового состава на формирование геометрических дефектов профиля при глубоком криогенном плазменном травлении кремния.

**изучены** закономерности самоформирования наноструктур «черного кремния» в процессах без полимерной пассивации.

**установлено,** что доминирующим механизмом защиты от деградации нанопористых диэлектриков при криогенном плазменном травлении в плазме C2F4Br2 является конденсация плазмообразующего газа в порах при пониженной температуре.

Научные исследования соискателя были поддержаны грантами Российского научного фонда, Российского фонда фундаментальных исследований.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что**: **предложены** новые технологические подходы к формированию приборных наноструктур, основанные на результатах проведенных фундаментальных исследований плазмостимулированных процессов.

Эксперименты по диагностике плазмы и плазмостимулированные процессы травления и осаждения проводились на серийных научно-технологических установках. Все вновь предложенные, на основе проведенных исследований, процессы апробированы на кремниевых пластинах диаметром 100 мм или 200 мм. Таким образом, работа представляет собой основу для разработки ряда промышленных плазменных технологических операций изготовления приборов наноэлектроники.

Технические решения технологий глубокого травления кремния без использования полимеробразующей плазмы, методов атомно-слоевого осаждения покрытий на AlGaN-гетероструктуры, предложенные модификации конструкций источников плазмы защищены патентами РФ (перечень приведен в списке публикаций автора).

**Определены** режимы криогенного травления глубоких, отверстий в кремнии с использованием переменного состава плазмообразующего газа, позволяющие получать глубокие высокоаспектные структуры травления с минимальной шероховатостью боковых стенок.

**Разработаны** совместимые с существующей кремниевой технологией технологические подходы для формирования захороненных слоев диэлектриков в структурах «кремний на сегнетоэлектрике», перспективные для создания сегнетоэлектрических полевых транзисторов FeFET, что открывает возможности их применения для реализации новой архитектуры ЭВМ с реализаций «вычислений в памяти».

**Представлены** результаты исследования процессов плазменного травления тонких подзатворных диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью (HfO2, ZrO2,Al2O3) в атомно-слоевом режиме при циклическом пошаговом процессе: плазма CF4+H2+Ar / плазма Ar и результаты исследования процесса атомно-слоевого травления AlN.

Таким образом, диссертационная работа Мяконьких А.В. вносит обширный научный вклад в общее понимание основ плазменных процессов структурирования в наноэлектронике и фундаментальных механизмов, лежащих в их основе, что имеет важное значение как с научной, так и с практической точки зрения.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила**, что **экспериментальные результаты получены** с применением современных методов исследования на сертифицированном научно-исследовательском и технологическом оборудовании; **теория построена** на проверяемых и воспроизводимых фактах; идеи предложенных методов структурирования базируются на анализе и обобщении современных литературных источников по теме плазменного травления; **дано** сравнение данных работы с результатами исследований других авторов по тематике диссертации.

**Личный вклад соискателя состоит** в постановке задач, установлении механизмов, анализе и интерпретации всех теоретических и экспериментальных результатов исследований, формулировке основных выводов. Соискателем лично предложены и поставлены все эксперименты по разработке процессов плазменного травления, в частности атомно-слоевого травления и криогенного травления, а также эксперименты по атомно-слоевому осаждению. Соискателем усовершенствована физическая модель анизотропного криогенного травления с переменным составом плазмообразующего газа, подтвержденная математическим моделированием. Автор также лично разработал примененные в диссертационной работе методики диагностики плазмы и поверхности *in situ* для мониторинга физико-химических процессов на поверхности микроструктур.

Непосредственное участие коллег автора диссертации в исследованиях отражено в виде их соавторства в опубликованных работах. Исходные программные коды модели криогенного травления, примененной и усовершенствованной автором для исследований в Главе 3, разработаны во ФТИАН им. К.А. Валиева РАН к.ф.-м.н. М.К. Руденко. Базы данных по сечениям для моделирования кинетики реакций и состава плазмы, использованные в Главах 5 и 7, созданы проф. ИГХТУ А.М. Ефремовым. Компьютерные программы для сбора корректных данных методом зонда Ленгмюра в пленкообразующей плазме и определения параметров плазмы по зондовым характеристикам на основе теоретических моделей написаны автором лично. Программа для расчета газовой температуры плазмы разработана лично автором с включением в модуль программы обработки спектров безлицензионного ПО PGOPHER (University of Bristol). Для обработки РЭМ-изображений черного кремния и определения длины автокорреляции для самоформирующихся наноструктур использована безлицензионная программа Gwyddion (Czech Metrology Institute). Результаты, составляющие научную новизну диссертационной работы и выносимые на защиту, получены автором лично.

Научный консультант д.ф.-м.н. Руденко К.В. участвовал в обсуждении задач и результатов настоящей диссертации на протяжении всей работы с 2010 года.

Все представленные выводы и положения, выносимые на защиту, получены лично автором.

В обсуждении диссертационной работы приняли участие: д.ф.-м.н. Грановский А.Б., д.ф.-м.н. Блантер М.С., д.ф.-м.н. Фетисов Ю.К., д.ф.-м.н. Мишина Е.Д., д.ф.-м.н. Пасечник С.В.

В результате Диссертационный совет пришел к заключению, что диссертация Мяконьких Андрея Валерьевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук согласно пп. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г. по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (физико-математические науки), в которой описаны новые научные знания о физических и химических явлениях происходящих при плазменных процессах структурирования приложениях микроэлектроники, и решены важные задачи, имеющие как теоретическое, так и практическое значение для развития микро- и наноэлектроники.

На заседании 23.12.2024 диссертационный совет принял решение: за экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей анизотропного травления кремния, за изобретение новых циклических анизотропных процессов травления кремния во фторсодержащей плазме при комнатной температуре без использования полимерной пассивации, расширение представлений о закономерностях процессов атомно-слоевого травления, исследование методов повышения термической устойчивости сегнетоэлектрической фазы диэлектриков на основе оксида гафния в захороненных слоях наноструктур «кремний на диэлектрике», разработку и исследование процесс малоповреждающего травления пористых диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью, что в совокупности можно квалифицировать как крупное научное достижение, присудить Мяконьких Андрею Валерьевичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 6 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени – 16, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней нет.

Председатель

диссертационного совета А.С. Сигов

Ученый секретарь

диссертационного совета Л.Ю. Фетисов

23.12.2024 г.