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 КАНДИДАТА НАУК

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

решение диссертационного совета от 16.11.2023 №22

О присуждении Руденко Михаилу Константиновичу, гражданину Российской Федерации, ученой степеникандидата физико-математических наук.

Диссертация "Математическое моделирование процесса криогенного плазменного травления высокоаспектных микроструктур в кремнии"в виде рукописи по специальности 2.2.2 — «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» выполнена выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технологическом институте имени К.А. Валиева Российской академии наук.

Принята к защите «31» августа 2023 года, протокол № 14 диссертационным советом 24.2.326.07 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 Руденко Михаил Константинович, 1987 года рождения, гражданин Российской Федерации. В 2009 году соискатель с отличием окончил Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ему была присвоена квалификация «Физик» по специальности «Физика». В 2012 году окончил очную аспирантуру ФТИАН им. К.А. Валиева по специальности 05.27.01. Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 году во ФТИАН им. К.А. Валиева. В настоящее время работает научным сотрудником во ФТИАН им. К.А. Валиева.

Научный руководитель – Лукичев Владимир Федорович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор Физико-технологического института РАН им К.А. Валиева.

Официальные оппоненты:

1. Путря Михаил Георгиевич, гражданин РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники МИЭТ.

2. Тагаченков Александр Михайлович, гражданин РФ, кандидат физико-математических наук, начальник отдела Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (ИНМЭ РАН)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения 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 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и утвержденном Федяниным А. А., доктором физико-математических наук, профессором, проректором, начальником Управления научной политики МГУ, указала, что диссертационная работа Руденко М.К. 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 24 августа 2023 года и соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 год № 335, а сам Михаил Константинович Руденко, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

В обсуждении диссертационной работы приняли участие: Битюков В.К., Блантер М.С., Юрасов А.Н., Мяконьких А.В.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ по теме диссертации, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 5 –– в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 2 –– в тезисах докладов.

Результаты работы были апробированы на 2 международных конференциях.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем М.К. Руденко работах.

Работы по теме диссертации:

1. **M. K. Rudenko,** A. V. Myakon’kikh, V. F. Lukichev. Monte Carlo Simulation of Defects of a Trench Profile in the Process of Deep Reactive Ion Etching of Silicon // Russian Microelectronics. — 2019. — May. — Vol. 48, no. 3. — P. 157—166.
2. **M. K. Rudenko**, A. V. Myakon’kikh, V. F. Lukichev. Numerical Simulation of Cryogenic Etching: Model with Delayed Desorption // Russian Microelectronics. — 2021. — Jan. — Vol. 50, no. 1. — P. 54—62.
3. **M. K. Rudenko**, V. Kuzmenko, A. V. Miakonkikh, V. F. Lukichev. On temperature and flux dependence of isotropic silicon etching in inductively coupled SF6 plasma // Vacuum. — 2022. — Oct. — Vol. 204. — P. 111326.
4. **М. К. Руденко**, А. В. Мяконьких, В. Ф. Лукичев. Математическое моделирование аспектной зависимости глубокого криогенного травления кремния для различных вариантов топологии маски // Нано- и микросистемная техника. — 2023. — Февр. — Т. 25, No 1. — С. 3—9.
5. **M. K. Rudenko**, A. V. Miakonkikh, D. Kurbat, V. F. Lukichev. Sidewall defects in deep cryogenic Si etching in SF6 /O2 plasma: a numerical simulation // International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018. Vol. 11022 / ed. by V. F. Lukichev, K. V. Rudenko. — International Society for Optics, Photonics. SPIE, 03/2019. — 110221Y.
6. **M. K. Rudenko**, A. V. Miakonkikh, V. F. Lukichev. Numerical study of aperture shape effects in deep cryogenic etching of silicon // International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2021. Vol. 12157 / ed. by V. F. Lukichev, K. V. Rudenko. — International Society for Optics, Photonics. SPIE, 01/2022. — P. 1215713.
7. **M. K. Rudenko**, A. V. Miakonkikh, D. Kurbat, V. F. Lukichev. Sidewall defects in deep cryogenic Si etching in SF6/O2 plasma: a numerical simulation // Micro- and Nano-Electronics 2018: Proceedings of the International Conference: Book of Abstracts / ed. by V. F. Lukichev, K. V. Rudenko. — 2018. — P2—28.
8. **M. K. Rudenko**, A. V. Miakonkikh, V. F. Lukichev. Numerical study of aperture shape effects in deep cryogenic etching of silicon // Micro and Nano-Electronics 2021: Proceedings of the International Conference: Book of Abstracts / ed. by V. F. Lukichev, K. V. Rudenko. — 2021. — P2—28.
9. **М. К. Руденко**, А. В. Мяконьких, В. Ф. Лукичев. Численное моделирование дефектов профиля тренчей при глубоком криогенном травлении кремния в плазме SF6/O2 // Труды ФТИАН: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника. Т. 28 / под ред. Т. М. Махвиладзе, В. Ф. Лукичева. — Москва: Наука, 2019. — С. 102—111.
10. **М. К. Руденко**, А. В. Мяконьких, В. Ф. Лукичев. Особенности учета процесса десорбции при компьютерном моделировании криогенного травления кремния // Труды ФТИАН: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника. Т. 30 / под ред. Ю. И. Богданова, В. Ф. Лукичева. — Москва: Наука, 2021. — С. 34—50.

По результатам работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664590 «Программа моделирования криогенного плазменного травления NGCES», автор Руденко М.К., дата государственной регистрации 05 июля 2023 г.

На автореферат диссертации поступило 6 отзывов:

1. От Коноплева Б.Г, научного руководителя Института нанотехнологии, электроники и приборостроения Южного федерального университета доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки РФ — отзыв положительный. В отзыве присутствуют следующие замечания:
   1. Из автореферата неясно, проводился ли анализ вычислительной сложности используемых алгоритмов.
   2. Не приведены сведения о временных затратах на моделирование реальных структур.

Отмечено, что замечания не снижают высокой оценки представленной диссертационной работы

1. От Рощупкина Д.В., и.о. директора ИПТМ РАН, члена-корреспондента РАН, доктора физ.-мат. наук — отзыв положительный. В отзыве присутствуют следующие замечания:
   1. Хочется увидеть переход в формировании структур от микронных размеров к нанометровым размерам. Будут ли существенные различия при формировании наноразмерных структур с высоким аспектным отношением? На рисунке 4 показано уменьшение скорости травления с уменьшением размеров в микронном диапазоне. Наверное, если экстраполировать на нанометровые размеры, то замедление скорости травления будет существенным.
   2. На рисунке 4 не хватает расшифровки параметров w и d. Скорее всего, w - ширина канала, а d - диаметр отверстия.
   3. Не отмечена ориентация подложек кремния, используемых в работе. И, соответственно, возникает вопрос о том, есть ли признаки анизотропии процесса травления в зависимости от ориентации кремниевой пластины, так как для ряда приложений интересно использование подложек кремния с ориентацией (111) и (110).
   4. На рисунках 10, 11 целесообразно было бы использовать для размерных маркеров более крупный шрифт.
   5. На рисунках 11, 12 не хватает размерных маркеров.

Указано, что сделанные замечания не снижают научной и практической ценности полученных соискателем результатов и общего положительного впечатления от работы.

1. От Снигирева О.В., доктора физ.-мат. наук, профессора, заведующего кафедрой физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета МГУ — отзыв положительный. В отзыве присутствуют следующие замечания:
   1. Качество автореферата, несомненно, выиграло бы, если бы при обосновании предлагаемой модели криогенного травления на странице 9 было указано и обосновано соответствие размера ячеек, используемого для моделирования, физическим размерам (в нанометрах). В описании результатов главы 4 по математическому моделированию формирования глубоких высокоаспектных микроструктур в кремнии в процессе криогенного отравления в плазме, размер ячейки указывается (10 нанометров, страница 13), но из реферата не очень ясно, использовался ли этот размер всегда или только в этом случае.
   2. Кроме того, в этом случае, как следует из текста автореферат, предполагалось, что поток ионов является моноэнергетическим, с энергией 65 эВ. В реальной ситуации всегда бывает некий разброс по энергиям, который, например, в случае электронной микроскопии, приводит к известной потере разрешения. Непонятно какие могут быть величины разброса по энергиям ионов, и как это будет влиять на конечный результат.

Указано, что сделанные замечания не снижают научной и практической ценности полученных соискателем результатов и общего положительного впечатления от работы.

1. От Ефремова А.М., профессора кафедры технологии приборов и материалов электронной техники ФГБУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктора химических наук — отзыв положительный. В отзыве присутствуют следующие замечания:
   1. Очевидно, что модуль генерации частиц должен основываться на совокупности химических процессов, а именно реакции электронного удара, объёмные атомно-молекулярные реакции и рекомбинации на стенках камеры, определяющих стационарные концентрации частиц в газовой фазе. К сожалению, в автореферате отсутствует информация об источнике как самого набора процессов, так и их химических характеристик: сечений, констант, скоростей, вероятностей и т. д. Очень уместными были бы доказательства адекватности использованной кинетической схемы, иллюстрирующие согласие расчётных концентраций частиц с результатами независимых измерений.
   2. Входные параметры модуля генерации частиц обозначены как параметры плазмы. Из текста автореферата непонятно, что это за параметры, каким методом получены, какова их погрешность и каково влияние этой погрешности на выходные параметры моделей.
   3. Схема гетерогенных процессов на стр. 8 не учитывает адсорбцию частиц вида SFₓ (x=1-5) и процессы рекомбинации с их участием. В то же время, такие процессы наверняка учитывались для стенок камеры в модуле генерации частиц при расчете состава плазмы. Такое упрощение в модели травления требует пояснений.

Отмечается, что сделанные замечания не снижают высокой оценки представленных результатов и общего положительного впечатления от работы.

1. От Резванова А.А., начальника лаборатории АСО АО НИИМЭ, кандидата физ.-мат. наук — отзыв положительный. В отзыве присутствуют следующие замечания:
   1. При описании модуля генерации частиц не указано расстояние, которое учитывается в модели, на котором происходит генерация радикалов.
   2. В формуле 4 проведен полином 6-го порядка с определенными коэффициентами, однако нет описания, откуда данные коэффициенты были взяты.
   3. При описании экспериментальных результатов по исследованию зависимости скорости травления от аспектного отношения не приведено объяснение различия профилей скорости травления от глубины для канавок и отверстий одинаковых размеров.

Указано, что сделанные замечания не снижает ценность работы.

1. От Шварц Н.Л., старшего научного сотрудника Группы моделирования электронных и технологических процессов микроэлектроники Института физики полупроводников имени Ржанова — отзыв положительный. В отзыве присутствуют следующие вопросы:
   1. Какой температурный диапазон моделирования? Зависит ли в Монте-Карло модели скорость взаимодействия частиц от температуры?
   2. Как зависит результат моделирования от размера ячейки и расстояния между источником ионов, радикалов и подложкой?
   3. Насколько допустимо рассматривать развитие ячейки независимо от окружения и профиля ямы травления?

Указано, что данные проблемы не являются принципиальными и не искажают общего положительного впечатления об исследовании, а рецензируемая работа выполнена на высоком научном уровне.

Диссертационный совет отмечает, что в результате выполненных соискателем исследований:

1. Разработана новая, использующая описание поверхностной кинетики с учетом отложенной десорбции продуктов реакции, трехмерная математическая модель формирования в кремнии глубоких высокоаспектных структур в процессе плазменного криогенного травления. Показано, что стохастическая реализация поверхностной кинетики находится в согласии с исходными кинетическими уравнениями, а результаты моделирования корректны в широком диапазоне параметров. Продемонстрирована применимость эмпирического подхода к определению параметров кинетики поверхностных реакций при построении моделей плазменного травления на основе метода кинетического Монте-Карло.

2. Создан реализующий математическую модель программный комплекс NGCES (New generic cryogenic etching simulator). Комплекс предоставляет широкие возможности для проведения численных экспериментов как в интерактивном, так и в пакетном режиме, а также анализа их результатов. Высокая значимость обусловлена возможностью моделирования реалистичных структур и процессов травления, что позволяет заменить дорогостоящие реальные эксперименты.

3. Экспериментально исследовано травления кремния в плазме SF6 в широком диапазоне температур от -120 до 20 °С, и диапазоне концентраций радикалов фтора от 6.4·1013 до 3.15·1014 см-3, актуальном для практических приложений. Уточнены значения кинетических параметров поверхностных реакций, имеющих важное значение для построения математических моделей травления.

4. Теоретически изучен вопрос переноса частиц плазмы в процессе формировании различных высокоаспектных микроструктур. Установлено, что для тренчей, отверстий различной формы, а также канавок переменной кривизны и других топологий маски, представляющих практический интерес, основным механизмом, определяющим вертикальную скорость травления в таких структурах, является перенос радикалов фтора внутри формируемой микроструктуры. Сопоставление с экспериментальными данными подтвердило этот вывод.

5. С помощью построенной модели впервые было исследовано формирование различных дефектов профиля глубоких канавок, характерных для процесса криогенного травления кремния в плазме SF6/O2: каверн и шероховатости поверхности, асимметрии и расщепления канавок, образования «нанотравы». Показано, что механизмы их возникновения имеют стохастических характер и связаны с локальной недо- и перепассивацией поверхности. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации процессов формирования глубоких микроструктур в кремнии методом криогенного травления в плазме SF6/O2.

Научная ценность полученных результатов обусловлена получением новых научных знаний, представляющих интерес для фундаментальных и прикладных исследований. В работе впервые:

1. Разработана трехмерная математическая модель формирования в кремнии глубоких высокоаспектных структур в процессе плазменного криогенного травления, использующая описание поверхностной кинетики с учетом отложенной десорбции продуктов реакции.

2. Проведено экспериментальное исследование травления кремния в плазме SF6 в широком диапазоне температур и концентраций радикалов фтора, актуальном для практических приложений, и определены соответствующие параметры поверхностной кинетики.

3. Теоретически исследован вопрос переноса частиц плазмы в процессе формировании различных высокоаспектных микроструктур. Показано, что в исследованном диапазоне параметров процесса криогенного травления, для топологий маски, представляющих практический интерес, основным механизмом, определяющим вертикальную скорость травления, является перенос радикалов фтора внутри формируемой микроструктуры.

4. С помощью построенной модели дано объяснение механизмам возникновения различных дефектов профиля глубоких канавок, характерных для процесса криогенного травления кремния в плазме SF6/O2.

Практическая ценность работы состоит в том, что созданный программный комплекс для моделирования плазменного криогенного травления высокоаспектных трехмерный субмикронных структур различной топологии имеет большое практическое значение. Проведенные с его помощью численные эксперименты позволяют заменить дорогостоящие реальные эксперименты. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых криогенных плазменных процессов травления в микроэлектронике.

Полученные результаты признаются достоверными, так как в диссертационной работе применяются фундаментальные физические теории, используются современные методы исследования, данные верифицируются независимыми методами. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Личный вклад автора заключается в разработке математических моделей, их программной реализации, планировании экспериментов (в том числе численных) и анализе их результатов.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

В ходе защиты соискатель М.К. Руденко дал аргументированные ответы на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 16.11.2023 диссертационный совет принял решение присудить Руденко Михаилу Константиновичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени - 17, против присуждения учёной степени - 0, недействительных бюллетеней нет.

Зам. председателя

диссертационного совета А.Н. Юрасов

Ученый секретарь

диссертационного совета Л.Ю. Фетисов

16.11.2023