

«УТВЕРЖДАЮ»

Национального исследовательского тех



М.Р. Филонов

«12» октября 2022 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертационную работу Дворецкой Лилии Николаевны «Теоретическое и экспериментальное исследование микросферной фотолитографии на подложках кремния для селективной эпитаксии полупроводниковых структур», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность диссертационной работы

Тема диссертации полностью соответствует направлению из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, касающегося перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

Развитие современной микроэлектроники и информационных технологий идёт в различными путями совмещения технологий разных полупроводников, в том числе при интеграции полупроводниковых соединений III-V группы и кремния, позволяющей объединить возможности кремниевой интегральной технологии и оптоэлектронных приборов на базе гетероструктур соединений III-V группы. В связи с этим особый интерес вызывают методы селективной эпитаксии с использованием ростовой текстурированной маски (например, слоя SiO_x на поверхности Si пластин) с упорядоченным массивов отверстий субмикронного диаметра для синтеза массивов ННК с заданной поверхностной морфологией.

При создании оптоэлектронных приборов на основе упорядоченных массивов микро и низкоразмерных структурных единиц, помимо проекционной и электронной литографии, альтернативным методом, обеспечивающим формирование подобных структур, является фотолитография по микросферическим линзам. Метод микросферной фотолитографии позволяет воспроизводимо формировать гексагональные массивы наноструктур на подложках большой площади. При этом размеры наноструктур определяются длиной волны источника экспонирования (например, в области ультрафиолета (УФ) или глубокого УФ (ГУФ)) и могут быть менее 100 нм, что является достаточным для многих оптоэлектронных приложений, в том числе для создания текстурированных подложек для селективной эпитаксии. Получение приборных структур с низкоразмерными фотопоглощающими материалами существенно расширяет функционал устройств и позволяет совмещать преимущества различных полупроводниковых технологий.

Все это, по нашему мнению, определяет **актуальность** диссертационной работы Дворецкой Лилии Николаевны, посвященной разработке и расчету процессов микросферной литографии для полупроводниковых структур.

Новизна исследования и полученных результатов

Новизна исследований заключается в том, что впервые проведено комплексное теоретическое описание и исследование процесса микросферной фотолитографии через массив SiO_2 микросферических линз, позволяющих получить геометрически сложные приборные структуры с ННК и контролируемым упорядочиванием. В ходе исследования были получены следующие новые результаты:

- Впервые разработана модель для численного анализа процесса микросферной фотолитографии с учетом нелинейных особенностей фоторезиста, таких как обесцвечивание красителя резиста и диффузия активированных химических связей резиста при последующей термической обработке.
- Впервые показано, что использование неионогенного поверхностно-активного вещества неонол в концентрации 1:300 на поверхности резиста при нанесении водного коллоидного раствора кварцевых микросфер позволило увеличить адгезию и сформировать на поверхности резиста гексагональный массив микросфер без негативного влияния на дальнейший процесс фотолитографии.
- На основании разработанной модели впервые определена зависимость диаметра сфокусированного пятна под микросферой от толщины фоторезиста (в диапазоне от 100 до 500 нм) и дозы экспонирования.
- Используя источник излучения N_2 плазмы, впервые достигнуто разрешение экспонированного пятна 110 нм (± 5 нм) в слое метакрилатного резиста толщиной 170 нм (± 20 нм) на Si.
- Используя метод микросферной фотолитографии, плазмохимического и жидкостного травления и молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), были синтезированы гексагонально-упорядоченные массивы наноструктур GaP, GaN, GaN/InGaN, InAs на поверхности $\text{SiO}_x/\text{Si}(111)$ с контролируемой поверхностной плотностью и морфологией.

Значимость научных и практических результатов диссертации

Диссертационная работа Л.Н. Дворецкой имеет существенную практическую значимость, реализованную в методиках получения гетероструктур, технологических методов получения и апробации в приборах:

1. Выявлены пределы применимости микросфер для применения их в процессе фотолитографии при длине волны экспонирования 365 нм.
2. Разработана модель процесса микросферной фотолитографии с учетом интерференции от кремниевой подложки волн и нелинейных особенностей фоторезиста.
3. Определена зависимость диаметра сфокусированного пятна под микросферой от толщины слоя фоторезиста (в диапазоне от 100 до 500 нм) для создания наноструктур с заданной формой.

4. Реализован технологический процесс формирования монослойного упорядоченного массива микросфер на поверхности фоторезиста за счет применения неионогенного поверхностно-активного вещества (ПАВ) неонол, что позволило увеличить адгезию микросфер к гидрофобной поверхности резиста.

5. Разработанные технологические подходы успешно апробированы в приборных структурах: продемонстрированы светоизлучающие диоды на основе ННК системы материалов GaN/InGaN, синтезированные на текстурированных подложках SiO_x/Si(111); получены ННК InAs фотодиодные структуры.

Оформление диссертации, публикации и апробация работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 107 с., 33 рисунка, 1 таблица и списка литературы из 84 наименований. По теме диссертации опубликованы в 9 научных работах в изданиях, индексируемых Web of Science или Scopus и соответствующих требованиям ВАК.

Результаты работы докладывались на международных конференциях и симпозиумах:

- 3rd/4th/5th/6th International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2017/2018/2019", март-апрель 2017-2019 гг. Санкт-Петербург, Россия.
- 26 International symposium "Nanostructures: Physics and Technology", июнь 2018г., Минск, Белоруссия.
- XIV Российская конференция по физике полупроводников ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, сентябрь 2019 г., Новосибирск, Россия.
- 19 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, ноябрь 2017-2018 гг., Санкт-Петербург, Россия.
- Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники, ФОТОНИКА 2021, ИФП СО РАН им. А.В.Ржанова, октябрь 2021 г., Новосибирск, Россия.

Публикации в авторитетных изданиях и выступления на международных конференциях свидетельствуют о том, что полученные автором диссертации результаты соответствуют уровню современной науки.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для ознакомления и использования специалистами в области тонкопленочных оптоэлектроники ведущих научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий: Российский центр гибкой электроники, ООО «ЛЕДИНГРАД», Центральный научно-исследовательский институт (ЦНИИ) «Циклон», Холдинг «Росэлектроника», Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН, Национальный исследовательский университет ИТМО, Институт синтетических полимерных материалов имени Н.С. Ениколопова РАН и Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова.

Помимо этого, полученные результаты и разработанные методы следует рекомендовать для использования в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области электроники и технологии фотодиодных структур.

Замечания по диссертационной работе

1. Во Введении автором указывается, что «для приборных приложений (например для светоизлучающих диодов или солнечных элементов) особенно востребованы упорядоченные массивы ННК». В связи с этим необходимо было отметить, какие транспортные или оптоэлектронные свойства ННК выделяет их в сравнении с пластинами и тонкими пленками полупроводников.
2. Во второй главе «Теоретическое и экспериментальное исследование процесса фотолитографии по микросферическим линзам на подложках кремния» представлены результаты по численному расчёту. Представлены зависимости диаметра пучка от диаметра микросферы при экспонировании. В должной мере не было объяснено наличие минимума диаметра пучка при увеличении диаметра сферы от 10^{-1} до 10^0 мкм.
3. В третьей главе представлены экспериментальные результаты по фотолитографии с применением метакрилатных фоторезистов. Преимущества применения данного типа материалов в должной мере не объяснены.
4. В главе 4 «Создание ростовой маски для селективного синтеза наноструктур материалов III-V группы» представлены результаты измерений ВАХ для полученных фотодиодов. Представленные результаты демонстрируют высокие значения темнового тока утечки в диапазоне микроампер. Соискателем не были представлены исчерпывающие объяснения потери шунтирующих свойств, что требует уточнения.
5. Важным приборным параметром фотодиодов является спектральная чувствительность, воспроизводимость ВАХ при циклических измерениях. Исследование приборных характеристик полученных фотодиодов с ННК АЗВ5 требует более подробного анализа или комментариев по работоспособности примененных подходов.

Сделанные замечания носят частный характер и не ставят под сомнения основные результаты и выводы диссертации, не снижают научной и практической значимости диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Дворецкой Л.Н. является завершённой научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком научном и техническом уровне. Результаты и выводы диссертации являются достоверными и научно-обоснованными. Автореферат и публикации полно и правильно отражают содержание диссертации и её основные положения и выводы.

По своей актуальности, научной новизне, практической значимости, достоверности, а также объёму выполненных исследований и личному вкладу соискателя диссертационная работа Дворецкой Л.Н. «Теоретическое и экспериментальное исследование микросферной фотолитографии на подложках кремния для селективной эпитаксии полупроводниковых структур» полностью отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациями в соответствии с пп.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»,

утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Дворецкая Лилия Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв, составленный на основании ознакомления с текстом диссертации, автореферата с публикациями и доклада Л.Н. Дворецкой, обсужден и одобрен на заседании расширенного научного семинара кафедры Полупроводниковой электроники и физики полупроводников (ППЭиФПП) НИТУ МИСиС 11 октября 2022 г., протокол №2-2022/2023.




Диденко Сергей Иванович

Саранин Данила Сергеевич

Подписи руки С.И. Диденко и Д.С. Саранина заверяю

Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр., д. 4, стр. 1.

8 (495) 638-46-78

kancela@misis.ru

<https://misis.ru/>

Исп.: Диденко Сергей Иванович
Зав. каф. ППЭ и ФПП
+7 916 688 17 32
didenko@misis.ru