

ОТЗЫВ

официального оппонента

~~Иванов Иван Иванович~~ Новикова Алексея Витальевича
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 темы.

Самоформирующиеся полупроводниковые наноструктуры, такие как, квантовые точки и нитевидные нанокристаллы, значительно расширили возможности эпитаксии по получению материалов с уникальными физическими свойствами. Для более широкого практического использования подобных структур необходимо развитие методов их контролируемого пространственного позиционирования. В настоящее время основным подходом при решении этой задачи является предварительная пространственная модификация поверхности подложки (ее текстурирование) с использованием различных литографических методик. В лабораторных условиях наиболее широко используемой для этого является электронная литография, которая позволяет создавать на поверхности подложки субмикронный рельеф. Однако существенным недостатком электронной литографии является ее низкая производительность, что значительно ограничивает площадь текстурирования подложки. Поэтому продолжается активный поиск подходов, которые позволяли бы за малое время текстурировать большие поверхности подложек. В связи с этим тема диссертационной работы Л.Н. Дворецкой, которая посвящена теоретическому и экспериментальному рассмотрению возможности использования микросферной фотолитографии для текстурирования окисленной поверхности кремниевых подложек и селективной эпитаксии на них нитевидных нанокристаллов семейства АЗВ5 без сомнения является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 107 страниц, включая 1 таблицу и 33 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 84 ссылки.

Во введении описана актуальность темы исследования, цель и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности и апробация результатов. В введении представлены положения, выносимые на защиту, а также описан личный вклад автора и указано общее число публикаций по теме диссертации.

В **первой главе** диссертации приведен обзор литературы по эпитаксиальному росту нитевидных нанокристаллов и подходов к их пространственному упорядочению, основным из которых является предварительное текстурирование поверхности подложки. В первой главе также приведен обзор литографических методов и степени их применимости для текстурирования поверхности подложек. Особое внимание в этой части обзора уделено микросферной литографии.

Вторая глава посвящена численным расчетам, направленным на поиск оптимальных условий экспонирования для создания субмикронного разрешения с помощью микросферной литографии. В первой части этой главы в рамках теории рассеяния Ми с использованием программного пакета Scattlay для широкого диапазона размера кварцевых микросфер (диаметр от 10 нм до 200 мкм) проведено моделирование фокусировки падающей плоской волны одиночной сферой в вакууме. Оптимизируемыми параметрами в расчетах являлись контраст рисунка в резисте, размер сфокусированного пучка и его пространственное положение относительно центра микросферы. Выполненные расчеты позволили определить диапазон диаметров микросфер, которые оптимальны для решения поставленных в диссертации задач.

Во второй части **второй главы** моделируется более сложная, приближенная к реальной, система, состоящая из слоя микросфер, упорядоченных в гексагональную решетку на слое фоторезиста, нанесенном на кремниевую пластину. Добавление в расчеты подложки делает необходимым учет отраженных от нее световых потоков и учет интерференционных эффектов. В этой части диссертации расчёты выполнены с помощью программного пакета Comsol Multiphysics. В диссертации развит алгоритм учета в расчетах нелинейных фотохимических особенностей фоторезиста, таких как его обесцвечивание и диффузия активированных химических связей резиста при термической обработке. Полагается, что это повысило точность определения в расчетах границы проявляемых областей в резисте. Расчеты выполнены для двух диаметров микросфер и двух длин волн экспонирования. Варьируемыми параметрами являлись толщина резиста и доза экспонирования. Представленные в этой части диссертации расчеты определяют диапазон основных технологических параметров процесса микросферной литографии, которые позволяют создать рисунок в фоторезисте нужного пространственного размера.

В **третьей главе** приведены экспериментальные результаты по отработке микросферной литографии для получения в фоторезисте рисунка субмикронного размера. Основные результаты получены при использовании для экспонирования излучения светодиода ультрафиолетового диапазона (длина волны 325 нм). В диссертации за счет нанесения на фоторезист слоя неионогенного поверхностно-активного вещества неонол АФ 9-12 и подбора времени и скорости центрифугирования решена задача формирования на поверхности

фоторезиста плотноупакованного массива кварцевых микросфер. Продемонстрирован бездефектный гексагональный массив микросфер площадью до 1500 мкм².

Экспериментальные результаты **третьей главы** демонстрируют хорошее качественное и количественное соответствие между экспериментальными и рассчитанными зависимостями как диаметра экспонированной области от дозы экспонирования, так и усиления от диаметра микросфер. Показано, что при экспонировании излучением с длиной волны 325 нм гексагонального массива кварцевых микросфер диаметром 1,5 мкм, лежащем на кремниевой пластине со слоем фоторезиста толщиной ~340 нм, возможно воспроизводимо формировать в фоторезисте структуры в форме отверстий диаметром от 350 до 600 нм. Показано, что для микросфер диаметром 0,6 мкм диапазон размеров формируемых структур из резиста заметно уже, из-за появления боковых максимумов, возникающих из-за переотражения сфокусированной и отраженной от подложки волн.

Во второй части **третьей главы** представлены результаты по уменьшению размера формируемого рисунка за счет уменьшения длины волны излучения. Для этого при экспонировании использовалось излучение импульсного KrF лазера ($\lambda=248$ нм) и излучение азотной плазмы. С помощью излучения KrF лазера в слое резиста на основе полиметилметакрилата (PMMA) на поверхности кремниевой пластины были сформированы упорядоченные массивы отверстий диаметром до 200 нм. Использование же излучения азотной плазмы позволило уменьшить диаметр отверстий почти вдвое, до 110 нм. При этом диаметр используемых кварцевых микросфер составлял 1,5 мкм, что более чем на порядок больше размера формируемого рисунка.

Четвёртая глава посвящена экспериментальной демонстрации возможности использования микросферной литографии для формирования на окисленной поверхности кремния упорядоченных массивов нитевидных нанокристаллов на основе материалов AlN и создания макетов приборов на их основе. Для формирования окисла на поверхности Si(111) использовалось как термическое окисление, так и плазмохимическое осаждение. В диссертации подробно описана процедура формирования рисунка в окисле SiO₂ после проведения микросферной литографии. Для селективного зарождения нитевидных нанокристаллов GaP в окнах окисла показано преимущество термического окисла по сравнению с окислом, полученным методом плазмохимического осаждения. Влияния метода получения окисла на рост нанокристаллов связывается с нестехиометричностью окисла SiO₂ при его осаждении из газовой фазы, что сказывается на размере формируемых в нем окон для эпитаксии. Для системы GaP/SiO_x/Si(111) в диссертации продемонстрирована возможность получения однородного массива наноколонн на большой площади.

Большая часть **четвертной главы** посвящена формированию на кремнии упорядоченного массива нитевидных InGaN/GaN нанокристаллов и созданию светодиодов на их основе. В диссертации определены оптимальные условия роста для формирования нитевидных нанокристаллов GaN в окнах окисла кремния. Были получены диодные нитевидные нанокристаллы GaN с включением активной части на основе InGaN. Отработан технологический маршрут формирования контактов к полученным диодным структурам и методика исследования их транспортных и излучательных свойств. Согласно измеренным спектрам фотолюминесценции сделан вывод о возможном распаде вставок InGaN в нитевидных нанокристаллах GaN на области с разным содержанием индия. Измеренные спектры микроэлектролюминесценции продемонстрировали пик в районе 500 - 520 нм, который связывается с сигналом от InGaN/GaN упорядоченных нитевидных нанокристаллов.

В заключительной части четвертой главы представлены результаты по формированию на кремнии упорядоченного массива нитевидных нанокристаллов InAs. Продемонстрировано, что данные нанокристаллы имеют фотоотклик в области длин волн ближнего ИК диапазона.

В заключение приведены основные выводы по диссертации.

Научная новизна и практическая значимость исследований. К результатам, полученным в диссертации Л.Н. Дворецкой, которые обладают наибольшей научной новизной можно отнести:

- разработку модели численного анализа процесса микросферной фотолитографии с учетом нелинейных особенностей фоторезиста;

- использование разработанной модели для определения зависимости диаметра сфокусированного пятна под микросферой от толщины фоторезиста и дозы экспонирования.

В диссертации получены ряд практически значимых результатов, к которым можно отнести:

- демонстрация возможности использования неиногенного поверхностно-активного вещества неонол для формирования на поверхности резиста методом центрифугирования гексагонального массива кварцевых микросфер;

- получение в фоторезисте с помощью микросферной литографии упорядоченного массива отверстий диаметром 110 нм при использовании для экспонирования источника излучения N₂ плазмы;

- развитие технологии формирования на кремнии массивов пространственно упорядоченных кластеров и нитевидных нанокристаллов на основе GaP, GaN, GaN/InGaN, InAs с контролируемой поверхностной плотностью и морфологией.

- демонстрация возможности создания на полученных массивах упорядоченных нитевидных нанокластеров светоизлучающих и фоточувствительных устройств.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечивается корректной постановкой цели и задач исследования, использованием современных экспериментальных и технологических методов. Представленные численные и экспериментальные результаты согласуются с результатами, полученными в других научных группах, не противоречат существующим научным представлениям и прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Основные результаты диссертационной работы, полученные соискателем лично или в соавторстве, опубликованы в 9 статьях, индексируемых Web of Science или Scopus и соответствующих требованиям ВАК.

Замечания по работе.

1. Отсутствие в диссертации списка работ автора по ней и ссылки на эти работы в тексте диссертации значительно затрудняет оценку степени представления результатов диссертации в рецензируемых научных изданиях.
2. В первой главе при обзоре литографических методов не рассмотрен метод интерференционной литографии, который, как и метод микросферной литографии, используется для получения субмикронного рисунка на больших площадях.
3. В четвертой главе диссертации недостаточно прослеживается связь с результатами, полученными во второй и третьей главах. Были ли при проведении микросферной литографии для получения упорядоченных нанокластеров использованы результаты численных расчетов и экспериментальных исследований из второй и третьей глав диссертации?
4. Не понятно, при какой температуре проходил синтез нитевидных нанокристаллов GaN, так как на странице 84 и рисунке 26(г) указано, что при 830⁰С нитевидные нанокристаллы не формируются, а на странице 85 – что именно эта температура использовалась для их получения.
5. В тексте диссертации присутствуют ошибки и опечатки. На странице 21 неверно указано сокращенное название Института физики микроструктур РАН. На странице 30 вместо ссылок на рисунок 4а и 4б указаны ссылки на рисунки 3а и 3б. На странице 68 неверно указано сокращение для КМОП технологии. На странице 83 не указана температура роста для рисунка 26(г). К ошибкам можно отнести и использование термина «термически прокисленный оксидный слой» (стр. 78), так не очень удачный, на мой взгляд, термин «термически прокисленный» можно отнести к слою кремния, но не к слою окисла.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации Л.Н. Дворецкой.

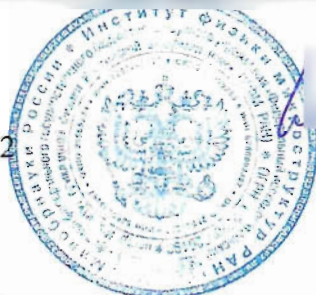
Общее заключение. Диссертация Л.Н. Дворецкой является законченной научно-квалификационной работой и представляет собой исследование, выполненное на высоком научном и технологическом уровне. Содержание и результаты исследований в диссертации изложены четко и понятно. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание, основные результаты, научные положения и выводы. Полученные результаты вносят значительный вклад в развитие формирования на кремнии пространственно упорядоченных нанокластеров и нитевидных нанокристаллов полупроводников семейства АЗВ5 и в создание на их основе устройств оптоэлектроники. По своей теме и содержанию диссертация полностью соответствует специальности 1.3.2. — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Считаю, что диссертация Л.Н. Дворецкой «Теоретическое и экспериментальное исследование микросферной фотолитографии на подложках кремния для селективной эпитаксии полупроводниковых структур» соответствует всем критериям, установленным в пунктах 9, 10, 11, 13 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 года № 842 и предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Диссертант, Дворецкая Лилия Николаевна, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 - приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

Новиков Алексей Витальевич,

«10» октября 2022



А.В.Новиков

Подпись Новикова А.В. заверяю,

Д.М. Гапонова