

ОТЗЫВ

официального оппонента

Целикова Глеба Игоревича

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.

Эпитаксия полупроводников группы АЗВ5 в виде массивов нитевидных нанокристаллов (ННК) на подложках Si, ориентированных ортогонально к ее поверхности, обеспечивает снижение количества дислокаций в синтезируемом материале в сравнении с планарными структурами, а также не требует использования буферных слоев. Одним из перспективных подходов к реализации приборных структур на основе ННК является селективная эпитаксия с использованием ростовой маски из материала, рост на поверхности которой ограничен. Создание ростовой маски большой площади, является достаточно сложной технологической задачей. Для этого обычно используются дорогостоящие методы электронной литографии, при этом время, затрачиваемое на один процесс литографии, пропорционально площади образца, что делает этот метод неприменимым при серийном производстве. В связи с этим, в диссертационной работе Л.Н. Дворецкой теоретически и экспериментально рассматривается метод оптической микросферной фотолитографии, позволяющий формировать плотноупакованные массивы наноструктур большой площади за ограниченное время. При этом также появляется возможность варьирования расстояния между наноструктурами с разрешением достаточным для многих оптоэлектронных приложений. В данной диссертационной работе метод микросферной фотолитографии применён для текстурирования подложек SiOx/Si, для последующей селективной эпитаксии гексагональных массивов наноструктур группы АЗВ5, что подчеркивает актуальность проведенных исследований.

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, четырёх 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 методам упорядоченного эпитаксиального синтеза полупроводниковых структур в виде нитевидных нанокристаллов и подходам к текстурированию ростовой пластины. Также, в первой главе представлен обзор современных методов литографии и описаны возможности применения данных методов для серийного производства упорядоченных массивов полупроводниковых наноструктур. Подробно рассмотрен метод микросферной литографии и применение данного подхода не только для эпитаксии полупроводниковых структур, а также для создания фотонных кристаллов, прозрачных электродов и биосенсоров.

Вторая глава диссертации посвящена численному моделированию процесса микросферной фотолитографии. Данная глава разделена на две части. В первой части главы приведён расчёт фокусировки одиночной сферой падающей плоской волны в вакууме в рамках теории рассеяния Ми. С помощью данного расчета определен диапазон размеров сферических частиц наиболее подходящих для фотолитографии. Обсуждается один из ключевых параметров фотолитографии - контраст и его влияние для сфер с диаметром в диапазоне от 10 до 200 мкм.

Во второй части второй главы с помощью численных расчетов рассматривается система, близкая к экспериментальной, состоящая из гексагонального массива микросфер определённого диаметра (1,5 и 0,6 мкм), расположенного на слое фоторезиста, нанесенном на кремниевую подложку. В соответствии с полученными результатами, учет подложки изменяет положение и форму сфокусированного пучка. В модели учтены нелинейные особенности резиста, такие как его обесцвечивание и диффузия активированных химических связей во время литографии и последующего температурного отжига. При введении в модель кремниевой подложки **возникают** интерференционные максимумы, что обуславливается высоким показателем преломления Si, и отражением падающей волны. Данные дополнения численной модели **позволяют** более точно определить зависимость диаметра сфокусированного пучка от толщины

фоторезиста и дозы экспонирования. Представленные результаты позволяют предсказать технологические параметры процесса микросферной фотолитографии.

В **третьей главе** приведены экспериментальные результаты микросферной фотолитографии на кремнии используя разные длины волн источника излучения. В первой части главы рассмотрено влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) на адгезию микросфер к поверхности резиста. Выявлено, что ПАВ неонол улучшает адгезию сфер без негативного влияния на процесс литографии.

Во второй части **третьей главы** представлены основные результаты по экспонированию микросфер диаметром 1,5 и 0,6 мкм при длине волны источника излучения 365 нм и толщине фоторезиста 340 нм. Показано, что сферы с диаметром 1,5 мкм имеют более широкий диапазон размеров структур из фоторезиста, в отличие от сфер с диаметром 0,6 мкм и продемонстрировано хорошее соответствие численных и экспериментальных данных. Также представлены экспериментальные данные экспонирования сфер диаметром 0,25 и 3 мкм и показано, что сферы с диаметром 0,25 мкм имеют контраст недостаточный для процесса фотолитографии.

В третьей части **третьей главы** представлены результаты экспонирования резиста через микросферы с использованием излучения эксимерного KrF лазера с длиной волны $\lambda=248$ нм и излучением азотной плазмы для уменьшения размера рисунка из резиста. Таким образом при экспонировании резиста ПММА излучением азотной плазмы позволило уменьшить размер отверстий в резисте до 110 нм, при диаметре кварцевых микросфер 1,5 мкм, что на сегодняшний день является минимальным размером элемента на кремнии в данной геометрии эксперимента.

В **четвёртой главе** диссертации продемонстрирована технологическая цепочка подготовки кремниевых пластин к селективному синтезу нанокристаллов III-V группы, а также сам синтез и возможность приборного применения полученных структур. В тексте диссертации подробно описан процесс текстурирования ростовой кремниевой пластины ориентации (111) покрытой оксидом кремния. Текстурирование проводилось методом микросферной фотолитографии с использованием сфер с диаметром 1,5 мкм, травлением в плазме CF_4 и жидкостным травлением в водном растворе КОН.

Во второй части **четвёртой главы** показано, что селективный синтез ННК GaP используя термический оксид имеет преимущество по сравнению с оксидом, полученным методом

плазмохимического осаждения вызванное нестехиометричностью полученного материала маски. Также, продемонстрирован синтез GaP в виде наноколонн на большой площади.

Третья часть **четвертной главы** посвящена упорядоченному синтезу массивов ННК GaN и системы материалов GaN/InGaN/GaN на подложках SiOx/Si и созданию светодиодов на их основе. В диссертации определена оптимальная температура синтеза ННК GaN на текстурированных подложках SiOx/Si. Также, были сформированы ННК с активной областью InGaN для возможного приборного применения в качестве светодиодов. В работе продемонстрирован техпроцесс формирования верхнего и нижнего контактов к синтезированным диодным ННК, измерены оптические и вольт-амперные характеристики структур, а также спектр электролюминесценции. Полученные от ННК InGaN/GaN спектры электролюминесценции продемонстрировали свечение в районе 500 - 520 нм.

В четвёртой части **четвертой главы** представлены результаты синтеза гексагонального массива ННК InAs на подложках SiOx/Si. Методом постростовых технологий, были сформированы контакты к ННК InAs и продемонстрирован фотоотклик в области длин волн ближнего ИК диапазона.

В заключительной части диссертации приведены основные выводы по теоретической и экспериментальной частям работы.

Научная новизна и практическая значимость исследований.

Все научные результаты, полученные Л.Н. Дворецкой обладают значимой научной новизной. При этом, среди основных результатов работы, можно выделить следующие наиболее существенные:

1. Численно определена область размеров сфер для применения их в процессе фотолитографии.

2. Продемонстрирована численная модель процесса микросферной фотолитографии, учитывающая нелинейные особенности резиста и позволяющая определить зависимости диаметра сфокусированного микросферой пучка от толщины фоторезиста и дозы экспонирования.

3. Продемонстрирована возможность использования неионогенного поверхностно-активного вещества неонол для увеличения адгезии кварцевых сфер к оптическому что позволяет достигать формирования плотноупакованных массивов микросфер на поверхности резиста;

4. С помощью микросферной фотолитографии в резисте на кремнии достигнут размер отверстий в фоторезисте диаметром 110 нм при экспонировании источником излучения азотной плазмы;

5. Развита и продемонстрирована технология подготовки подложек для селективной эпитаксии полупроводниковых структур группы А3В5 в виде нанокристаллов и продемонстрирована возможность приборного применения синтезированных гексагональных массивов нитевидных нанокристаллов InAs и GaN/InGaN на подложках SiO_x/Si в качестве фото- и светодиодных устройств.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью полученных результатов и согласуются с данными других исследователей, представленными в научной литературе, и не противоречат известным физическим принципам. Результаты работы апробированы на различных международных и всероссийских конференциях, а также опубликованы в 9 научных статьях в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, соответствующих требованиям ВАК.

Замечания по работе.

1. В первой главе не рассмотрен подход к синтезу планарных полупроводниковых слоёв методом сращивания отдельных наноструктур, используя отверстия в ростовой подложке.
2. В третьей главе в разделе 3.2 не обсуждается, что может произойти с резистом при высокой дозе экспонирования для сфер с диаметром 1,5 мкм. Будет ли рисунок фотомаски также разрушаться, как это было показано для высоких доз для сфер с диаметром 0,6 мкм?
3. В третьей главе диссертации не рассмотрено влияние нарушения порядка сборки микросфер на процесс литографии. А также, не обсуждается вопрос, повлияет ли образование отдельных доменов из отверстий в ростовой маске на нуклеацию полупроводниковых структур?
4. В четвёртой главе, на рисунке 31 не понятно, с чем связан уширенная линия электролюминесценции для структуры на основе НК InGaN?
5. Также, в тексте имеются незначительные опечатки. Например, на странице 30 вместо ссылок на рисунок 5а и 5б указаны ссылки на рисунки 3а и 3б и на 68 стр. неверно написано сокращение КМОП технологии.

Тем не менее, перечисленные замечания не оказывают влияния на общую высокую оценку представленных результатов диссертационной работы Л.Н. Дворецкой.

Общее заключение. Диссертация Л.Н. Дворецкой является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на высоком уровне развиты как расчётные, так и экспериментальные методы исследования. Полученные научные результаты являются оригинальными и обоснованными, что подтверждается публикациями автора в высокорейтинговых научных изданиях. Автореферат адекватно и полно отражает содержание диссертации. Публикации соискателя соответствуют содержанию диссертации и отражают научные результаты работы. Тематика выполненных Л.Н. Дворецкой исследований полностью соответствует специальности 1.3.2. — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Таким образом, диссертация Л.Н. Дворецкой «Теоретическое и экспериментальное исследование микросферной фотолитографии на подложках кремния для селективной эпитаксии полупроводниковых структур» по форме и содержанию соответствует критериям, установленным в пунктах 9, 10 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а автор Дворецкая Лилия Николаевна, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 - приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

[Redacted signature area]

«10» октября 2022

_____ / Целиков Г.И. /



ПОДПИСЬ РУКИ
ЦЕЛИКОВА Г.И.
МИНИСТРАТОР КАНЦЕЛЯРИИ
МИНИСТРАТИВНОГО ОТДЕЛА
РОС
6