

«Утверждаю»

Генеральный директор  
ЗАО «Элма-Малахит»



кандидат технических наук

А.А.Арендаренко

марта 2014 г.

### **ОТЗЫВ ведущей организации**

на диссертационную работу Рожавской Марии Михайловны  
«Синтез III-N микро- и наноструктур методом МОГФЭ на  
подложках сапфира и кремния», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников»

Дальнейший прогресс в современной электронике во многом связан с использованием структур полупроводниковых нитридных соединений как исходного материала для изготовления самых разнообразных приборов и устройств: светодиодов и лазеров в широком спектральном диапазоне, приборов СВЧ техники (с рабочими частотами до 150 ГГц и выше), элементной базы силовой электроники, акустоэлектронных устройств различного назначения.

При этом одной из существенных проблем в технологии получения таких структур является оптимальный выбор подложек для эпитаксиального роста, поскольку существующий уровень технологии синтеза монокристаллического нитрида галлия еще очень далек от необходимого для получения «родных» нитридных подложек, доступных для использования.



Наиболее распространенными подложками для синтеза III-N структур в настоящее время являются сапфировые подложки и подложки из карбида кремния. Однако, в последнее десятилетие все больший интерес в мире вызывает использование нитридных гетероструктур, выращенных на подложках кремния, для всех областей нитридной электроники. При этом параметры получаемых приборов уже приближаются к характеристикам изделий, изготовленных с использованием гетероструктур на более «привычных» подложках сапфира и карбида кремния, а такие преимущества кремниевых подложек как относительно низкая стоимость, доступность подложек большого диаметра делают их использование привлекательным и с экономической точки зрения.

Технологические трудности при эпитаксии нитридных гетероструктур на подложках кремния связаны с тем, что нитрид галлия и кремний имеют значительные различия в величинах параметра решетки и коэффициентов термического расширения. Это приводит к формированию в эпитаксиальной структуре и на стадии роста, и при последующем охлаждении до комнатной температуры сильных растягивающих напряжений, обуславливающих значительный прогиб гетероструктур и даже растрескивание эпитаксиальных слоев.

Для преодоления этой проблемы используются различные технологические приемы, связанные, по сути, с эмпирическим выбором конструкции переходной области и режимов выращивания элементов структуры. Существующие на сегодня технологии роста нитридных структур на кремниевых подложках чрезвычайно сложны и к тому же, в большинстве своем, запатентованы.

Поэтому **актуальность** представленной к защите работы, в которой исследован перспективный метод синтеза нитридных гетероструктур на подложках кремния с нанослоем карбида кремния, а также сделана попытка использования структур трехмерной геометрии для формирования подобных структур, **не вызывает сомнений.**



Автором проведено широкое экспериментальное исследование условий синтеза таких структур, включающее как методы селективной эпитаксии, так и рост нитевидных нанокристаллов. Подробно изучены вопросы влияния условий в реакторе на огранку кристаллитов, сформированных с использованием частичного маскирования поверхности подложки диэлектриком. На основе синтезированных образцов в трехмерной геометрии продемонстрированы светодиодные структуры. В главе, посвященной синтезу нитевидных нанокристаллов (ННК), использован как стандартный рост по механизму пар-жидкость-кристалл, так и обнаруженный автором новый и чрезвычайно интересный подход к синтезу ННК, заключающийся в использовании пленок титана. Такой способ позволил автору получить массив ННК высокого качества, обладающих к тому же правильной гексагональной формой и вертикально ориентированных.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что автором сделан существенный задел в развитии принципиально новых подходов к эпитаксиальному синтезу III-N материалов. При этом автор в работе не ограничился исследованием особенностей роста нитридов III группы и их твердых растворов, но также, основываясь на результатах проведенного исследования, продемонстрировал образцы приборных структур. Автором успешно развита технология синтеза эпитаксиальных слоев нитрида галлия высокого качества, а также светодиодных структур на их основе, что определяет **значимость полученных автором диссертации результатов** для развития полупроводниковой электроники и, в частности, для ее наиболее перспективного направления, связанного с использованием гетероструктур нитридных соединений для оптоэлектроники, СВЧ и силовой электроники.

**Научная новизна** проведенных автором исследований заключается в том, что:



- впервые синтезирована светодиодная структура с активной областью на основе квантовых ям InGaN/GaN на подложках кремния (111) с нанослоем карбида кремния;

- предложен новый способ синтеза GaN ННК на подложках сапфира и сапфира с предварительно осажденным слоем нитрида галлия с использованием нанопленки титана толщиной 30-100 нм. С помощью данного метода могут быть синтезированы ННК высокого качества, обладающие правильной гексагональной формой, диаметром 30-2000 нм, ориентированные строго вдоль направления (0001);

- проведенное автором систематическое исследование особенностей процесса селективной эпитаксии охватывает значительно более широкий круг параметров процесса, чем опубликованные в литературе исследования. В частности, определено влияние газовой среды реактора, потока триметилгаллия, ориентации окна в маске на характер роста формирующихся мезоструктур, изучена динамика развития процесса.

**Достоверность** и обоснованность научных положений и выводов подтверждается большим количеством проведенных экспериментов, сопоставлением с опубликованными в литературе данными, а также публикацией большого количества статей по материалам диссертационной работы в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах и выступлениями на конференциях.

По материалам диссертационного исследования опубликовано 17 печатных работ, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах и 8 статей в материалах конференций, которые полностью отражают результаты работы и подтверждают значимость личного вклада автора. Основные результаты диссертации также докладывались на 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия, алюминия — структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 2011 г.), 4-м Международном симпозиуме по росту нитридов третьей группы (Санкт-Петербург, 2011 г.), Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика.



Спб» (Санкт-Петербург, 2013 г.), 16-й международной конференции ISMOVPE-XVI, (Busan, Korea, 2012 г.), 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» (Москва, 2008 г.), 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» (Москва, 2013 г.).

Автореферат диссертации правильно и полностью отражает ее содержание.

Сама диссертационная работа, однако, имеет ряд недостатков:

- в работе не уделено должного внимания описанию методики измерения кривизны поверхности эпитаксиальных структур, а также не проанализирована связь кривизны поверхности с механическими напряжениями в структурах, что помогло бы более полно интерпретировать полученные результаты;

- для прояснения роли титановой пленки в механизме синтеза ННК необходимо было бы провести исследования образцов методом рентгеноструктурного анализа, в работе данные таких измерений не приведены;

- имеются замечания и к оформлению работы.

Однако, отмеченные недостатки не снижают ценность представленной работы, которая, несомненно, заслуживает положительной оценки.

Рассматриваемая диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержатся полученное автором диссертации самостоятельно научно обоснованные технические и технологические решения проблемы синтеза методом МОГФЭ нитридных структур, имеющие существенное значение для развития полупроводниковой электроники, в частности, для ее наиболее перспективного направления, связанного с использованием гетероструктур нитридных соединений для оптоэлектроники, СВЧ и силовой электроники.

Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 01.04.10 «Физика полупроводников».



Результаты работы, содержащие технические и технологические решения проблемы синтеза нитридных структур методом МОГФЭ, рекомендованы к дальнейшему развитию и внедрению на предприятиях, занимающихся получением эпитаксиальных гетероструктур для приборных применений на основе III-N полупроводниковых соединений методом МОС-гидридной эпитаксии: ОАО «НИИ "Полнос» им. М.Ф. Стельмаха (г. Москва), ООО «Сигм-плюс» (г.Москва), ЗАО "Светлана-Оптоэлектроника" (г.Санкт-Петербург), ЗАО "ЭПИ-ЦЕНТР" (г. Санкт-Петербург), ОАО «НПП «Салют» (г. Нижний Новгород), ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина») (г.Снежинск), ЗАО «Элма-Малахит» (г.Москва).

По актуальности темы, новизне и достоверности полученных результатов работа соответствует критериям, предъявляемым к кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным Постановлением Правительства «о порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 года №842, а автор диссертации, Рожавская Мария Михайловна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «физика полупроводников».

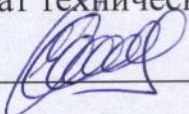
Отзыв заслушан и утвержден на заседании НТС ЗАО «Элма-Малахит» (протокол № 01-14 от 24.02.2014).

Отзыв составил:

Главный научный сотрудник

ЗАО «Элма-Малахит» (адрес: 124460 Москва, Зеленоград, проезд 4922, стр. 3, корп. 4. телефон: +7(495) 530-08-54 )

кандидат технических наук



Свешников Юрий Николаевич.