

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Нечаева Дмитрия Валерьевича

«Плазменно-активированная молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур (Al,Ga)N/*c*-Al₂O₃ для оптоэлектронных приборов среднего ультрафиолетового диапазона ($\lambda < 300$ нм)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников»

Диссертационная работа Нечаева Д.В. посвящена одной из наиболее актуальных тем исследований широкозонных нитридных соединений (Al,Ga)N, предназначенных для изготовления на их основе разнообразных приборов ультрафиолетовой (УФ) оптоэлектроники. Указанные изделия находят все большее применение в различных областях промышленности, медицины и науки. В настоящее время во всем мире на базе этих полупроводниковых материалов активно ведется разработка компактных высокоэффективных и экологически чистых УФ-эмиттеров с варьируемой длиной волны в биологически-активном диапазоне длин волн 240-270нм, которые должны заменить громоздкие ртутьсодержащие УФ-лампы в приборах оптического обеззараживания. Кроме того, широкозонные нитридные соединения AlGaN позволяют создавать различные типы фотодетекторов УФ излучения, в том числе и в солнечно-слепом диапазоне (с длиной волны менее 290нм), которые востребованы для высокочувствительных спектральных анализаторов вредных веществ, реализации не прямой УФ-оптической связи и др. Однако, наряду с уже достигнутыми успехами, прогресс в параметрах этих приборов сдерживается рядом проблем, а именно – высокой плотностью дефектов в активных областях оптоэлектронных приборов, низкой эффективностью *p*-легирования обкладочных слоев и негативными эффектами сильных внутренних поляризационных полей (эффект Штарка) и др.

Диссертационная работа изложена на 118 стр., состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 153 наименований.

Глава 1 служит вводной частью в гетероэпитаксиальный рост методом плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) широкозонных полупроводниковых нитридных соединений (Al,Ga)N на подложках *c*-Al₂O₃. В ней приводятся основные технологические и научные проблемы роста слоев в этой системе материалов, а также иллюстрируются основные типы УФ оптоэлектронных приборов с рекордными на данный момент выходными характеристиками.

Глава 2 посвящена узлам и конструкции технологической установки ПА МПЭ, диагностическим *in situ* методам контроля ростовых процессов. Особое внимание уделено методу дифракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ), являющемуся незаменимым средством качественного и количественного контроля эпитаксиального роста слоев на атомарном уровне. В этой главе соискателем на основе метода ДОБЭ были развиты статистические алгоритмы обработки полученных картин, которые позволили количественно оценивать

изменения a -постоянной решетки растущего слоя в сильно рассогласованных гетероструктурах $(\text{Al,Ga})\text{N}/\text{AlN}/c\text{-Al}_2\text{O}_3$.

В Главе 3 решается задача получения атомарно-гладких слоев AlGaN . Для этого соискателем были проведены исследования закономерностей роста бинарных слоев GaN и AlN и в частности изучались процессы десорбции/адсорбции атомов III-группы в условиях сильного обогащения по металлу. В результате были выведены уравнения баланса ростовых потоков, на основе которых был развит импульсный метод роста – температурно-модулированная эпитаксия. Такой подход позволил получить слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с высоким содержанием Al ($x > 0.4$) и атомарно-гладкой морфологией поверхности со средней шероховатостью ~ 0.4 нм.

В Главе 4 проведено комплексное исследование начальных стадий роста зародышевых слоев $\text{AlN}/c\text{-Al}_2\text{O}_3$ и последующих буферных слоев AlN с целью снижения плотности прорастающих дислокаций в активных областях оптоэлектронных приборов. Было показано, что среди всех методов роста зародышевых слоев AlN наибольшим потенциалом обладает метод эпитаксии с повышенной миграцией адатомов, который формирует наиболее крупнозернистую морфологию поверхности, благодаря которой генерируется наименьшая плотность прорастающих дислокаций. Затем для дальнейшего снижения плотности прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN соискателем впервые была предложена идея введения множественных ультратонких вставок слоев GaN с трехмерной морфологией поверхности, на которых происходит отклонение прорастающих дислокаций от вертикального направления с последующим усилением их взаимодействия между собой либо с дислокациями несоответствия. Результатом развития этого метода стало получение 2 мкм буферного слоя AlN с 6-ю вставками 3D- GaN , в котором плотности винтовых и краевых прорастающих дислокаций были снижены до $1.5 \cdot 10^8$ и $3 \cdot 10^9$ см^{-2} соответственно. Разработанные в Главе 2 алгоритмы обработки картин ДОБЭ совместно с системой многолучевого оптического измерителя напряжений стали основными методами исследований процессов генерации/релаксации напряжений в системе $\text{AlN}/c\text{-Al}_2\text{O}_3$ с множественными вставками GaN . Полученные результаты могут быть использованы для разработки конструкций оптоэлектронных гетероструктур с нулевым радиусом изгиба при комнатной температуре, что критически важно для последующих постростовых фотолитографических процессов.

Глава 5 посвящена изучению и оптимизации геометрии различных фотоприемных и светоизлучающих приборов на основе III-N, а также демонстрации возможностей их создания на базе технологии ПА МПЭ. В этой главе решалась проблема низкого уровня p -легирования слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с высоким содержанием Al ($x > 0.4$) за счет применения метода поляризационного легирования, а также был определен минимальный градиент изменения состава слоев $\text{AlGaN}:\text{Mg}$ для достижения дырочной концентрации $\sim 10^{18}$ см^{-3} . В главе представлены данные по созданию солнечно-слепых фотоэммиттеров с отрицательным электронным сродством. В частности, продемонстрирована

спектральная чувствительность такого прибора до 27 мА/Вт на длине волны 226 нм. Также была продемонстрирована генерация УФ лазерного излучения в диапазоне 258-290 нм с минимальной пороговой плотностью оптического возбуждения 150кВт/см² на длине волны 290 нм.

В ходе выполнения данной диссертационной работы соискателем получен ряд новых научных результатов. Так, в диссертации рассматриваются и предлагаются пути решения важнейших проблем изготовления приборных гетероструктур AlGaN/AlN с помощью технологии ПА МПЭ. В первую очередь, предложены подходы к улучшению структурного совершенства гетероструктур (Al,Ga)N/AlN/c-Al₂O₃ за счет развития новых методов подавления зарождения и фильтрации прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN/c-Al₂O₃. Кроме того, предложены импульсные методы роста, позволяющие получать атомарно-гладкие слои AlGaN и квантоворазмерные гетероструктуры на их основе. На основе полученных в диссертации результатов представлены образцы фотоприемников и эмиттеров среднего УФ-диапазона, характеристики которых демонстрируют значительный потенциал технологии ПА МПЭ для их производства.

К работе имеются следующие замечания:

1. Несмотря на обширный экспериментальный материал, хотелось бы услышать мнение автора относительно случаев, в которых использование сверхтонких слоев GaN с трехмерной морфологией целесообразно с практической точки зрения, а когда можно использовать другие методы снижения плотности прорастающих дислокаций.
2. В работе продемонстрирована эффективность создания слоев AlGaN p-типа проводимости с помощью поляризационного легирования, но не представлен анализ возможного влияния создаваемого градиента содержания Al в таких слоях AlGaN на приборные характеристики.
3. В ряде случаев, приборные характеристики образцов даны в относительных единицах, что затрудняет оценку практической ценности предлагаемых подходов.
4. Не представлено сравнение основных выходных характеристик разработанных приборов на основе гетероструктур, полученных ПА МПЭ, с аналогичными приборами на основе гетероструктур, полученных другими методами, что не позволяет определить место развиваемой технологии среди других эпитаксиальных методов.
5. Не для всех образцов проведены исследования на предмет ожидаемого ресурса работы, что позволило бы оценить перспективы их практического использования.

Сделанные замечания не ставят под сомнение основные результаты и выводы диссертационной работы и не снижают общую положительную оценку работы в целом.

Гетероструктуры AlGaN/AlN/c-сапфир, представленные в диссертационной работе, были выращены соискателем. При его непосредственном участии разрабатывались импульсные методики роста тройных соединений AlGaN, развивались методы фильтрации прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN. Полученные результаты неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. Диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решения ряда научно-технических задач на актуальную тему, имеющих новизну и практическую значимость. Входящие в диссертацию материалы опубликованы в ведущих российских и международных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и WoS. Автореферат корректно отражает основные результаты диссертационной работы, которая полностью соответствует специальности 01.04.10.

Диссертационная работа Нечаева Д.В. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно Положению о присуждении ученых степеней ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а ее автор – Нечаев Дмитрий Валерьевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников».

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, заведующий кафедрой квантовой электроники Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), начальник научно-технического центра Акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Полнос» имени М.Ф. Стельмаха»
Мармалюк Александр Анатольевич

Подпись _____

Адрес: 117342, Москва, ул. Введенского, д.3, корп.1. тел. +7(495)3339245

Подпись Мармалюка Александра Анатольевича удостоверяю

Ученый секретарь
АО «НИИ «Полнос» им. М.Ф. Стельмаха»
к.ф.-м.н

Ю.А. Кротов