

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию 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».

Тематика диссертации Нечаева Д.В. посвящена актуальным исследованиям физических и технологических проблем широкозонных соединений Al_xGa_{1-x}N с уникальной возможностью варьирования ширины запрещенной зоны за счет изменения молярной доли Al, что позволяет изготавливать фотоприемные и светоизлучающие приборы, работающие на заданной длине волны в широком диапазоне среднего и ближнего ультрафиолетового излучения (УФ) (210-365 нм) для многочисленных применений в экологии, медицине, промышленности и науки. Высочайшая термическая, химическая и радиационная стойкость этих соединений делает их незаменимыми для реализации приборов, работающих в экстремальных условиях.

Однако характеристики УФ оптоэлектронных приборов на данный момент не в полной мере отвечают требованиям их массового практического использования. До сих пор не решены проблемы системы материалов III-N, обусловленные высокой плотностью прорастающих дислокаций при росте приборных структур на сильно рассогласованных гетероподложках, низкой эффективностью акцепторного легирования, отсутствием сильной локализации носителей заряда в квантовых ямах и др. В результате, даже в лучших УФ светодиодах квантовая эффективность примерно на порядок ниже аналогичного параметра для светодиодов, работающих в видимом диапазоне длин волн.

В диссертационной работе все исследовавшиеся гетероструктуры AlGaN были изготовлены методом плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ), которая является одним из основных методов формирования нитридных гетероструктур и обладает целым рядом уникальных возможностей проведения и диагностики ростовых процессов. В ходе диссертационной работы последовательно решались ключевые технологические и научные задачи.

Диссертация объемом 118 печатных листов включает в себя введение, 5 глав и заключение. Введение посвящено актуальности темы диссертации, практической и научной значимости полученных результатов. В первой главе приводятся особенности и проблемы гетероэпитаксии нитридных соединений, а также рассматриваются основные направления применения гетероструктур AlGaN для различных типов УФ оптоэлектронных приборов.

Вторая глава посвящена непосредственно технологии ПА МПЭ, а также основным узлам и диагностическим методам технологической установки Compact21T. Особое внимание уделено методу дифракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ), который был использован для количественной оценки изменения a -постоянной решетки во время роста III-N гетероструктур посредством статистической обработки картин ДОБЭ на основе разработанных итерационных алгоритмов. В третьей главе исследуется кинетика роста бинарных и тройных соединений в условиях обогащения поверхности атомами III-группы. Соискателем было предложено использовать показания инфракрасного пирометра для прецизионного контроля металлических кластеров на ростовой поверхности. Это позволило определить энергии активации процессов десорбции атомов III-группы, вывести кинетические уравнения баланса, на основе которых был развит импульсный метод температурно-модулированной эпитаксии для роста толстых слоев AlGaN с атомарно-гладкой морфологией поверхности. Четвертая глава диссертационной работы посвящена исследованию и развитию методов снижения плотностей прорастающих дислокаций на всех этапах гетероэпитаксии. С целью повышения структурного совершенства зародышевых слоев AlN/c-Al₂O₃ был оптимизирован метод эпитаксии с повышенной миграцией адатомов. Дальнейшая фильтрация прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN осуществлялась за счет предложенного соискателем нового метода, заключающегося в введении в буферные слои AlN множественных ультратонких слоев GaN с трехмерной морфологией. На этих вставках прорастающие дислокации отклонялись от вертикального направления своего распространения, что приводило к возрастанию вероятности их взаимодействия, включая процессы слияния, аннигиляции и переориентации. Последняя пятая глава посвящена исследованиям, направленным на разработку и оптимизацию дизайна различных опытных образцов УФ оптоэлектронных приборов, выращенных на низкодефектных буферных слоях AlN/c-Al₂O₃. Для получения высокого уровня p -типа проводимости слоев Al_xGa_{1-x}N:Mg с высоким содержанием Al ($x > 0.5$) был развит метод поляризационного легирования. Вместе с теоретическим моделированием дизайна структур с оптимальным ограничением носителей заряда в квантовых ямах AlGaN это позволило продемонстрировать опытные образцы УФ светодиодов с рабочей длиной волны менее 300 нм. Однако невысокая оптическая мощность УФ светодиодов послужила причиной развития направления УФ-эмиттеров с внешней электронной накачкой, которые продемонстрировали существенное (до 165 мВт в импульсе) увеличение оптической мощности УФ излучения. В главе также рассматриваются гетероструктуры AlGaN с квантовыми ямами, которые с помощью внешней оптической накачки продемонстрировали лазерное (стимулированное) УФ излучение в диапазоне длин волн от 258 до 290 нм. И наконец, в ходе диссертационной работы был оптимизирован дизайн солнечно-слепых фотокатодов с

отрицательным электронным сродством, что привело к созданию опытных образцов таких приборов с максимальной фоточувствительностью 27 мА/Вт на длине волны 226 нм.

Все гетероструктуры (Al,Ga)N/AlN/*c*-Al₂O₃ были выращены непосредственно Нечаевым Д.В. на исследовательской технологической установке ПА МПЭ Compact21Т. Кроме этого им разработаны оригинальные алгоритмы анализа картин ДОБЭ. В ходе разработок гетероструктур III-N соискателем были исследованы начальные стадии роста зародышевых слоев AlN, кинетика роста тройных соединений AlGaN, а также им впервые была предложена идея о введении тонких слоев GaN в буферные слои AlN для фильтрации прорастающих дислокаций.

Диссертация полностью соответствует специальности 01.04.10 – “физика полупроводников. Достоверность полученных результатов в рамках диссертационной работе апробирована в рамках участия в международных и отечественных конференциях по физике полупроводников, включающих в себя направления III-N, а также рядом публикаций в международных и отечественных журналах. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Наиболее важными с точки зрения новизны являются следующие полученные результаты:

1. Исследования кинетики роста слоев (Al,Ga)N позволили развить новые импульсные методики роста ПА МПЭ в сильно металл-обогащенных условиях, что привело к формированию атомарно-гладкой ($rms < 1\text{ нм}$) и бескапельной морфологии поверхности слоев AlGaN.
2. В результате комплексного сравнения нескольких методов роста зародышевых слоев AlN было предложено использовать метод эпитаксии с повышенной миграцией адатомов, который позволил снизить плотности винтовых и краевых прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN до $1.5 \cdot 10^8$ и $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ соответственно.
3. Разработан новый метод фильтрации прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN/*c*-Al₂O₃ за счет введения множественных рассогласованных тонких слоев GaN в буферные слои AlN.
4. С целью получения высокого уровня *p*-проводимости в слоях Al_{*x*}Ga_{1-*x*}N:Mg с высоким содержанием Al ($x > 0.45$) развит метод поляризационного легирования, а также определен минимальный градиент состава ($\nabla x = 0.005 \text{ нм}^{-1}$) для эффективной ионизации примеси Mg.
5. Продемонстрированы опытные образцы УФ оптоэлектронных приборов, наиболее значимыми из которых являются: солнечно-слепой фотокатод с максимумом чувствительности 27 мА/Вт на 226 нм, *p-i-n* фотодиод с чувствительностью 35 мА/Вт на 290 нм и УФ эмиттеры на основе квантовых ям Al_{*x*}Ga_{1-*x*}N/Al_{*y*}Ga_{1-*y*}N, излучающих в

диапазоне 258-290 нм с минимальной пороговой плотностью мощности $\sim 150 \text{ кВт/см}^2$ (290нм).

Несмотря на перечисленные достоинства работы, необходимо отметить следующие небольшие замечания:

1. С учетом того, что метод контроля межрефлексового расстояния по ДОБЭ используется в работе для оценки очень малых изменений этого параметра, следовало бы упомянуть погрешность, связанную с возможным изменением расстояния между рефлексами, вызванным нестабильностью напряжения пушки (влияет на длину волны) или нестабильностью положения луча на подложке (влияет на расстояние до экрана).
2. Возможно, в работе было бы интересно описать особенности изменения во времени картин ДОБЭ при металл-модулированной и температурно-модулированной эпитаксии. Ведь при испарении или встраивании излишков галлия, отражающая способность поверхности по отношению к электронам наверняка меняется, что можно было бы использовать для дополнительной характеристики динамики свойств ростовой поверхности.
3. Не исключено, что работа дополнительно выиграла бы от включения большего количества картин дифракции, полученных на разных этапах эпитаксиального роста. Их можно было бы использовать для наглядной демонстрации изменения степени шероховатости и дефектности поверхности по изменению формы рефлексов.

Заключение по диссертационной работе.

Диссертационная работа Д.В. Нечаева «Плазменно-активированная молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур (Al,Ga)N/c-Al₂O₃ для оптоэлектронных приборов среднего ультрафиолетового диапазона ($\lambda < 300$ нм)» обладает существенным научным и прикладным значением для физики полупроводников системы материалов (Al,Ga)N. Представленные замечания не снижают значимость диссертационной работы, а ее автор – Нечаев Дмитрий Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников».

Официальный оппонент, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории спектроскопии твердого тела Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе,
Сутурин Сергей Михайлович

Подпись _____

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26, тел. +7(812)2972245

Подпись Сутурина С.М. заверяю, ученый секретарь Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, кандидат физико-математических наук
Патров Михаил Иванович

Подпись _____