

ОТЗЫВ на автореферат диссертационной работы Нечаева Дмитрия Валерьевича «Плазменно-активированная молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур  $(\text{Al,Ga})\text{N}/c\text{-Al}_2\text{O}_3$  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.

Развитие полупроводниковой оптоэлектроники на основе соединений AlGaN во многом определяет дальнейший прогресс в применении ультрафиолетового излучения с рабочими длинами волн от 210 до 360 нм. Однако до сих пор все выпускаемые ультрафиолетовые светоизлучающие диоды характеризуются относительно невысокой квантовой эффективностью, которая значительно снижается с уменьшением длины волны  $\lambda < 300$  нм. Основные технологические проблемы в этой области связаны в первую очередь с формированием высокой плотности дефектов в AlGaN гетероструктурах при их росте на экономически доступных, решеточно рассогласованных подложках ( $c\text{-Al}_2\text{O}_3$  или Si(111)), а также со снижением структурного качества гетероструктур AlGaN при увеличении содержания Al и, наконец, со сложностью их легирования примесью р-типа. Поэтому тема диссертационной работы Нечаева Д.В. является актуальной как с точки зрения фундаментальных исследований роста наногетероструктур AlGaN, так и с точки зрения их практического применения.

Диссертационная работа Нечаева Д.В. представляет собой законченное исследование особенностей синтеза соединений  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 < x < 1$ ) на решеточно рассогласованных подложках  $c\text{-Al}_2\text{O}_3$  технологией плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) для ультрафиолетовых (УФ) оптоэлектронных приборов.

Автореферат диссертационной работы Нечаева Д.В. всецело отражает основные научные достижения и результаты проделанной соискателем работы. Им были развиты алгоритмы обработки картин дифракции отраженных быстрых электронов для количественной оценки изменения  $a$ -постоянной решетки во время роста слоев III-N. Существенная работа была проделана Нечаевым Д.В. и в изучении кинетики роста тройных соединений  $(\text{Al,Ga})\text{N}$ . В частности, были экспериментально исследованы процессы адсорбции/десорбции атомов III-группы и теоретически установлены энергии активации для Ga и Al, а также выведены уравнения баланса ростовых потоков, на основе которых была разработана методика температурно-модулированной эпитаксии тройных соединений, использование которой

позволило получить атомарно-гладкую морфологию поверхности ( $\text{rms} \sim 0.4 \text{ нм}$  на  $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ ) без кластеров металла.

Не менее важны исследования соискателя, направленные на развитие методов снижения плотности прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN, во время их роста на подложках c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Проведенные Нечаевым Д.В. исследования свидетельствуют, что на начальных стадиях ПА МПЭ зародышевых слоев AlN наиболее эффективным методом снижения плотности прорастающих дислокаций является эпитаксия с повышенной миграцией адатомов, обеспечивающая формирование крупнозернистой морфологии поверхности. Для дальнейшего снижения плотностей прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN соискателем был предложен и развит метод введения множественных вставок тонких слоев GaN, на которых прорастающие дислокации отклонялись от вертикального направления с последующим усилением их взаимодействия между собой. В результате плотности винтовых и краевых прорастающих дислокаций были снижены до  $1.5 \cdot 10^8$  и  $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  соответственно. На основе развитых в работе эпитаксиальных методов, а также теоретическому анализу и моделированию активных областей приборов были изготовлены и исследованы опытные образцы УФ фотоприёмных и светоизлучающих приборов. Разработка фотокатодов AlGaIn:Mg с отрицательным электронным сродством позволила продемонстрировать фотокатод (на основе AlGaIn) с рекордной максимальной чувствительностью 27 мА/Вт на  $\lambda = 226 \text{ нм}$ . В автореферате кроме фотоприёмных приборов также демонстрируются возможности технологии молекулярно-пучковой эпитаксии в создании различного типа УФ- светоизлучающих приборов: светодиода, гетероструктур с внешней электронной и оптической накачкой для спонтанного и стимулированного излучения соответственно.

Полученные результаты опубликованы в более чем 50 статьях в рецензируемых журналах, а также апробированы в ходе проведения многих российских и международных конференций по физике полупроводников и нитридной тематике в частности.

Считаю, что диссертационная работа Нечаева Д.В. «Плазменно-активированная молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур (Al,Ga)N/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для оптоэлектронных приборов среднего ультрафиолетового диапазона ( $\lambda < 300 \text{ нм}$ )» отвечает всем необходимым требованиям к кандидатским диссертациям, а ее автор, Нечаев Дмитрий Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Ведущий научный сотрудник лаборатории наноэлектроники  
СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, канд. физ.-мат. наук

А. М. Мизеров

Почтовый адрес организации:

федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук»

194021, Санкт-Петербург, улица Хлопина, дом 8, корпус 3, литер А

Телефон: +7 812 448-69-80

email: [andreymizerov@rambler.ru](mailto:andreymizerov@rambler.ru)