

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Зиновьева Романа Александровича  
«Исследование дефектов в GaN светодиодах», представленной на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.10 – Физика полупроводников

### Актуальность темы диссертационного исследования.

Светоизлучающие диоды на основе гетероэпитаксиальных структур нитридов третьей группы находят все большее применение в самых различных областях деятельности. Несмотря на массовое промышленное производство светодиодов, интенсивность научных исследований, направленных на повышение эффективности, мощности и надежности этих приборов, не снижается, поскольку далеко не все фундаментальные вопросы, связанные с реализацией потенциальных возможностей нитридных светодиодов, решены на сегодняшний день. Поэтому диссертационная работа Зиновьева Р.А. "Исследование дефектов в GaN светодиодах", направленная на изучение влияния глубоких уровней на эффективность электролюминесценции современных нитрид галлиевых светодиодов в широком спектральном диапазоне, выявление механизмов деградации таких светодиодов, является, без сомнения, весьма актуальной.

### Значимость результатов диссертации.

В работе представлены результаты комплексного исследования глубоких энергетических уровней, формируемых точечными дефектами в InGaN/GaN гетероструктурах ультрафиолетовых, синих и зеленых светодиодов, в сопоставлении со спектром наблюдаемых уровней в n-GaN, и их влияния на эффективность электролюминесценции (ЭЛ) светодиодов. При этом получен ряд новых и интересных результатов.

В частности:

- определены значения энергий, сечений захвата, локализаций ловушек в квантовых ямах и в барьерах светодиодов с различным содержанием In и сопоставлены с уровнями в n-GaN;

- установлено, что снижение квантовой эффективности в светодиодах ближнего ультрафиолета в значительной мере связано с увеличением сигнала в спектрах электронных ловушек в квантовых ямах, а увеличение токов утечек – с ростом концентрации дырочных ловушек;

- показано, что введение подслоя из наностолбиков GaN с наночастицами SiO<sub>2</sub> в слой n<sup>+</sup>-GaN увеличивает интенсивность ЭЛ зеленых и синих светодиодов на 15–35%, что коррелирует с уменьшением концентрации обнаруженных электронных (N<sub>i</sub>) и дырочных ловушек (V<sub>Ga</sub>-D) и объясняется снижением плотности дислокаций и упругих напряжений в активной области гетероструктур;

- доказано, что в n-GaN с плотностью дислокаций менее  $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$  диффузионные длины неравновесных носителей заряда определяются не плотностью дислокаций, а присутствием точечных дефектов, создающих глубокие уровни.

Необходимо отметить, что полученные результаты дают возможность производить первичную разбраковку выращенных гетероструктур для светодиодов, прогнозируя вероятность их преждевременной деградации, а также дают технологам определенные ориентиры для оптимизации процессов получения нитридных гетероструктур, что определяет и практическую значимость рассматриваемой работы.

Считаю необходимым высказать и ряд замечаний по работе.

1. Из автореферата следует, что в третьей главе приведены экспериментальные результаты исследований механизмов рекомбинации в n-GaN и в МКЯ структурах. Однако, в дальнейшем тексте приводятся только данные о спектрах глубоких ловушек в исследуемых объектах и их анализ. Как это связано с механизмами рекомбинации?

2. Не ясно, почему автор пришел к выводу о том, что «Выявленным механизмом деградации в УФ-светодиодах является смещение атомов Ga и In с последующим перемещением их к дислокациям...». Судя по приведенным результатам, это можно рассматривать только как предположительный механизм.

Отмеченные недостатки, однако, не снижают положительного впечатления от работы в целом.

Заключения по автореферату диссертации.

Рецензируемая по автореферату диссертация «Исследование дефектов в GaN светодиодах» представляет собой завершенное исследование. Достоверность и обоснованность выводов подтверждаются достаточным количеством экспериментальных данных, полученных с использованием современных методик, их корректной обработкой и интерпретацией. Основные результаты, положения и выводы диссертации изложены в приведенных публикациях и соответствуют ее содержанию.

Исходя из вышесказанного, можно считать, что рассматриваемая диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в «Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а ее автор Зиновьев Роман Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

К.т.н. Свешников Юрий Николаевич,

Главный научный сотрудник

АО «Элма-Малахит»

Адрес: 124460, г. Москва, Зеленоград, проспект  
Георгиевский, д.5, стр.2

e-mail: sveshnikov-elma@yandex.ru

тел.: +7(499)720-83-70

Подпись Ю.Н.Свешникова заверяю:

Генеральный директор АО «Элма-Малахит»

Арендаренко А.А.

2020 г.

