

ОТЗЫВ

на автореферат А. Ф. Цацульникова «Светоизлучающие III-N гетероструктуры с трёхмерной локализацией носителей заряда», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

За 25 лет своего развития нитриды III группы стали базовыми материалами полупроводниковой оптоэлектроники, обеспечив прорыв в промышленном производстве светодиодов видимого (сине-зелёного) спектрального диапазона и белого свечения (на основе конверсии света люминофорами). Несмотря на эту уже достаточно солидную историю изучения и развития технологии этих материалов, многие свойства и особенности нитридных полупроводников всё ещё далеки от окончательного понимания, что не позволяет полностью использовать открываемые ими возможности для создания новых и оптимизации уже разработанных светоизлучающих приборов. Одной из таких особенностей является локализация носителей заряда в нитридных гетероструктурах. Уже в ранних исследованиях было установлено, что именно локализация носителей за счёт флуктуаций состава в InGaN квантовых ямах позволяет получить сравнительно высокий квантовый выход излучательной рекомбинации в нитридных светодиодах, несмотря на очень большие плотности проникающих дислокаций ($\sim 10^8$ - 10^9 см⁻²), характерные для гетероструктур, выращенных на сапфировых подложках (коммерчески доступные подложки, выполненные из нитридных соединений, на сегодняшний день отсутствуют). В последние 3 года появилось понимание того, что локализация носителей влияет не только на безизлучательную рекомбинацию, связанную с дислокациями, но также и на механизмы излучательной и Оже рекомбинации, в конечном счёте и определяющие как максимально достижимый внутренний квантовый выход светодиодов, так и темп его спада при увеличении рабочей плотности тока приборов. В связи с этим, тему диссертационной работы А. Ф. Цацульникова следует считать не только актуальной, но и находящейся на переднем крае исследований в своей области.

Диссертация А. Ф. Цацульникова представляет собой комплексное исследование, включающее в себя: а) разработку методов контроля флуктуаций состава и толщин InGaN квантовых ям, выращиваемых методом МОС-гидридной эпитаксии и служащих активными областями светодиодных гетероструктур, б) развитие оптических и других методов контроля свойств этих квантовых ям, в) использование гетероструктур с контролируемыми флуктуациями состава и толщин InGaN квантовых ям в приборных структурах для улучшения их параметров и характеризацию этих структур, а также г) разработку новых приборов, использующих преимущества InGaN квантовых ям с контролируемыми флуктуациями микроструктуры. Это подчёркивает тесную взаимосвязь научных исследований, проведённых в рамках диссертационной работы, и практического использования их результатов.

Одним из ключевых результатов, полученных А. Ф. Цацульниковым, является разработка метода контроля *in situ* микроструктуры InGaN квантовых ям в процессе МОС-гидридной эпитаксии за счёт намеренного прерывания роста и выдержки ростовой поверхности в азотно-водородной атмосфере, а также выбора нужного давления в реакторе. В рамках этого подхода стало возможным контролируемое получение InGaN квантовых ям как однородных по составу и толщине, так и представляющих собой планарно-упорядоченный массив квантовых точек либо не связанных между собой, либо с частичной

связью. Модификация такого подхода позволила, в том числе, формировать короткопериодные InGaN/GaN сверхрешётки (вплоть до толщин слоёв ~1 нм), являющиеся важным элементом конструкции современных светодиодных структур. Следует отметить, что данный ключевой результат обладает несомненным мировым приоритетом, уже признанным международным научным сообществом.

С использованием контроля микроструктуры InGaN квантовых ям в работе было также теоретически и экспериментально изучено влияние этой микроструктуры на эффективность излучения света из светодиодов, использующих такие квантовые ямы в качестве активной области. Важным результатом этой работы явилось понимание особенностей транспорта электронов и дырок в структурах с активной областью, состоящей из планарно-упорядоченных квантовых точек. Данная работа получила высокий уровень цитируемости в литературе, что является признаком существенного её вклада в технологию и физику синих светодиодов. На основе контроля микроструктуры InGaN квантовых ям были разработаны высокоэффективные гетероструктуры, излучающие в жёлто-зелёном спектральном диапазоне (520-590 нм).

Другим важным результатом диссертационной работы является разработка технологии выращивания высокоэффективных монокристаллических светодиодных структур, излучающих одновременно на нескольких длинах волн. Здесь впервые было продемонстрировано существенное влияние транспорта электронов и дырок внутри активной области, состоящей из нескольких InGaN ям, излучающих на разных длинах волн, на соотношение интенсивностей различных спектральных полос излучения и общий внутренний квантовый выход монокристаллических структур. Выявлены оптимальные последовательности расположения разных квантовых ям внутри гетероструктуры и определены параметры спейсборного слоя, разделяющего ямы, наиболее критичные для получения желаемых спектральных характеристик и одновременно высокого квантового выхода излучения. С использованием монокристаллических светодиодных структур и смеси красного и зелёного люминофоров был предложен путь для получения рекордно высокого индекса цветопередачи белых светодиодов, что весьма важно для ряда специальных применений.

Каждые из вышперечисленных результатов фактически представляет собой отдельные направления исследований, в рамках которых получено и много других промежуточных, но важных результатов. В качестве примера можно привести осаждение специальных стрессоров на начальном этапе роста активной области светодиодной структуры, позволяющих искусственно формировать усиленные флуктуации состава и толщины InGaN квантовой ямы при последующим её выращивании.

В целом диссертационная работа А. Ф. Цацульникова выполнена на высоком научном и технологическом уровне, а её научная новизна и практическая значимость несомненны. Публикации по теме диссертации хорошо известны в международном научном сообществе, а полученные результаты прошли апробацию на многочисленных международных и отечественных конференциях. Считаю, что А. Ф. Цацульников несомненно заслуживает присвоения ему учёной степени доктора физико-математических наук.

Ведущий специалист
ООО «Софт-Импакт», к.ф.-м.

(С. Ю. Карпов)

22 мая 2019 г.

Подпись руки Карпов
Финансовый директор

" 2

ева С.М.