

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе **Усова С.О.** «Гетероструктуры для светодиодов видимого диапазона и транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе квантоворазмерных слоев **InGaN**, **InAlN** и короткопериодных сверхрешеток **InGaN/GaN**», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников

Мировой бум по исследованию и применению нитридов металлов третьей группы, начавшийся в начале 90-х годов прошлого столетия, не утихает до сих пор. Полупроводниковые нитриды привлекают к себе внимание научного и делового мира своими многочисленными все расширяющимися перспективами применения, которые всё в большей степени становятся реальностью. Но, несмотря на то, что синие и белые светодиоды уже выпускаются промышленностью различных стран миллионами штук в год, а синие лазеры и полевые мощные высокочастотные транзисторы находятся на стадии промышленного освоения, многие проблемы технологии нитридов ещё далеки от понимания и своего решения, поскольку предлагаемые различными авторами «оптимальные» режимы зарождения и роста слоёв нитридов характерны для конкретных установок и носят характер рецептов для этих установок, а не закономерностей. Все еще не до конца решена проблема разработки управляемой на уровне роста монослоев технологии создания разнообразных квантоворазмерных гетероструктур. Всё сказанное свидетельствует о несомненной **актуальности** темы диссертации, посвященной разработке, исследованию и использованию технологических приемов, основанных на управлении фазовым распадом в квантоворазмерных слоях **InGaN** и **InAlN**, для создания монолитных белых светодиодов, светодиодов желто-зеленого диапазона, распределенных брэгговских отражателей, сверхрешеток и мощных СВЧ транзисторов.

Знакомство с диссертацией показало, что Усов С.О. хорошо понимает физику исследуемых процессов. прекрасно ориентируется в мировой литературе и владеет информацией по решаемой проблеме, детально анализирует проблему на момент начала исследований и четко формулирует главные трудности ее решения и пути их преодоления.

Работа оставляет общее хорошее впечатление последовательностью и логикой, порой даже излишне подробного, изложения материала исследования. В диссертации чётко изложены методы исследования и техника эксперимента. Всё это свидетельствует об отличной физико-математической и технической

подготовке автора, о глубоком понимании исследуемой проблемы и убеждает в достоверности и надежности полученных результатов и выводов работы.

Считаю, что **основным научным и практическим результатом**, полученным в диссертации, является экспериментальная демонстрация в газотранспортной эпитаксии нитридов из металлоорганических соединений дальнейшего развития идеи использования потоков водорода и периодических прерываний процесса роста в управляемом синтезе разнообразных квантоворазмерных гетероструктур. При этом убедительно показано, что с помощью изменения состава газовой среды в зоне роста можно управлять степенью равновесности процесса эпитаксии, что позволяет сделать процесс роста слоёв и твёрдых растворов нитридов металлов третьей группы контролируемым и управляемым на всех стадиях.

Все остальные результаты работы есть следствия этого фундаментального положения о поведении нитридов в водород-содержащей среде. Перечислю основные из них.

1. Выращены структурно совершенные однородные по индию слои InAlN, что позволило изготовить механически разгруженные транзисторные структуры с повышенной эффективностью, а также распределенные брэгговские отражатели, демонстрирующие во всем видимом диапазоне длин волн коэффициенты отражения, превышающие 99%.

2. Использование в активной области светодиода композитной гетероструктуры InAlN/GaN/InGaN с массивом изолированных островков InGaN, созданных путем стимулирования фазового распада твердого раствора, позволило реализовать излучение в красной области спектра.

3. Применение короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN в светодиодных гетероструктурах позволило увеличить внешний квантовый выход синих и желто-зеленых светодиодов и создать монолитные белые светодиоды с контролируемыми цветовыми характеристиками излучения.

Все перечисленные результаты оригинальны, представляют научную и практическую ценность для физики и технологии полупроводниковых приборов на основе нитридов металлов третьей группы.

По диссертации имеются следующие вопросы и замечания.

1. В диссертации квантовый выход исследованных светодиодов представлен в основном в относительных единицах. Чему он равен в абсолютных единицах?

2. Что сделано в мире в области разработок белых монолитных светодиодов? Какие при этом достигнуты эффективности?

3. К недостаткам стиля изложения материала можно отнести отсутствие выводов по главам.

Указанные недостатки не затрагивают основного содержания диссертации и не изменяют общей положительной оценки работы. Диссертация написана

хорошим русским языком, опечаток мало, хорошо оформлена и проиллюстрирована. Результаты работы достаточно полно отражены в печатных трудах автора и докладывались на конференциях самого высокого уровня. Автореферат соответствует содержанию и выводам диссертации.

Диссертация Усова С.О. является **законченной научно-исследовательской работой**, выполнена на высоком научном уровне, содержит принципиально новые научные и практические результаты о фундаментальных особенностях выращивания слоев InGaN, InAlN и короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN из металлорганических соединений, которые позволяют реализовать управляемый рост слоёв и структур нитридов металлов третьей группы необходимого приборного качества. Результаты работы можно рекомендовать к использованию в учреждениях Академии Наук РФ и на предприятиях электронной промышленности, занимающихся разработкой и производством полупроводниковых приборов.

Работа Усова С.О. соответствует специальности 01.04.10 – физика полупроводников, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация соответствует требованиям П.9 положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (ред. от 21.04.2016).

Официальный оппонент профессор
кафедры физики полупроводников и наноэлектроники
СПбПУ Петра Великого, д.ф.-м.н.

В.Г.Сидоров

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.
р.т. 8(812) 5529671, моб. +7-931-007-8079, sidorov@rphf.spbstu.ru