

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу

Гроина Сергея Вячеславовича «Низкопороговые лазерные гетероструктуры зеленого и желтого спектрального диапазона на основе квантовых точек CdSe/Zn(Cd)Se, выращенные на арсениде галлия методом молекулярно-пучковой эпитаксии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников»

Впечатляющий прогресс в области создания приборов и устройств на основе полупроводниковых гетероструктур, произошедший в последние десятилетия, неразрывно связан с развитием их физики и технологии. С одной стороны, развитые физические модели позволили прогнозировать многие свойства полупроводниковых гетероструктур и определять дизайн приборных структур, который обеспечивал бы достижение необходимых характеристик. С другой стороны, прогресс в технике и технологии эпитаксиального роста открыл широкие возможности по практической реализации этих структур. Именно такой подход, от физической модели и расчета к работающему устройству, использован в диссертации Гроина С.В. для решения задачи создания эффективных, компактных лазерных источников зеленого и желтого спектрального диапазона на основе полупроводниковых гетероструктур. Лазеры, работающие в данных спектральных диапазонах, находят широкое практическое применение в бытовых устройствах, системах навигации и всепогодной связи, а также в медицине, в первую очередь в офтальмологии. К моменту начала работы над диссертацией основными источниками лазерного излучения в рассматриваемых спектральных диапазонах являлись газовые лазеры и твердотельные ИК лазеры, использующие нелинейную среду для генерации второй гармоники. Существенным недостатком таких лазеров являются их значительные габариты, необходимость для части из них использования внешних систем охлаждения, невысокая эффективность и относительно высокая стоимость. Выше сказанное дает основание утверждать, что **актуальность** диссертации Гроина С.В., посвященной решению проблемы создания эффективных, компактных полупроводниковых лазеров зеленого и желтого спектрального диапазона, не вызывает сомнения.

Среди результатов, полученных в работе, можно отметить несколько, на мой взгляд, наиболее интересных.

Впервые для гетероструктур на основе широкозонных соединений A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> развита конструкция волновода с плавным изменением ширины запрещенной зоны на основе

переменно-напряженных  $ZnMgSSe/ZnSe$  и  $ZnSSe/ZnS$  решеток, удовлетворяющая одновременно нескольким, критическим для реализации эффективных лазерных структур, требованиям: заданному профилю изменения ширины запрещенной зоны для лучшего транспорта неравновесных носителей заряда в активную область; повышенному значению фактора оптического ограничения и компенсации упругих напряжений, возникающих в результате существенных рассогласований параметров кристаллических решеток различных соединений A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> как между собой, так и с используемой для роста GaAs подложкой. С точки зрения практической реализации разработанного волновода важным фактором является возможность его формирования методом МПЭ без прерывания роста, то есть без изменения таких параметров, как температура подложки и источников. Использование разработанного волновода в конструкции лазерных структур с квантовыми точками CdSe/ZnSe, излучающих в зеленом спектральном диапазоне, позволило в два раза снизить пороговую плотность мощности возбуждения по сравнению с лазерами, в которых использовался волновод с постоянным показателем преломления. Оригинальный подход, используемый в работе для улучшения кристаллического качества формируемых волноводящих слоев и активной области с CdSe/ZnSe квантовыми точками, позволил достичь значений пороговой плотности мощности возбуждения в  $0.8 \text{ кВт/см}^2$ , что является рекордно низким значением для этого типа лазеров, излучающих в зеленом спектральном диапазоне.

Для создания лазеров на желтый спектральный диапазон на основе структур с CdSe квантовыми точками в диссертации выполнены теоретические оценки возможности увеличения длины волны излучения от CdSe квантовых точек за счет их встраивания в  $Zn_{1-x}Cd_xSe$  квантовую яму. Определены параметры  $Zn_{1-x}Cd_xSe$  квантовой ямы, применение которой в активной области с квантовыми точками позволит достичь длины волны излучения в 600 нм. При практической реализации лазерных структур с CdSe квантовыми точками, встроенными в упруго-сжатую  $Zn_{1-x}Cd_xSe$  квантовую яму, для предотвращения пластической релаксации упругих напряжений впервые предложено использовать в волноводящих слоях короткопериодные, упруго-растянутые  $ZnS_xSe_{1-x}/ZnSe$  решетки. В результате применения выше отмеченных подходов в структурах с CdSe квантовыми точками удалось достичь лазерной генерации в желтом спектральном диапазоне (на длине волны 593 нм) при рекордно низкой пороговой плотности мощности возбуждения в  $2.5 \text{ кВт/см}^2$ .

За счет исследования различными методами структур с CdSe/ $Zn_{1-x}Cd_xSe$  квантовыми точками выявлено, что оптимальной, с точки зрения увеличения сигнала люминесценции от квантовых точек в желтом спектральном диапазоне, является конфигурация активной

области, в которой квантовые точки CdSe заращиваются квантовой ямой  $Zn_{1-x}Cd_xSe$ , а не встраиваются в ее середину. Данный факт связывается с повышением однородности массива квантовых точек при их зарождении на бинарной поверхности ZnSe и увеличением содержания Cd в них в результате более длительной сегрегации Cd в квантовые точки из  $Zn_{1-x}Cd_xSe$  покровного слоя.

Разработанные при выполнении диссертации низкопороговые лазеры зеленого и желтого спектрального диапазонов на основе гетероструктур A2B6 с квантовыми точками CdSe применены при создании прототипов компактных лазерных конверторов излучения. При использовании в качестве оптической накачки коммерческого лазерного диода InGaN/GaN, излучающего на длине волны 437 нм, достигнута 14% квантовая эффективность конверсии излучения в зеленый спектральный диапазон и 4.5% - в желтый. Для желтого спектрального диапазона созданные лазерные конверторы обладают рекордными характеристиками.

Остальные, не отмеченные в настоящем отзыве, результаты, полученные в диссертационной работе С.В. Гроина, также являются интересными и важными с практической точки зрения.

Научные положения, выносимые на защиту в диссертации С.В. Гроина, четко сформулированы и хорошо **обоснованы**, так как являются обобщением большого количества полученных в работе теоретических и экспериментальных результатов. **Достоверность научных результатов и выводов**, представленных в диссертации, подтверждается экспериментальной проверкой используемых теоретических подходов и методов, логической последовательностью выполненных исследований, использованием современного технологического и научного оборудования, средств и методик проведения исследований. Подтверждением **достоверности** результатов является и то, что они не противоречат опубликованным в научной литературе теоретическим моделям и экспериментальным данным. Ярким проявлением **новизны** полученных результатов стали достигнутые в работе рекордные (по мировым меркам) характеристики лазерных структур зеленого и желтого спектрального диапазона на основе квантовых точек CdSe. Новизна полученных результатов подтверждается также литературным анализом работ других исследовательских групп, приведенным в диссертации, и публикацией основных результатов диссертации в рецензируемых журналах.

Диссертация написана ясным языком, четко, логично и последовательно. Основные результаты диссертации полностью отражены в опубликованных статьях. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Однако работа не лишена недостатков, среди которых необходимо отметить следующие:

1. На стр. 76 диссертации отмечается, что применение волновода с переменным показателем преломления привело к увеличению внутренней квантовой эффективности лазеров с 65.4% до 80.5% (на ~23%), а величины характеристического усиления с  $114 \text{ см}^{-1}$  до  $135 \text{ см}^{-1}$  (на ~18%). В тоже время в работе пренебрегают ростом внутренних потерь в лазерах с волноводом с переменным показателем преломления, который, согласно приведенным значениям, составил 28%. В работе не обсуждается, с чем может быть связан рост внутренних потерь, и какое влияние он может оказывать на работу лазеров.
2. По-моему мнению в работе недостаточно четко описана физическая причина более длинноволновой люминесценции структуры, в которой CdS квантовые точки зарощены  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$  квантовой ямой, по сравнению со структурой, в которой квантовые точки встраивались в середину квантовой ямы.
3. Из текста диссертации не ясно какими физическими характеристиками структур определяется установленный в работе «диапазон длин лазерного резонатора, соответствующих минимальной пороговой мощности, необходимой для возбуждения структур ЛД на основе InGaN в составе инжекционного лазерного конвертора».
4. По-моему мнению выводы 5 и 12 в Заключение очень близки и могли бы быть объединены в один.
5. К сожалению работа не лишена ряда ошибок и опечаток. Из тех ошибок, что затрудняют понимание диссертации можно отметить ошибку в написании формулы 1.2 на ст. 19; неверное указание на стр. 67 спектры каких структур приведены на рисунке 3.9; сбивая последовательная нумерация рисунков в Главе 3 (начиная с рисунка 3.17); указание источника S вместо Se при перечислении источников на стр. 82 и ссылка на стр. 89 на таблицу 1.3 вместо таблицы 3.1.

Перечисленные замечания имеют, в основном, методический и рекомендательный характер, или относятся к оформлению диссертации. Они не влияют на высокую положительную оценку диссертационной работы С.В. Гронина.

Диссертация С.В. Гронина является законченным научно-исследовательским трудом в актуальном направлении физики полупроводников, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, обоснованы, хорошо опубликованы в ведущих научных журналах и неоднократно докладывались на российских и международных научных конференциях. Диссертационная работа С.В. Гронина полностью соответствует требованиям ВАК РФ,

предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), а ее автор, Гронин Сергей Вячеславович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников".

Официальный оппонент

зав. лабораторией,

А.В. Новиков

кандидат физико-математических наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН), лаборатория молекулярно-пучковой эпитаксии полупроводниковых гетероструктур, 603087, Россия Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д.7.

тел: +7 831 4179480, адрес электронной почты: [anov@ipmras.ru](mailto:anov@ipmras.ru)

Подпись Новикова А.В. заверяю:

ученый секретарь ИФМ РАН, к.ф.м.н.

Д.А. Рыжов