О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Разовой Анны Александровны «Лазерная генерация в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe в среднем инфракрасном диапазоне», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств и 1.3.19 – лазерная физика.

Инфракрасная и терагерцовая оптоэлектроника является одним из магистральных направлений развития современной твердотельной электроники. В рамках данного направления важной областью деятельности является разработка новых материалов для создания высокоэффективных твердотельных излучателей и фотоприемников инфракрасного и терагерцового диапазонов. Перспективной возможностью для этого является использование полупроводников группы A^2B^6, характеризующихся, в частности, возможностью вариации их энергетического спектра при изменении состава твердого раствора. В работе А.А. Разовой исследуется данная возможность в применении к твердым растворам $Hg_{1-x}Cd_xTe$ в диапазоне составов, для которого ширина запрещенной зоны материала мала и соответствует инфракрасному и терагерцовому спектральному диапазону. В последнее время все большее и большее внимание исследователей привлекает более длинноволновый диапазон $\lambda > 20$ мкм, в котором имеется множество характерных спектральных линий газов, а также тяжелых молекул. Кроме того, для определенного диапазона составов твердого раствора и толщин квантовых ям возможно создание эффективных излучателей на средний ИК-диапазон 3-5 мкм, соответствующий окну прозрачности атмосферы. Дистанционное зондирование в этой спектральной области может предоставить ценную информацию о степени загрязнения окружающей среды, о наличии молекул вредных веществ в воздухе, и так далее. Вышеуказанные обстоятельства определяют актуальность диссертационной работы А.А. Разовой.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и списка публикаций автора по теме работы. Объём диссертации составляет 144 страницы, включая 62 иллю-

страции и 12 таблиц. Список литературы составляет 146 публикаций, список публикаций автора – 7 статей и 15 тезисов.

В работе получено большое количество новых красивых результатов. Из числа этих результатов хотелось бы особо выделить следующие, определяющие научную новизну работы.

Получено лазерное излучение в микродисковых резонаторах диаметром 20 – 50 мкм на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe в области длины волны около 4 мкм с максимальной температурой наблюдения излучения > 200 К, достижимой при охлаждении элементами Пельтье, при оптической накачке с пороговой плотностью мощности ≥ 50 кВт/см2 .

Показано, что основным фактором, ограничивающим максимальную температуру наблюдения лазерного излучения в микродисковых лазерах на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe в диапазоне длин волн 3 – 5 мкм, являются оптические потери на вывод излучения.

Продемонстрировано стимулированное излучение в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe при квазинепрерывной оптической накачке (длина волны 10,6 мкм) с пороговой плотностью мощности 1,5 – 12 Вт/см2 при криогенной температуре на длине волны около 14 – 24 мкм.

Получено лазерное излучение на модах шепчущей галереи в области 20 – 26 мкм в микродисковых HgCdTe лазерах, диаметром 200 мкм.

Показано, что при переходе от непроцессированной структуры к микродисковому резонатору с высотой боковых стенок ≥ 3 мкм в области длин волн 20 – 26 мкм происходит падение эффективного времени жизни носителей с увеличением глубины травления, что связано с безызлучательной рекомбинацией через дефекты, создаваемые процессом ионного травления.

Достоверность полученных А.А. Разовой результатов не вызывает сомнений и определяется тем, что все экспериментальные данные получены с использованием современной экспериментальной техники и апробированных методик измерений. Полученные в работе данные согласуются с известными экспериментальными результатами других авторов и не противоречат современным представлениям. Положения диссертации вполне обоснованы полученными экспериментальными и расчетными результатами.

Научные результаты, составляющие основу диссертации, опубликованы в наиболее авторитетных российских и международных научных журналах и мно-

гократно докладывались на российских и международных научных конференциях самого высокого уровня.

Результаты исследований, проведённых А.А. Разовой, представляют несомненный практический интерес. Работа может быть использована в организациях, занимающихся технологиями создания элементов инфракрасной и терагерцовой техники.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать некоторые замечания, которые, впрочем, имеют скорее характер пожеланий.

1. На стр. 29-31 и рис. 1.9 излагается методика измерений спектров фотопроводимости исследованных образцов. Вообще говоря, при исследованиях проводимости (в том числе фотопроводимости) важно исключить влияние сопротивления (и фотосопротивления) контактов. Как правило, для этого используют 4-зондовые измерения. К сожалению, в работе не указано, использовались ли 2-зондовые, или 4-зондовые измерения. И, если использовались 2-зондовые, как оценивался вклад сопротивления (и фотосопротивления) контактов.
2. Возможно ли оптимизировать модовые потери за счет использования варизонных буферных слоев? Насколько известно рецензенту, структуры такого типа могут быть синтезированы в лаборатории Н.Н. Михайлова, в которой синтезированы все образцы, исследованные в работе.
3. Можно ли ожидать, что лазерные структуры, излучающие на длинах волн порядка 20 мкм, смогут работать не при оптической, а при токовой накачке?
4. При описании различных образцов хотелось бы, чтобы при их обозначении использовались какие-то реальные параметры структур, а не кодовые аббревиатуры (которые, насколько мне известно, просто обозначают дату синтеза соответствующего образца). Все же сравнение различных образцов должно происходить не по дате синтеза, а по их характеристикам.
5. В тексте работы есть небольшое количество технических недочетов.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Автореферат и опубликованные работы отражают содержание диссертации. В целом диссертация А.А. Разовой удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, а сам автор, безусловно, заслуживает присуждения

ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств и 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент «28» октября 2026 года
заведующий кафедрой физического факультета МГУ
член-корр. РАН, профессор,
доктор физ.-мат. наук (01.04.10 – физика полупроводников)
Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва 119991, тел. (495)-939-11-51
E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru
Хохлов Дмитрий Ремович

Согласен на обработку персональных данных.
«28» октября 2026 года
Хохлов Дмитрий Ремович

Подпись Д.Р. Хохлова заверяю
И.о. декана физического факультета МГУ
профессор В.В. Белокуров
«28» октября 2026 года