

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Морозова Сергея Вячеславовича «Стимулированное излучение в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2. – электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

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 С.В. Морозова исследуется данная возможность в применении к твердым растворам $Hg_{1-x}Cd_xTe$ в диапазоне составов ($0.15 < x < 0.23$), для которого ширина запрещенной зоны материала мала и соответствует инфракрасному и терагерцовому спектральному диапазону. Ранее такого рода исследования проводились лишь для составов $x > 0.2$, соответствующего атмосферному окну прозрачности 8-14 мкм. В последнее время, однако, 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. 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. В то же время диапазон спектра 20 – 60 мкм является недоступным для приборов на основе полупроводников A^3B^5 ввиду сильного фононного поглощения. Поэтому узкощелевые твердые растворы $Hg_{1-x}Cd_xTe$ составов 0.15 – 0.20, где частоты оптических фононов существенно ниже, представляют большой практический интерес, что и определяет актуальность диссертационной работы С.В. Морозова.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 238 страниц текста, 65 рисунков и список литературы из 201 наименования.

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

Экспериментально продемонстрирована возможность полного подавления оже-рекомбинации в структурах с квантовыми ямами HgTe, когда релаксация неравновесных носителей полностью определяется излучательными процессами, на примере структуры с $E_g = 120 - 140$ мэВ при $T = 77$ К.

Исследована динамика пропускания структуры квантовой ямы с шириной запрещенной зоны $E_g = 20$ мэВ методом накачка-зондирование с временным разрешением ~ 10 пс, что позволило оценить плотность мощности, требуемую для получения инверсии населенностей как 10 кВт/см².

Обнаружена терагерцовая фотолюминесценция, обусловленная оптическими переходами между возбужденными и основными состояниями нейтрального и однократно ионизованного двойного акцептора – вакансии ртути

Предложен дизайн гетероструктур с квантовыми ямами на основе твердого раствора CdHgTe выращиваемых на подложке GaAs, с диэлектрическими волноводами, поддерживающими моду TE₀ за счет отражения в окрестности полосы остаточных лучей арсенида галлия (дина 8 волны 30 – 32 мкм). В волноводных структурах с множественными квантовыми ямами в пучностях моды получено стимулированное излучение с длинами волн 19.5 – 31 мкм.

В волноводных гетероструктурах с узкими квантовыми ямами на основе HgCdTe получено стимулированное излучение в диапазоне 2.8 - 3.7 мкм при $T > 240$ К, благодаря подавлению пороговых и беспороговых процессов оже-рекомбинации.

Достоверность полученных С.В. Морозовым 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 многократно докладывались на российских и международных научных конференциях самого высокого уровня.

Результаты исследований, проведенных С.В. Морозовым, представляют несомненный практический интерес. Работа может быть использована в организациях, занимающихся технологиями создания элементов терагерцовой техники

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

1. 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 контактов.
2. Было бы интересно сравнить данные по фотопроводимости толстых пленок, полученные для составов с прямой щелью, с аналогичными данными для составов с инвертированной щелью. Конечно, есть данные по номинально бесщелевому образцу, но хотелось бы также иметь сравнение с составами с меньшим содержанием кадмия (п.2.8).
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 С.В. Морозова удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, а сам автор, безусловно, заслуживает присужде-

ния ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2. – электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент

«11» октября 2022 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.

«11» октября 2022 года

Хохлов Дмитрий Ремович

Декан физического факультета МГУ
профессор
«11» октября 2022 года

