

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Кадыкова Александра Михайловича «Фотоотклик и стимулированное излучение в структурах на основе соединений HgCdTe в среднем и дальнем ИК диапазонах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Инфракрасная оптоэлектроника является одним из важнейших направлений современной электроники. Это, в том числе, обусловлено огромными возможностями для практического применения инфракрасной техники – от медицинских приложений до систем безопасности и инфракрасной астрономии космического базирования. Особое место в существующей проблематике занимает разработка чувствительных приемников излучения инфракрасного диапазона, а также компактных твердотельных излучателей, которые являются ключевыми элементами любых оптоэлектронных систем. В последнее время наблюдается значительный подъем интереса к изучению свойств полупроводниковых твердых растворов на основе HgCdTe, а также низкоразмерных структур на их основе. Указанные материалы обладают низкими значениями характерных энергий электронного спектра, соответствующими инфракрасному спектральному диапазону. Успехи современных технологий позволяют синтезировать структуры на основе HgCdTe с очень высокой степенью структурного совершенства и, как следствие, с низкой концентрацией свободных носителей заряда. Данное обстоятельство открывает новые возможности для создания эффективных приемников и излучателей инфракрасного диапазона. Помимо этого, создаются условия для углубленного изучения свойств данного класса материалов, что позволяет получать новые красивые фундаментальные результаты. Именно данному кругу вопросов посвящена диссертационная работа А.М. Кадыкова, что определяет ее актуальность.

Диссертация состоит из введения, двух оригинальных глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 164 страницы текста, 68 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 154 наименований.

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

Исследованы спектры суб-терагерцового фотоотклика по механизму Дьяконова — Шура полевого транзистора, выполненного на основе гетероструктуры с квантовой ямой HgTe/CdHgTe толщиной 8.3 нм. При этом обнаружен сигнал фотоотклика на излучение с частотой 292 и 660 ГГц, соответствующий фазовому переходу из инвертированной зонной структуры в нормальную при изменении величины индукции магнитного поля.

Выполнена «визуализация» уровней Ландау методом суб-терагерцового фотоотклика на частоте 292 ГГц и температуре 4.2 К по механизму Дьяконова — Шура в холловском мостике с затвором, выполненном на основе квантовой ямы HgTe/CdHgTe толщиной 6.5 нм. При этом было получено положение нулевых уровней Ландау и значение критического магнитного поля, соответствующего их пересечению.

При исследовании магнитотранспортных характеристик холловского мостика с затвором на основе гетероструктуры двумерного топологического изолятора с квантовой ямой HgTe/CdHgTe толщиной 6.5 нм получены «карты» уровней Ландау при различных температурах от 1.7 до 40 К. Анализируя положения нулевых уровней Ландау и отслеживая их пересечение (антипересечение) при различных температурах наглядно продемонстрирован топологический фазовый переход, определена критическая температура, составившая 27 К.

При оптической импульсной накачке и температуре 100К за счёт подавления безызлучательной рекомбинации Шокли — Рида — Холла при увеличении мощности возбуждения получены спектры стимулированного излучения в образце на основе эпитаксиальной пленки твёрдого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с содержанием $x_{\text{Cd}} \approx 0.22$ на длине волны $\lambda \approx 8.4$ мкм.

В гетероструктурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe толщиной 3.65 нм с волноведущими барьерными слоями за счёт подавления Оже-рекомбинации при температуре от 18К до 80К получено стимулированное излучение на рекордной длине волны $\lambda \approx 10.2$ мкм, сопровождающееся возбуждением линии фотолюминесценции вплоть до ≈ 1 кВт и сверхлинейным ростом интенсивности при увеличении мощности возбуждения. Данный результат по длине волны значительно превосходит результат, полученный ранее для данных материалов.

Достоверность полученных А.М. Кадыковым 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 А.М. Кадыковым, представляют несомненный практический интерес. Работа может быть использована в организациях, занимающихся технологиями создания элементов инфракрасной оптоэлектроники.

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

- 1) На стр. 53 описывается процедура создания транзисторных структур на основе квантовых ям HgTe/HgCdTe. Отмечается, что контакты истока и стока к структуре наносились с помощью металлизации слоями нескольких металлов, т.е. на верхний слой структуры. Понятно, что в такой ситуации все слои структуры включены параллельно, и в электрофизические характеристики могут вносить вклад как электронные состояния квантовых ям, так и объема пленки. Было бы желательно, если бы автор привел аргументацию, почему вклад квантовой ямы в транспорт является в данном случае преобладающим.
- 2) При исследованиях отклика структур на воздействие субтерагерцового излучения отмечается, что фотоотклик наблюдается в том числе при отсутствии постоянного тока через структуру. Возникает вопрос о том, в какой степени наблюдаемый фотоотклик может быть связан просто с детектированием излучения на Шоттки-барьере, образовавшемся на контакте.
- 3) Учитывая сильную зависимость параметров электронного спектра структур от магнитного поля, было бы очень интересно посмотреть на

модификацию спектров фотолюминесценции в магнитном поле, особенно учитывая, что даже относительно малые магнитные поля, которые могут быть созданы постоянными магнитами, существенно модифицируют электронный спектр.

4) В тексте работы имеются некоторые технические недочеты.

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.М. Кадыкова удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, а сам автор, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01.

Официальный оппонент

заведующий кафедрой физического факультета МГУ

член-корр. РАН, профессор, доктор физ.-мат. наук

Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва 119991, тел. (495)-939-11-51

E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru



Д.Р.Хохлов

Подпись Д.Р. Хохлова заверяю:

орк *Гусева* - Г.А. Гусева