

ОТЗЫВ

научного консультанта на диссертационную работу Морозова Сергея Вячеславовича «Стимулированное излучение в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe»,
представленную на соискание

ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
2.2.2. - Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

С.В. Морозов пришел на работу в отдел физики микроструктур Института физики микроструктур РАН (ИФМ РАН) на должность младшего научного сотрудника в 2001 г. после окончания аспирантуры ННГУ. В 2002 г. им была защищена диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н на тему «Фотоэлектрическая спектроскопия гетероструктур с квантовыми точками GaAs/InAs» под руководством проф. И.А.Карповича, после чего С.В.Морозов был переведен на должность научного сотрудника. В ИФМ РАН им были выполнены спектральные (в среднем ИК и ТГц диапазонах) и кинетические исследования различных полупроводниковых наноструктур. Среди полученных в то время результатов я бы выделил наблюдение генерации разностной частоты в среднем ИК диапазоне в составном двухчастотном инжекционном лазере ближнего ИК диапазона (Appl. Phys. Lett., v.92, 021122 (2008)), продемонстрировавшее высокий уровень экспериментального мастерства С.В. Морозова. С 2010 г. он включился в проводимые в коллективе исследования оптических свойств узкозонных твердых растворов HgCdTe и квантовых ям на основе этой гетеросистемы, сосредоточившись на спектрокинетических исследованиях фотопроводимости и фотолюминесценции в среднем ИК диапазоне. В настоящую диссертационную работу вошли результаты исследований, выполненных С.В.Морозов и под его руководством уже сформировавшейся к тому времени его научной группой (в 2012 г. С.В.Морозов был избран на должность старшего научного сотрудника, а в 2015 г. на должность заведующего лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток) в 2013-2021 гг. Успешное развитие этого направления исследований стало возможным благодаря разработанной им методики наблюдения слабых сигналов фотолюминесценции в среднем и дальнем ИК

диапазонах при импульсном возбуждении с большой скважностью в условиях сильной фоновой засветки. Это обусловило лидерство группы С.В.Морозова в данном направлении в России, что подтверждается многочисленными обращениями различных научных групп за помощью в проведении подобных исследований в различных узкозонных полупроводниковых системах.

Результаты уже первых поведенных исследований показали перспективность гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe для создания лазерных источников излучения среднего ИК диапазона. Им были разработаны согласованные с технологами из ИФП СО РАН (где были выращены все исследуемые образцы) структуры с толстыми (до 20 мкм) диэлектрическим волноводами, в пучность моды которых помещались до 10-15 узких квантовых, на которых сразу же было получено стимулированное излучение. В последующие годы наряду с расширением диапазона длин волн генерации (вплоть до рекордной длины волны 31 мкм недоступной для существующих квантовых каскадных лазеров) и повышения «рабочей» температуры свыше 200 К (достижимой с помощью термоэлектрического охлаждения) генерации в практически важном диапазоне длин волн 3 – 5 мкм (окне прозрачности атмосферы) С.В.Морозовым был выполнен ряд фундаментальных исследований механизмов, определяющих возможность создания инверсии населенностей в квантовых ямах HgCdTe: влияния особенностей зонного спектра квантовых ям на подавление безызлучательной рекомбинации, энергетических спектров вакансий ртути – двойных акцепторов и возможности насыщения безызлучательной рекомбинации Шоккли-Рида-Холла через эти центры и др.

Результаты диссертационной работы С.В.Морозова открывают новые возможности создания полупроводниковых лазеров в широкой области ИК диапазона. Поскольку структуры с квантовыми ямами HgCdTe выращиваются на подложке GaAs(013) и отсутствует возможность создания резонатора Фабри-Перо простым скалыванием торцов, дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск путей создания лазерных резонаторов. Уже после завершения настоящей диссертационной работы в лаборатории С.В.Морозова было показано, что использование дискового резонатора на модах шепчущей галереи позволило поднять температуру наблюдения стимулированного излучения в области 4 мкм на 20 К до 260 К, а создание торцевых зеркал с помощью травления фокусированным

ионным пучком на полосковых волноводах, сформированных фотолитографическим методом, обузило линию стимулированного излучения в области 9 мкм с 16 см^{-1} (на непроцессированном образце) до $0,4 \text{ см}^{-1}$! Также совместно с технологами ИФП СО РАН ведутся работы по созданию инжекционных лазеров с *p-n*-переходом. Отметим, что большим достоинством лазеров на основе квантовых ям HgCdTe является возможность плавной перестройки частоты излучения при небольшом изменении рабочей температуры, что особенно важно для будущих спектроскопических приложений.

Полученные в диссертации результаты получены при поддержке грантов, в которых соискатель являлся руководителем (РНФ 17-12-01360 «Лазеры и спазеры дальнего ИК диапазона на основе наноструктур HgCdTe », с продолжением), РФФИ (13-02-01154 «Спектрокинетические исследования терагерцовой фотопроводимости в узкозонных наноструктурах на основе квантовых ям $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ и полупроводниковых структурах с мелкими примесями», 16-02-00685 «Спектрокинетические исследования терагерцовой фотопроводимости и фотолюминесценции в твердых растворах HgCdTe и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ », 18-52-16009 «ТГц излучение и фотоотклик в структурах на основе КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ с квазидираковским законом дисперсии», 18-52-50024 «Наноструктуры с дираковским законом дисперсии как среда с усилением излучения терагерцового диапазона», 19-02-00827 «Гетероструктуры с квантовыми ямами $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ для лазеров среднего ($3 - 5 \text{ мкм}$) ИК диапазона») исполнителем (РНФ 20-42-09039 «Коллективные явления в топологических материалах», 16-12-10317 «Фазовые переходы в двумерных топологических изоляторах», программы Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-797 "Квантовые структуры для посткремниевой электроники" и № 075-15-2020-906 "НЦМУ ФОТОНИКА") и в рамках государственного задания.

Полученные результаты соответствуют мировому уровню в области полупроводниковой оптоэлектроники, что подтверждается наличием у соискателя публикаций в ведущих научных изданиях, в том числе 43 статьи в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, большим числом приглашенных и устных докладов, сделанных С.В.Морозовым на ведущих международных и всероссийских конференциях.

Все экспериментальные результаты, приведенные в диссертации, получены С.В.Морозовым лично или под его руководством. Он внес определяющий вклад в постановку задач, интерпретацию результатов эксперимента и написание ключевых статей по результатам исследований. Часть результатов получена в сотрудничестве с зарубежными коллегами из Университета Монпелье (Франция), Национальной лаборатории сильных магнитных полей (Гренобль, Франция) и Исследовательского центра Дрезден-Россендрф (Германия) с использованием их экспериментальных возможностей.

Считаю, что диссертационная работа Морозова С.В. является законченным научным исследованием, удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Ее автор при выполнении работы показал себя высококвалифицированным научным работником. Считаю, что Морозов С.В. заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2. - Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Научный консультант:

зам. директора Института физики микроструктур РАН - филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
д.ф.-м.н., проф. Гавриленко Владимир Изяславович

Адрес: 603087, Нижегородская обл., Кстовский район,
д.Афонино, ул. Академическая, д.7
Тел. +7 831 417-94-62
E-mail: gavr@ipmras.ru

Подпись Гавриленко В.И. заверю.

Ученый секретарь ИФМРАН
К.ф.-м.н.



Д.М.Гапонова

«28» июня 2022 г.