

МИНИСТЕРСТВО  
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный  
исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409  
Тел. (499) 324-77-77, факс (499) 324-21-11  
<http://www.mephi.ru>

23.08.2022 № 501-Л/98

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» имени В. И.  
Ульянова (Ленина).

Кафедра МНЭ

**Комкову Олегу Сергеевичу**

197022, Россия, Санкт-Петербург, ул.  
Профессора Попова, дом 5 литера Ф

## ОТЗЫВ

оппонента Каргина Николая Ивановича на диссертацию соискателя Комкова Олега Сергеевича на тему «Фотомодуляционная оптическая спектроскопия полупроводниковых материалов и квантово-размерных структур», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников

### **Актуальность темы диссертации**

Разработанные в диссертационной работе оптические методы исследования материалов и структур стали важной составляющей современной физики и техники полупроводников. Рассмотренные разновидности модуляционной спектроскопии обладают целым рядом преимуществ по сравнению с традиционными оптическими методами неразрушающего контроля и приносят в полупроводниковую технологию мощный инструмент получения новых знаний. Кроме того, диссертационная работа Комкова Олега Сергеевича посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям в области диагностики систем пониженной размерности, а также разработке новых принципов и подходов к определению их энергетического спектра. Таким образом, тема рассматриваемой диссертации, безусловно, является актуальной.

### **Новизна и достоверность основных выводов и результатов работы**

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Обнаружена тонкая осциллирующая структура в спектрах фотоотражения сверхчистых эпитаксиальных слоев арсенида галлия при энергии больше

экситонной ширины запрещенной зоны этого материала. Показано, что причиной появления этой структуры является влияние приповерхностного электрического поля на экситоны.

Продемонстрирована возможность ее использования для оценки сверхнизких концентраций остаточных примесей.

2. Разработана методика коррекции фазы при фурье-спектроскопии, необходимая для измерения модуляционных спектров объемных полупроводников и наноструктур на их основе.
3. В спектрах фотоотражения актуальных слоистых (ван-дер-ваальсовых) полупроводников обнаружены сигналы, позволяющие экспериментально оценивать напряженности приповерхностных электрических полей в этих материалах.
4. В исследованных одиночных, множественных и в сильно взаимодействующих квантовых ямах выявлены механизмы формирования модуляционных сигналов в зависимости от напряженности внутреннего электрического поля.
5. Исследованы новые оригинальные узкозонные полупроводниковые наноструктуры, представляющие собой субмонослойные вставки второго типа в квантовых ямах первого типа. Экспериментально и теоретически получен их энергетический спектр и вероятности оптических переходов в средней инфракрасной области.

**Достоверность** результатов диссертационной работы подтверждается совпадением теоретических и экспериментальных данных, а также признанным высоким уровнем экспериментов в лаборатории, где выполнялась диссертационная работа. Полученные в работе значения концентрации в эпитаксиальных слоях подтверждаются измерениями при помощи независимых методов, в частности, метода Холла и низкотемпературной экситонной фотолюминесценции.

Результаты исследований опубликованы в авторитетных научных журналах, были представлены на целом ряде крупных отечественных и международных конференций (более сорока выступлений), и получили высокую оценку специалистов.

### **Ценность для науки и практики**

Ценность проведенной работы для науки и практики состоит в том, что:

1. Разработан бесконтактный метод измерения концентрации свободных носителей заряда в прямозонных полупроводниковых материалах  $A^3B^5$ .

2. Реализован первый в России измерительный комплекс фотомодуляционной фурье-спектроскопии, работающий в спектральном диапазоне 0,4...16 мкм.
3. Разработан метод неразрушающего контроля толщин гомоэпитаксиальных слоев  $n^0$ -InAs, выращиваемых на  $n^{++}$ -InAs-подложках, и достижимого диапазона работы чувствительных мишеней  $n^{++}$ -InAs/ $n^0$ -InAs ИК фотоприемных устройств большой площади.
4. Создана установка для измерения ИК-фотолюминесценции полупроводниковых наногетероструктур, позволяющая избежать их перегрева и влияния паразитного теплового фона на спектры при сохранении высокой чувствительности благодаря использованию стробируемого интегратора.
5. Показана возможность измерения энергетического спектра структур с квантовыми ямами InSb/AlInSb и InAs/InGaAs/InAlAs, предназначенных для создания транзисторов гипервысокой частоты.
6. Полученные методом фотомодуляционной фурье-спектроскопии данные использованы при разработке твердотельных излучателей средневолнового ИК-диапазона на основе ультратонких квантовых ям InSb/InAs.

### **Общая оценка диссертационной работы**

Данная диссертационная работа выполнена на актуальную тему, направлена на повышение качества монокристаллических полупроводниковых материалов и наноструктур, которые являются основой для создания современной электронной компонентной базы. Работа написана грамотным техническим языком и оставляет хорошее впечатление. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

К положительным особенностям оформления работы следует отнести наличие активных ссылок на литературу, которые значительно ускоряют обращение к нужным пунктам списка литературы. Это упрощает чтение электронных вариантов рукописей диссертации и автореферата. Кроме того, у большинства из 370 приведенных в диссертации ссылок указан DOI, что также одним нажатием позволяет перейти к первоисточнику в информационно-телекоммуникационной среде Интернет.

В качестве замечаний по работе можно отметить следующие:

- В первой главе, посвященной физическим основам методов модуляционной оптической спектроскопии, следовало бы более подробно

остановиться на одноэлектронной модели фотоотражения и на принципе формирования осцилляций Франца – Келдыша. Поскольку именно эта модель лежит в основе «традиционного метода» определения встроенного электрического поля, активно используемого в работе.

- Во второй главе имеется некоторая избыточность в описании используемых в работе экспериментальных установок.

В качестве замечания по оформлению работы следует отметить одну неточную ссылку на главу. Так, на стр. 125 написано: «...использовался описанный в главе 4 традиционный метод», в то время как традиционный метод был описан в третьей главе. А также две некорректные ссылки на таблицы: стр. 154 – « ... в таблицу 4.4.», вместо « ... в таблицу 4.6.»; и на стр. 181 – «(см. таблицу 4.1)» вместо «(см. таблицу 3.1)».

Отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку качества выполненной работы.

### Заключение

Представленная диссертация "Фотомодуляционная оптическая спектроскопия полупроводниковых материалов и квантово-размерных структур" полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 21.04.2016 № 335, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Комков Олег Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников.

Оппонент,

д.т.н., профессор,

проректор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

  
29 августа 2022 г.

Каргин Николай Иванович

Почтовый адрес: 115409, Москва, Каширское ш., 31. Тел.: +7 495 788 5699,  
e-mail: NIKargin@mephi.ru



Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ

*В. М. Самарцов*