

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук**

Зубюк Варвары Владимировны

**на тему: «Эффекты оптического переключения и насыщения
поглощения в метаповерхностях на основе арсенида галлия и германия»
по специальности 1.3.19. Лазерная физика**

Изучение новых материалов для разработки устройств электроники и фотоники является одной из важных задач. Особое внимание уделяется возможности модификации свойств таких материалов под воздействием внешних факторов, в частности, оптического воздействия. Полупроводниковые резонансные нано- и микроструктуры, совместимые с существующими промышленными процессами изготовления, обладают потенциалом для улучшения существующих и создания новых статических и динамических устройств обработки и передачи информации, оптических вычислений, элементов интегральной оптики и различных сенсоров. Таким образом, актуальность диссертации Зубюк В.В., посвященной изучению оптических эффектов в наноразмерных полупроводниковых периодических структурах, поддерживающих резонансное возбуждение, не вызывает сомнений. Кроме того, в работе используются структуры из арсенида галлия и германия, которые, как и кремний, находят широкое применение в современной полупроводниковой электронике. Но при этом арсенид галлия является прямым полупроводником, в отличие от кремния, что является существенным преимуществом в ряде задач оптоэлектроники, и обуславливает необходимость изучения процессов взаимодействия с лазерным излучением структур из такого материала.

Диссертация Зубюк В.В. посвящена экспериментальному изучению особенностей оптических эффектов в полупроводниковых метаповерхностях, а также их фемтосекундной динамике. Посредством измерения интенсивности света, отраженного от структуры, как функции падающей мощности изучена зависимость коэффициента отражения метаповерхностей на основе арсенида галлия от интенсивности фемтосекундных лазерных импульсов с центральной длиной волны вблизи края поглощения полупроводника, при условии возбуждения в структурах резонансов типа Ми в этом же спектральном диапазоне. С помощью численных расчетов показано, что такое изменение вызвано эффектом насыщения поглощения арсенида галлия, возбуждением резонансов типа Ми и соответствующим фотоиндуцированным изменением резонансного профиля коэффициента отражения. Вторая часть диссертации посвящена экспериментам по изучению нестационарных свойств полупроводниковых метаповерхностей методом “накачка-зондирование” с частотным разрешением. В структурах на основе арсенида галлия показана пикосекундная модуляция коэффициента отражения и спектральный сдвиг резонанса на 30 нм. В свою очередь, в структурах на основе аморфного германия, в которых возможно возбуждение высокодобротных мод с добротностями около 100, продемонстрировано субпикосекундное оптическое переключение на основной и утроенной частотах.

Диссертация состоит из введения, главы с обзором литературы по исследуемой теме и трех оригинальных глав с экспериментальными исследованиями, заключения и списка литературы из 145 ссылок. Объем диссертации составляет 222 страницы.

Полученные в диссертации результаты, формулируемые положения и выводы являются оригинальными, обоснованными, обладают научной новизной, а их достоверность определяется непротиворечивостью с

имеющимися литературными данными, воспроизводимостью результатов при многократном повторении измерений и согласием с численными и аналитическими расчетами. Апробация работы проводилась на различных российских и международных научных конференциях, а результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в авторитетных научных изданиях, что также отражает их новизну и практическую значимость.

Диссертация Зубюк В.В. написана понятным языком, достаточно хорошо структурирована. В ней отражена вся совокупность проведенных экспериментов, подтвержденных численными и аналитическими моделями. Сформулированные в диссертации задачи можно считать решенными.

При этом стоит отметить несколько замечаний к данной диссертационной работе.

1. В исчерпывающем обзоре литературы, охватывающем наиболее актуальные на настоящий момент работы по теме диссертации, отсутствует тем не менее достаточное количество поясняющих иллюстраций при описании некоторых литературных данных. В частности, в разделе 1.1.2 при анализе результатов трех работ из списка литературы [10, 12, 59] подробно описывается множество экспериментальных деталей, но при этом приводится единственная иллюстрация, схематично изображающая исследуемые объекты и суть описываемых эффектов, не позволяющая однако наглядно сопоставить указанные в тексте многочисленные параметры с наблюдаемыми особенностями в описываемых спектральных характеристиках. Кроме того, стоит отметить заметное количество опечаток, а также наличие общеизвестных утверждений, не подкрепленных ссылками на литературу, в частности, неоднократно упоминается необходимость выполнения условия о превышении показателем преломления значения “2” для резонансных диэлектрических

частиц (с. 17, 21), но без ссылки на соответствующий источник, откуда было взято это значение, либо на иное логическое обоснование.

2. В главе 1 при упоминании первой экспериментальной работы по демонстрации магнитного отклика диэлектрической частицы в видимом спектральном диапазоне цитируется работа [25] из списка литературы (A.I. Kuznetsov, *et al.*, “Magnetic light”, *Sci. Rep.* 2012, 2, 492), однако не упоминается другая известная работа на эту же тему (A.B. Evlyukhin, *et al.*, “Demonstration of Magnetic Dipole Resonances of Dielectric Nanospheres in the Visible Region”, *Nano Lett.* 2012, 12, 3749), опубликованная немногим ранее [25] и имеющая таким образом приоритет с хронологической точки зрения.
3. В главе 2 на с. 97 описывается особенность в экспериментальных спектрах отражения метаповерхностей в области длины волны 880 нм, которая предположительно возникает из-за резкого изменения коэффициента поглощения вблизи энергии запрещенной зоны. Это изменение, однако, не было учтено в численном расчете, как поясняется: из-за ограничений в программном обеспечении, используемом для расчета коэффициента отражения метаповерхности (“не поддерживался такой тип дисперсии материала”). Подобное объяснение выглядит не вполне понятным, кроме того, обычно программные пакеты для численного моделирования взаимодействия света с веществом допускают использование сторонних (например, измеренных с помощью эллипсометрии) дисперсионных зависимостей диэлектрической проницаемости материала.
4. В главе 2 в описании формулы (2.4) отсутствует расшифровка параметра m_{dh} .
5. В главе 2 на с. 104 утверждается, что, согласно расчетам, изменение комплексной диэлектрической проницаемости в подложке GaAs не влияет на спектр отражения метаповерхности при возбуждении накачкой. Однако, соответствующие результаты расчета, которые могли бы наглядно подтвердить данное утверждение, по каким-то причинам не показаны.

6. В главе 3 на с. 143 описывается режим значительного возбуждения полупроводника GaAs под действием накачки из-за генерации большого количества электронно-дырочных пар, который назван тем не менее «непертурбативным», хотя по логике он должен называться, наоборот, «пертурбативным».
7. В главе 3 на с. 154 при объяснении наблюдаемых относительно небольших спектральных сдвигов электрического дипольного резонанса метаповерхности в экспериментах «накачка-зондирование» приводится только предположение о более существенном влиянии поглощения вещества, но не результаты численного моделирования, как для случая магнитного дипольного резонанса, подробно описанного в разделе 3.4 и демонстрирующего очень хорошее согласие с экспериментом. Учитывая последнее, целесообразно было бы добавить соответствующий расчет для случая электрического дипольного резонанса, что могло бы подтвердить высказанное предположение.
8. При анализе результатов, описанных в главе 4, представляется полезным добавление явного сравнения с соответствующими литературными данными величины описанного эффекта смещения положения спектра третьей гармоники, по аналогии, как это было наглядно сделано в главе 2.

Указанные замечания не уменьшают значимости научного исследования в рамках диссертации. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1- 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой

степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Зубюк Варвара Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Центра инженерной физики
Автономной некоммерческой образовательной организации высшего
образования «Сколковский институт науки и технологий»

Жигунов Денис Михайлович

« 20 » февраля 2025

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 280-14-81, e-mail: d.zhigunov@skoltech.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.10 Физика полупроводников

Адрес места работы:

121205, г. Москва, Территория Инновационного Центра «Сколково»,
Большой бульвар, д. 30, стр. 1

Подпись сотрудника Жигунова Дениса Михайловича удостоверяю: