

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Потемкина Фёдора Викторовича, на диссертацию **Зубюк Варвары Владимировны** на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук на тему: **«Эффекты оптического переключения и насыщения поглощения в метаповерхностях на основе арсенида галлия и германия»** по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Метаповерхности, представляющие собой квазиплоские материалы с периодической структурой, усиливают нелинейно-оптические процессы и позволяют управлять оптическим излучением на субмикронных масштабах, что важно для создания активных фотонных устройств и сенсоров. Для повышения эффективности фотонных компонентов необходимо создание резонансных условий с наноразмерными элементами, что способствует улучшению взаимодействия света с веществом. В связи с ограничениями металлических метаповерхностей из-за омических потерь, диэлектрические метаповерхности становятся все более предпочтительными благодаря своей высокой эффективности и широкому спектру применения.

Представленная к защите диссертационная работа В.В. Зубюк посвящена экспериментальному исследованию фотоиндуцированного изменения спектральных и временных характеристик оптического и нелинейно-оптического отклика полупроводниковых метаповерхностей с резонансами типа Ми под действием фемтосекундного лазерного излучения. К наиболее важным и значимым результатам на мой взгляд можно отнести следующие достижения, определяющие **научную новизну** диссертационной работы. Исследован эффект насыщения поглощения в метаповерхностях на основе прямозонного полупроводника арсенида галлия и экспериментально показано значительное увеличение (более чем

на порядок) лазерно-индуцированного изменения коэффициента отражения в зависимости от интенсивности падающего излучения при возбуждении резонансов типа Ми. Произведена спектрохронография оптических свойств метаповерхности на основе арсенида галлия, позволившая впервые выявить сверхбыстрые амплитудные и спектральные изменения коэффициента отражения метаматериала на пикосекундном временном масштабе. С помощью метаповерхности на основе аморфного германия, поддерживающей возбуждение высокодобротной моды, впервые продемонстрирована динамика модуляции коэффициента пропускания метаматериала, а также показана фемтосекундная динамика третьей оптической гармоники, генерируемой в аморфном германии.

Диссертационная работа, изложенная на 222 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, благодарностей, списка сокращений и списка литературы. Включает 102 рисунка, 1 таблицу и 145 библиографических ссылок. Автореферат диссертационной работы соответствует её содержанию и правильно отражает полученные результаты.

В первой главе диссертации автором приведен обзор металлических и неметаллических структур, рассмотрены их преимущества, а также приведен обзор большого количества существующих исследований таких периодических структур.

Вторая и третья главы посвящены исследованию оптических эффектов в метаповерхностях, состоящих из массива субволновых дисков прямогоугольного полупроводника арсенида галлия. **Во второй главе диссертации** автором приведены оригинальные экспериментальные результаты по наблюдению эффекта насыщения поглощения. Продемонстрирована зависимость коэффициента отражения метаповерхностей и объемного полупроводника как функция

интенсивности падающего фемтосекундного излучения с энергией немного выше ширины запрещенной зоны. Получена увеличенная модуляция коэффициента отражения и уменьшение интенсивности насыщения для метаповерхностей при возбуждении резонансов Ми типа вблизи края запрещенной зоны полупроводника. Проведен численный расчет коэффициента отражения метаповерхности, с параметрами близкими к экспериментальным, и расчет модельной высокодобротной метаповерхности, для которой получено значительное уменьшение интенсивности насыщения. **В третьей главе** с помощью время-разрешающей широкополосной спектроскопии в эксперименте “накачка-зондирование” исследованы нестационарные процессы в метаповерхности с резонансами Ми типа в ближнем инфракрасном диапазоне. Для лазерно-индуцированной генерации свободных носителей использовалось фемтосекундное излучение с центральной длиной волны 800 нм. Это же излучение было использовано для создания суперконтинуума, ИК-часть которого (850 нм — 1300 нм) применялась в качестве зондирующего излучения. В такой схеме было получено пикосекундное изменение коэффициента отражения, со спектральным сдвигом оптического резонанса метаповерхности на 30 нм в коротковолновую область спектра, вследствие фотоиндуцированных свободных носителей в полупроводнике и соответствующего изменения показателя преломления. Продемонстрирована высокая эффективность модуляции коэффициента отражения до 90% вблизи магнитного дипольного резонанса при плотности энергии накачки 380 мкДж/см². Кроме того, обнаружено усиление в 75 раз для модуляции коэффициента отражения метаповерхности по сравнению с объемным материалом арсенида галлия.

В четвертой главе диссертации также с помощью время-разрешающей широкополосной спектроскопии в эксперименте “накачка-зондирование”, но с фемтосекундными импульсами ИК-диапазона

(центральная длина волны которых изменялась в диапазоне 1580 нм — 1900 нм) и спектральной шириной около 50 нм в качестве зондирующего излучения, рассмотрены нестационарные процессы в метаповерхности из аморфного германия. Обнаружено динамическое перераспределение спектральных компонент падающего зондирующего излучения при взаимодействии с метаповерхностью, в которой это излучение возбуждает высокодобротный резонанс с добротностью около 100, при внутриимпульсном лазерно-индуцированном изменении диэлектрической проницаемости под действием излучения накачки с центральной длиной волны 800 нм. При этом лазерно-индуцированный сдвиг резонанса метаповерхности составил около 15 нм в коротковолновую область спектра при плотности энергии накачки 0.5 мДж/см^2 за время порядка 100 фс. Кроме того, показано, что фотоиндуцированное изменение оптических свойств метаповерхности, происходящее в процессе эволюции возбужденного резонансного состояния структуры, приводит к модификации интенсивности третьей оптической гармоники, сгенерированной в аморфном германии. В этом случае сигнал третьей гармоники демонстрирует сдвиг центральной длины волны в коротковолновую область на 10 нм (который соответствует изменению частоты 3.05ω по сравнению с невозмущенным нелинейным сигналом 3ω) и уширение спектра 40% в течение 100 фс.

В Заключение приведены основные результаты работы.

Диссертационная работа В.В. Зубюк довольно хорошо структурирована, поставленные в диссертационной работе цели можно считать достигнутыми, а задачи — выполненными.

Выводы и положения, сформулированные в диссертации, являются новыми, оригинальными и достаточно обоснованными. Экспериментальные результаты, представленные в работе, получены на

современном оборудовании и находятся в согласии с проведенными расчетами и существующими литературными данными, что свидетельствует об их **достоверности**. Результаты выполненных работ неоднократно докладывались на научных конференциях, опубликованы в 5 статьях в высокорейтинговых журналах и в 1 патенте, что также свидетельствует об их практической значимости.

Полученные результаты, безусловно, **актуальны** поскольку наблюдаемые в диссертации эффекты имеет принципиальное значение для развития интегральной оптики и нелинейной фотоники. Кроме того, использование таких материалов как арсенид галлия и германий для разработки пассивных и активных устройств фотоники обладает несомненным преимуществом, заключающемся в совместимости со стандартными этапами производства современной микроэлектроники.

По тексту диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. В задачах диссертации фигурирует «..изготовление полупроводниковых метаповерхностей», что, как видно, из текста диссертации выполнялось не диссертантом, а коллегами из зарубежной лаборатории.
2. Физически необоснованным выглядит отсутствие указания во 2-ом защищаемом положении на режим воздействия, а именно интенсивности и близости длины волны воздействующего излучения к ЭД или МД резонансу метаповерхности. Сформулированное в таком виде защищаемое положение может быть легко опровергнуто и поэтому требует изменения формулировки.
3. В части представления экспериментальных данных измеряемые величины должны быть приведены с погрешностями и доверительными интервалами. На протяжении всего текста диссертации погрешности измерений по преобладающей части экспериментов отсутствуют, а источник этих погрешностей не обсуждается вовсе. Подтверждением

этому является то, что результаты измерения длительности с помощью АКФ интенсивности диссертант приводит с точностью до единиц фемтосекунд, а именно 79 фс (см стр. 128, в конце раздела 3.3.2).

4. В поведении коэффициента отражения метаповерхности в зависимости от интенсивности падающего света (Рис. 2.12 на стр. 93) наблюдаются несколько «перегибов», которые не могут быть описаны одноэкспоненциальным уменьшением коэффициента поглощения. Этот момент не обсуждён в тексте диссертации, а может являться принципиальным с точки зрения установления влияния линейных (нагрев) и нелинейных (генерация свободных носителей заряда) эффектов на рассматриваемые процессы.
5. Теоретическое описание наблюдаемых явлений в динамике происходит без учёта частотной зависимости диэлектрической проницаемости вблизи резонансов, что является источником временной дисперсии и требует учёта эффектов нелокальности нелинейного отклика. Также, используемые модели для описания динамики возбуждения и релаксации носителей заряда в метаповерхностях содержат нелинейные члены (уравнение 3.3 на стр. 147), физический смысл которых остаётся непонятен из текста диссертационной работы.
6. Диссертационная работа явно перегружена экспериментальными данными (подтверждением этому является то, что на 222 страницы текста присутствует 102 рисунка), что не позволяет сосредоточиться на предметном и глубоком описании наблюдаемых эффектов. В конце глав отсутствуют промежуточные выводы по работе, что, конечно, требовалось привести хотя бы в тезисном виде, чтобы в заключении были даны наиболее значимые выводы по работе. Названия некоторых разделов диссертационной работы просто обескураживают. Например, «Определение максимальной мощности накачки для метаповерхностей», «Юстировка схемы “накачка-зондирование” с разными оптическими

частотами и определением длительности импульса параметрического усилителя света». В разделе 3.3.4 диссертант пользуется понятиями «непертурбативного» и «значительного пертурбативного» режима воздействия излучения на полупроводниковую метаповерхность, но не определяет их. Также в тексте диссертационной работы присутствуют жаргонизмы, опечатки, стилистические ошибки, неудачно сформулированные, а иногда и вовсе некорректные по физическому смыслу утверждения. Например, «..отклонение луча и управление фазой видимого света..», «..концепция ускорения фотонов...», «..Экспериментальная самомодуляция отражения метаповерхности...», «..фотогенерация...», «...однородная модуляция зондирующего излучения...», «..инжектированная плазма...».

Вместе с тем, указанные замечания в целом не снижают значимости представленной к защите диссертационной работы. Диссертация **В.В. Зубюк** 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.

Диссертационная работа **В.В. Зубюк** является законченным и значимым научным исследованием, а соискатель **Зубюк Варвара Владимировна** заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей физики и волновых процессов
физического факультета Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

Потемкин Фёдор Викторович

« 18 » февраля 2025

Контактные данные:
тел.: +7(495)9395318, e-mail: potemkin@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
1.3.19. Лазерная физика

Адрес места работы:
119991, ГСП-1, Москва,
Ленинские горы, д. 1, стр. 62

Подпись Потёмкина Фёдора Викторовича заверяю:
Стремоухов Сергей Юрьевич
Учёный секретарь физического факультета Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова, д.ф.-м.н., профессор