

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

Диссертационная работа В.В. Зубюк посвящена экспериментальному исследованию линейно- и нелинейно-оптических эффектов, индуцированных в полупроводниковых метаповерхностях фемтосекундными лазерными импульсами, и их сверхбыстрой динамике. Исследован эффект насыщения краевого поглощения в метаповерхностях на основе арсенида галлия и продемонстрирована зависимость модуляции отражения фемтосекундных лазерных импульсов от таких метаповерхностей при возбуждении магнитодипольного Ми-резонанса в зависимости от интенсивности излучения накачки. Представлены результаты экспериментов по спектрально-временной модуляции линейно- и нелинейно-оптического отклика метаповерхностей на основе арсенида галлия и германия с Ми-резонансами.

Разработка и изучение новых функциональных оптических материалов с заданными характеристиками – метаматериалов, практически используемых в виде оптически «тонких» метаповерхностей нанометровой толщины – является важным, революционным направлением развития фотоники. Метаповерхности позволяют управлять волновым фронтом и поляризационным состоянием световых волн, преобразовывать спектр и изменять интенсивность лазерного излучения, в том числе – динамически. Метаповерхности на базе полупроводниковых материалов, по сравнению с

металлами, могут быть изготовлены в рамках существующих технологий полупроводниковой промышленности, обладают малыми потерями и высокими добротностями Ми-резонансов электрического и магнитного типа, а также возможностью модуляции диэлектрической проницаемости материала под неразрушающим действием интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с низкой энергией. В результате, линейно- или нелинейно-оптический резонансный отклик метаповерхностей испытывает сильную сверхбыструю спектрально-временную модуляцию, которую можно использовать для разработки высокоскоростных оптических устройств передачи и обработки информации, элементов лазерной техники, оптических сенсоров. В этой связи **актуальность** диссертационной работы Зубюк Варвары Владимировны, посвященной исследованию сверхбыстрых линейно- и нелинейно-оптических резонансных эффектов в метаповерхностях арсенида галлия и германия как традиционных материалов полупроводниковой промышленности, несомненна.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав (обзора литературы и трех оригинальных глав), заключения, списка сокращений и списка литературы. Объем составляет 222 страницы, включая 102 рисунка и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 145 наименований.

Во введении изложены актуальность исследования и степень разработанности темы, сформулированы задачи и приведены защищаемые положения.

В первой главе диссертационной работы дан достаточно подробный обзор места наноантенн и построенных из них метаповерхностей в современной фотонике, сравниваются ключевые характеристики металлических и диэлектрических метаповерхностей, рассматриваются резонансы Ми-типа и возможности управления ими с помощью размерных эффектов и динамического изменения оптических свойств материала для

реализации и исследования различных процессов линейно- и нелинейно-оптической спектрально-временной модуляции характеристик пробного излучения.

Две первые оригинальные главы посвящены экспериментальному исследованию оптических эффектов в полупроводниковых метаповерхностях на основе GaAs. **Во второй главе** исследован эффект насыщения краевого поглощения в нескольких типах резонансных метаповерхностей, более выраженный по сравнению с подложкой и неструктурированной пленкой арсенида галлия, и продемонстрирована сильная, но насыщающаяся зависимость коэффициента отражения фемтосекундных лазерных импульсов накачки при возбуждении магнитодипольного резонанса Ми-типа вблизи края запрещенной зоны полупроводника в зависимости интенсивности излучения. Приведена феноменологическая модель насыщения коэффициента отражения при увеличении интенсивности излучения накачки, рассмотрены основные процессы и выполнено численное моделирование сверхбыстрого изменения коэффициента отражения, показано высокое место изученных образцов метаповерхностей в ряду известных типов насыщающихся поглотителей.

В третьей главе продемонстрирован эффект разнополярной спектрально-временной модуляции коэффициента отражения фемтосекундных лазерных импульсов «красного» крыла суперконтинуума в метаповерхностях при возбуждении электро- и магнитодипольных Ми-резонансов в ближней ИК-области под действием фемтосекундного импульса накачки с центральной длиной волны 800 нм и варьируемой интенсивностью. При максимальной интенсивности накачки ниже порога разрушения на масштабах порядка 1-2 пс получена амплитуда относительной модуляции коэффициента отражения, достигающая 90% на

«синем» крыле магнитодипольного резонанса. Проведены расчеты и проанализированы возможные механизмы релаксационных процессов.

Исследования, описанные в **четвертой главе**, посвящены полностью оптическому сверхбыстрому линейному и нелинейному переключению в метаповерхностях на базе аморфного германия. В сравнении с неструктурированной германиевой пленкой исследована спектрально-временная линейная модуляция коэффициента пропускания фемтосекундных лазерных импульсов суперконтинуума под действием интенсивного фемтосекундного импульса накачки с центральной длиной волны 800 нм при возбуждении высокодобротных коллективных резонансов Ge-метаповерхностей в ближней ИК-области (1450-1700 нм), а также нелинейная модуляция на частоте третьей гармоники в пропускании. Показан субпикосекундный сдвиг в коротковолновую область под действием мощного фемтосекундного лазерного импульса накачки центральной длины волны линейного и нелинейного сигнала. Проведены расчеты модуляции излучения по теории связанных мод, которые хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

На основании изложенных в диссертации результатов формулируются выводы и положения, которые в целом обоснованы. Новизна и значимость представленных в работе результатов отражена в достаточном количестве научных статей, опубликованных в журналах с высоким индексом цитирования, результаты представляют значительный практический интерес. Кроме того, результаты экспериментальных исследований выполнены на современном оборудовании, находятся в хорошем соответствии с проведёнными расчетами и неоднократно докладывались на российских и международных научных конференциях, что свидетельствует об их достоверности.

Автореферат диссертации дает необходимое представление о полученных результатах диссертационной работы, правильно отражает ее содержание и соответствует тексту диссертации.

Диссертационная работа Зубюк В.В. достаточно хорошо структурирована и при прочтении оставляет впечатление завершеного научного исследования. Поставленные в диссертации задачи можно в полной мере считать выполненными.

Несмотря на чрезвычайно высокий экспериментальный уровень выполненной работы, можно отметить следующие недостатки:

1. В главе 2 центральная длина волны фемтосекундной лазерной накачки 800 нм попадает в электродипольный Ми-резонанс метаповерхности (iii) на основе GaAs, но анализ эффектов локального усиления поля накачки и такого резонансного возбуждения на линейное и нелинейное (двухфотонное [Kadlec, F., Němec, H., & Kužel, P. (2004). Optical two-photon absorption in GaAs measured by optical-pump terahertz-probe spectroscopy. *Physical Review B* 70(12) 125205; Furey, B. J., Barba-Barba, R. M., Carriles, R., Bernal, A., Mendoza, B. S., & Downer, M. C. (2021). Im $\{\chi(3)\}$ spectra of 110-cut GaAs, GaP, and Si near the two-photon absorption band edge. *Journal of Applied Physics* 129(18) 183109]) возбуждение метаповерхности, плотность генерируемой электрон-дырочной плазмы отсутствует. Необходимость такого анализа с учетом резонансных и нелинейных эффектов связана, в том числе, с повреждением метаповерхности при величинах интенсивности накачки, отвечающей области насыщения линейного поглощения.

2. Аналогичный анализ напрашивается в главе 3, где центральная длина волны фемтосекундной лазерной накачки 800 нм может попадать в Ми-резонансы метаповерхности на основе GaAs, и это может влиять на

интерпретацию кинетики релаксации сверхбыстрого линейного отклика, в частности – электрон-дырочной плазмы.

3. Название главы 4 «Фемтосекундное преобразование частоты в метаповерхностях на основе аморфного германия» и пункта 4.4 «Преобразование частоты в метаповерхностях из аморфного германия с внутриимпульсным изменением диэлектрической проницаемости», включая подпункты 4.4.1 для линейного и 4.4.2 для нелинейного случая, представляется не совсем корректным – исходно более коротковолновые компоненты присутствуют в спектре падающего пробного импульса и за счет спектрально-временной модуляции спектра пропускания метаповерхности появляются в прошедшем излучении, в том числе – в спектре третьей гармоники. Описанные эффекты по сути правильно названы в подписи к Рис.1.14 литературного обзора – «самоиндуцированное синее смещение гармоник в нелинейной полупроводниковой инфракрасной метаповерхности».

4. В оформлении текста встречается некоторая небрежность – в главе 2 нет таблицы, где были бы сведены параметры всех использованных метаповерхностей (i-iv), в разных главах для описания близких эффектов фотовозбуждения используются различные величины – интенсивности, плотности энергии и мощности, есть опечатки в формуле 1.8 (нет числителя), на с. 169 плотность энергии пробного фемтосекундного лазерного излучения для приведенных параметров (длина волны в диапазоне 1582-2600 нм, частота следования – 1 кГц, средняя мощность – 40 мВт, размер фокального пятна – 50 мкм) соответствует непривычно большой величине $\approx 1 \text{ Дж/см}^2$.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости данного фундаментального диссертационного исследования. 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:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной нанофизики и биомедицины Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Кудряшов Сергей Иванович

«04» февраля 2025

Контактные данные: тел.: +7(499) 132-60-83, e-mail: sikudr@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Подпись сотрудника Сергея Ивановича Кудряшова удостоверяю:

Ученый секретарь ФИАН

Колобов А.В.