

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Колчина Александра Валерьевича
на тему: «Структурные, оптические и электрофизические свойства
фазопеременных пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, облученных фемтосекундными
лазерными импульсами»
по специальности 1.3.11 Физика полупроводников**

Диссертационная работа Колчина Александра Валерьевича «Структурные, оптические и электрофизические свойства фазопеременных пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, облученных фемтосекундными лазерными импульсами» посвящена активно развивающемуся направлению воздействия лазерного излучения на аморфные полупроводниковые материалы – структурированию поверхности фазопеременных материалов (ФПМ) на основе тонких халькогенидных пленок ультракороткими лазерными импульсами. Фазопеременные материалы характеризуются возможностью быстрого и обратимого переключения между устойчивыми аморфным и кристаллическим состояниями, что позволило найти им применения в устройствах хранения и обработки данных, устройствах, модулирующих параметры лазерного излучения, других приложениях интегральной оптики и нанофотоники. Явления, связанные с модификацией фазопеременных материалов ультракороткими импульсами (в том числе фемтосекундной длительности), расширяют возможности использования ФПМ, однако процессы лазерного наноструктурирования поверхности ФПМ и лежащие в их основе физические механизмы изучены недостаточно, что обеспечивает актуальность диссертационной работы А.В. Колчина.

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключения и Списка цитируемой литературы, содержащего 113 источников.

Введение дает краткую информацию об актуальности выбранной тематики, в этом разделе также изложены цели и основные научные задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, приведены защищаемые положения, представлена информация об апробации работы на профильных конференциях, перечислены публикации, в которых опубликованы результаты диссертационной работы, выделен личный вклад соискателя.

В первой главе представлен литературный обзор, дающий представление об основных характеристиках фазопеременных полупроводников на основе тройного халькогенидного соединения $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225), его применениях для устройств энергонезависимой памяти и перестраиваемой нанофотоники. Также в первой главе присутствует раздел, описывающий явления при фемтосекундном лазерном воздействии на тонкие пленки GST225, в котором наиболее подробно рассмотрено формирование лазерно-индуцированных поверхностных структур (ЛИПС), появляющихся на GST225 при воздействии ультракоротких лазерных импульсов. Описываются возможные подходы к выяснению механизмов фазовых трансформаций в фазопеременных материалах и формирования ЛИПС.

Во второй главе описано получение и характеристика тонкопленочных образцов аморфного GST225, подробно изложены методы и подходы к лазерному воздействию на тонкие пленки GST225 и методы исследования свойств модифицированных образцов. Кроме того, описаны используемые методы моделирования.

Глава 3 посвящена исследованиям модификации поверхности пленок GST225 с различной слоистой архитектурой фемтосекундными лазерными импульсами при различных параметрах лазерного воздействия.

Продемонстрировано формирование ЛИППС, ориентированных перпендикулярно поляризации структурирующего лазерного излучения для GST225 на диэлектрической и металлической подложках. Приводится анализ формирования ЛИППС в рамках плазмон-поляритонного механизма (модель Сайпа–Друде–Бонзе) и термокапиллярного механизма. Для необлученных и модифицированных пленок GST225 продемонстрированы спектры комбинационного рассеяния света, подтверждающие фазовые трансформации. Представлено моделирование динамики нагрева и остывания пленок GST225 при фемтосекундном лазерном воздействии в рамках двухтемпературной модели.

В четвертой главе приведены результаты исследования анизотропии отражения и проводимости модифицированных фемтосекундными импульсами образцов при формировании периодических поверхностных структур. Показано увеличение удельной проводимости пленки вдоль кристаллических линий сформированных структур на 1-5 порядков величины.

В заключении собраны полученные в диссертационной работе научные результаты.

Выделим следующие наиболее важные, на мой взгляд, результаты данной работы:

- 1) Показано, что фемтосекундное воздействие с длиной волны 1250 нм и различной плотностью энергии приводит к формированию на тонких пленках GST225 различных типов ЛИППС, ориентированных ортогонально поляризации структурирующего излучения. Формирование структур с периодом близким длине волны объясняется механизмом поверхностных плазмон-поляритонов при фотовозбуждении носителей заряда и изменением

комплексной диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя. Формирование упорядоченных вытянутых кластеров с периодом меньшим длины волны структурирующего излучения связывается с самоорганизацией при переносе вещества в расплаве.

2) Фазовые состояния в облученных пленках GST225 зависят от числа воздействующих лазерных импульсов. При увеличении числа импульсов от 3 до 300 наблюдается рост доли кристаллической фазы. Трансформация облучаемой области при большем числе импульсов (от 300 до 750) связывается с реаморфизацией закристаллизованной области. Данные фазовые трансформации пленок GST225 объяснены в рамках двухтемпературной модели переходом из аморфной фазы в состояние с гранецентрированной кубической решеткой или обратным переходом. При дальнейшем увеличении числа импульсов наблюдались квазиупорядоченные продолговатые кластеры с периодом менее 200 нм.

3) Проанализировано влияние ЛИППС на оптические свойства и проводимость модифицированных пленок GST225. Анизотропия коэффициента отражения для двух взаимно перпендикулярных поляризаций достигает 4% в диапазоне 900–1900 нм. Результаты численного моделирования в рамках обобщенной модели Бруггемана согласуются с формированием чередующихся аморфных и кристаллизованных областей. Удельная проводимость вдоль полос сканирования на 1–5 порядков больше, чем проводимость в ортогональном направлении, что объясняется наличием закристаллизованных каналов с высокой электропроводностью и наличием аморфных немодифицированных областей.

Представленные результаты и положения, выносимые на защиту, **обладают достаточной новизной**, результаты получены соискателем впервые. **Достоверность** результатов подтверждается применением

обоснованных методик получения экспериментальных данных, использованием современных подходов к микроскопическому анализу модифицированных объектов, интерпретацией результатов на основе признанных теорий и моделей. **Новизна и достоверность** научных результатов также подтверждаются апробацией работы на 15 докладах на научных конференциях, 5-ю публикациями в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, 1 статьёй в рецензируемом научном журнале издательства MDPI. Сформулированные в диссертации научные выводы и положения, выносимые на защиту, являются **обоснованными**.

Автореферат в полной мере отражает материал диссертации.

Однако следует отметить, что диссертационная работа не лишена недостатков. Основными, на мой взгляд, являются:

1) Согласно объяснению раздела 3.2.4., появление ЛИППС на периферии пучка (на рис. 3.3б) связывается с индуцированием плазмон-поляритонной волны и последующей её интерференцией с падающим пучком. Параллельно, в центральной области пучка формирование ЛИППС объясняется плавлением GST225 и проявлением термокапиллярного механизма. Как можно объяснить на рис. 3.3б отсутствие границы раздела расплавленной области с термокапиллярными ЛИППС и области с плазмон-поляритонными ЛИППС, формирующимися при температурах ниже температуры плавления материала?

2) В разделе 2.1 упоминается Оже-спектроскопия в качестве метода контроля элементного состава исследуемых пленок. Однако далее в тексте полученные с помощью Оже-спектроскопии результаты не приводятся.

3) В диссертационной работе присутствует небольшое количество опечаток и неудачных формулировок. Например, несколько раз в тексте встречается транслитерация англоязычной аббревиатуры “ЛИПСС” вместо “ЛИППС” (стр. 8, стр. 57, стр. 108). Используется словосочетание “нагрев температуры решетки” вместо “нагрев решетки” (стр. 40). Применяется словосочетание “численная апертура” вместо “числовая апертура” (стр. 49).

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

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.11 Физика полупроводников (по физико-математическим наукам), а именно следующим ее направлениям: Структурные и морфологические свойства полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе; Электронный транспорт в полупроводниках и композиционных полупроводниковых структурах; Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках и в композиционных полупроводниковых структурах; Неравновесные явления в полупроводниках и структурах. Электронная плазма; Некристаллические полупроводники. Органические полупроводники; Моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах; Разработка физических принципов работы приборов на базе полупроводниковых материалов и композиционных полупроводниковых структур. Содержание диссертации также соответствует критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, и 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 Колчин Александр Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 Физика полупроводников.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,
высококвалифицированный старший научный сотрудник
Отдела оптики низкотемпературной плазмы
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук»

Смаев Михаил Петрович



«06» марта 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7(903)182-86-49, e-mail: smayev@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защита диссертация:

01.04.05 «Оптика»

Адрес места работы:

119991 ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д.53

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

Отдел оптики низкотемпературной плазмы

Тел.: +7 (499) 132-65-54; e-mail: office@lebedev.ru

Подпись М.П. Смаева удостоверяю

Помощник директора ФИАН по научной работе,
доктор физ.-мат. наук



Савинов Сергей Юрьевич

«06» марта 2024 г.