

**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 посвящена изучению структурных, оптических и электрофизических свойств, облученных фемтосекундными лазерными импульсами халькогенидного стеклообразного полупроводника  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST225), широко востребованного в качестве базового материала в приложениях энергонезависимой и перезаписываемой памяти, а также реконфигурируемой нанофотоники и нейроморфных систем. Столь повышенный интерес обусловлен тем, что аморфная и кристаллическая фазы GST225 демонстрируют значительную разницу между оптическими и электрофизическими свойствами. Фазовые переходы из одного состояния в другое могут происходить в результате внешних тепловых, электрических или оптических воздействий и являются обратимыми. Наиболее быстро такие переходы могут быть реализованы при применении фемтосекундных лазерных импульсов.

Дополнительно фемтосекундное лазерное облучение позволяет формировать на полупроводниковой поверхности микро- и наноструктуры, расширяя возможности управления свойствами материала и его использования для создания компонентной базы микроэлектроники и фотоники. Данная технология получила название прямой фемтосекундной лазерной записи и не требует использования фоторезиста и специальных масок, используемых в традиционных литографических методах.

Однако, несмотря на перспективность рассматриваемой в диссертации технологии, недостаточно работ посвящено фундаментальному исследованию механизмов и процессов, приводящих к формированию микро- и нанорельефа

на поверхности GST225 под действием фемтосекундных лазерных импульсов, в частности так называемых лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС). Также требуется найти и объяснить взаимосвязи между лазерно-индуцированными фазовыми переходами, упорядоченным микро- и наноструктурированием рельефа, оптическими и электрофизическими свойствами тонких облученных пленок GST225. Решению этих **актуальных задач** посвящена диссертационная работа А.В. Колчина.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего в себя 119 ссылок.

**Введение** дает краткую информацию об актуальности темы, постановке целей и задач диссертационного исследования, новизне, личном вкладе автора, достоверности и практической значимости работы.

**В первой главе** представлен обзор литературы, посвященный основным свойствам GST225, использованию устройств и компонентов на его основе в приложениях, а также результатам воздействия фемтосекундными лазерными импульсами на тонкие пленки на основе данного материала. Описаны основные механизмы, наиболее релевантные для интерпретации наблюдаемых экспериментальных результатов по фазовым переходам и структурированию тонких пленок GST225. В конце первой главы сформулированы основные выводы из литературного обзора, а также поставлены задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** описана технология формирования исходных аморфных тонких пленок GST225 и стратегии их последующего фемтосекундного лазерного облучения. Перечислены экспериментальные методы и оборудование для изучения структурных, оптических и электрофизических свойств полученных образцов. Отдельное внимание уделено теоретическим подходам описания фазовых переходов и формирования ЛИППС.

**В третьей главе** представлены результаты исследования влияния воздействия фемтосекундных лазерных импульсов на структурные свойства аморфных тонких пленок GST225. Обнаружено, что тип формируемых ЛИППС зависит от плотности энергии лазерных импульсов, времени экспозиции и коэффициента отражения подложки. Формируются различные типы ЛИППС: решетки, островковые пленки и нанокластеры. Проводится моделирование поверхностных решеток, формирующихся в результате возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов. Возникновение островковых пленок и нанокластеров объясняется термокапиллярными процессами в лазерно-индуцированном расплаве: эффектом Марангони и неустойчивостью Рэлея–Плато. С помощью моделирования в рамках двухтемпературной модели объясняются наблюдаемые фазовый переход в гранецентрированную кубическую фазу при малых временах экспозиции и реаморфизация при длительном облучении и превышении порога плавления GST225.

**Четвертая глава** посвящена изучению искусственной анизотропии в тонких пленках GST225 после их фемтосекундного лазерного облучения. С помощью метода матриц переноса и модели эффективной среды делается анализ анизотропии отражения, наблюдаемой в диапазоне длин волн 900–1900 нм из-за наличия ЛИППС. Описываются результаты измерений удельной проводимости в плоскости облученной пленки в направлениях вдоль и поперек полос сканирования лазерным лучом. Дается объяснение наблюдаемой анизотропии проводимости, основанное на учете кристаллизации GST225 в областях сканирования лазерным лучом и аморфных барьеров вне этих областей.

**В заключении** представлены полученные в диссертационной работе научные результаты.

Отмечу, на мой взгляд, наиболее важные из них:

- 1) Фемтосекундное лазерно-индуцированное формирование поверхностных решеток с близким к длине волны структурирующего

излучения периодом в тонких пленках GST225 сопровождается кристаллизацией и согласуется с теорией Сайпа–Друде–Бонзе, учитывающей фотоиндуцированную генерацию плазмон-поляритонов в полупроводнике.

2) Возникновение квазиупорядоченных островковых пленок и нанокластеров с субволновыми периодами происходит параллельно вместе с реаморфизацией, происходящей при лазерно-индуцированном нагреве выше температуры плавления GST225 и последующем быстром остывании расплава.

3) Наличие ЛИППС в тонких пленках GST225 обуславливает их анизотропию отражения с контрастом до 4% в ближнем инфракрасном диапазоне.

4) Растровый режим облучения тонких пленок GST225 фемтосекундными лазерными импульсами приводит к формированию закристаллизованных каналов, проводимость вдоль которых в диапазоне температур 200 – 400 К на 1–5 порядков выше по сравнению с проводимостью в перпендикулярном направлении за счет наличия необлученных областей в аморфной фазе между этими каналами.

Представленные результаты и выносимые на защиту положения **обладают достаточной новизной**, получены соискателем впервые. Помимо этого, их **новизна и достоверность** подтверждается апробацией работы на 15 докладах на научных конференциях, и в 6 публикациях в рецензируемых журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus, РИНЦ и иных библиографических базах данных.

**Автореферат** в полной мере отражает материал диссертации.

Представленные в работе результаты и выводы являются **достаточно обоснованными**.

Однако, диссертация не избавлена от недостатков, выделю наиболее существенные на мой взгляд:

1. По какой-то причине автор не стал выделять в каждой главе заключение, из-за этого возникают трудности с восприятием текста при переходе от

одной к другой оригинальной главе, потому что переход случается внезапно, без ощущения завершенности главы.

2. Автор приводит во многих случаях, достаточно логичные выводы из наблюдаемых явлений, но неясной причине, ни разу не подтверждает свои логические аргументы практическими результатами. Приведу самый яркий пример, из главы 3 (стр. 60): «Такое отличие может быть объяснено следующим образом. Глубина проникновения излучения с длиной волны  $\lambda=1250\text{нм}$  в аморфном GST225 составляет  $1/\alpha \approx 400\text{нм}$ , которая значительно больше толщины облучаемой аморфной тонкой пленки 130нм. Как следствие, существенный вклад в структурирование поверхности может оказывать излучение, отраженное от границы между тонкой пленкой и металлическим или диэлектрическим подслоем на подложке.»

Для подтверждения истинности данного заявления необходимо было или изменить длину волны лазера, или же поменять толщину образца, однако ни того, ни другого сделано не было.

3. Собственно, во второй главе автор указывает, что используются образцы с толщинами 130 и 200нм, не приводя при этом никакого обоснования для толщины пленки GST225.
4. В диссертации автор достаточно подробно оценивает развитие неустойчивостей Марангони и Рэлея-Плато, однако, оппонент так и не нашел основных формул оценки по расчету инкремента неустойчивости, более того, развитие эффекта Марангони определяется знаком производной коэффициента поверхностного натяжения от температуры, что будет задавать направление движения расплава. Данный вопрос автор обошел своим вниманием.
5. В главе 4 (стр. 101) автор пишет: «Хотя точного совпадения расчетных и экспериментальных спектров отражения зарегистрировано не было даже при дополнительном варьировании параметра  $f_c$  в диапазоне 0.25–0.75, можно утверждать, что наличие ЛИППС позволяет характеризовать

модифицированную поверхность GST225 как отрицательный одноосный кристалл.», однако, для утверждения необходимо было оценить точность совпадения данных.

6. Изучение удельной проводимости после лазерной модификации образцов, очень интересный результат, который к сожалению, не раскрыт полностью. Для утверждения о влиянии на проводимость сформированных кристаллизованных каналов необходимо было измерить такую проводимость непосредственно вдоль одного канала, и показать рост проводимости с ростом числа каналов, чего сделано не было.

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:

доктор физико-математических наук,  
проректор по научной работе и цифровому развитию  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»

Кучерик Алексей Олегович



06.01.2024

Контактные данные:

Тел.: +7 (4922) 47-99-31, e-mail: [kucherik@vlsu.ru](mailto:kucherik@vlsu.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защита диссертация:

01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

600000 г. Владимир, ул. Горького, д. 87,

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых

Тел.: +7 (4922) 47-96-06 , e-mail: [prkom@vlsu.ru](mailto:prkom@vlsu.ru)

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» А.О. Кучерика удостоверяю:

