

**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 полупроводниковых пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225), фазовые состояния и рельеф которых могут быть изменены в результате воздействия фемтосекундными лазерными импульсами. Выбор халькогенидных полупроводниковых пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в качестве объекта исследований обусловлен значительной разницей между оптическими и электрофизическими свойствами в аморфной и кристаллической фазах. Кроме того, между аморфной и кристаллической фазами наблюдаются обратимые переходы, которые могут быть вызваны нагревом пленок, приложением напряжения с последующим протеканием тока или оптическим воздействием. Фемтосекундное лазерное облучение является наиболее перспективным оптическим методом воздействия на пленки с точки зрения наиболее быстрой реализации фазовых переходов в полупроводниковых пленках GST225. Значимость решения данной экспериментальной задачи обусловлена потребностью улучшения характеристик оптической памяти, формируемой на основе данного материала.

Фемтосекундные лазерные импульсы помимо инициализации фазовых переходов позволяют формировать поверхностные решетки – лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС), наличие которых вызывает искусственную анизотропию в облученных пленках. С практической точки зрения, формирование поверхностных периодических структур является перспективным при анализе возможностей увеличения плотности записи информации в оптической памяти и создании отдельных элементов интегральной фотоники и наноэлектроники, чувствительных к поляризации падающего света.

Несмотря на имеющиеся работы по фемтосекундному лазерному структурированию тонких пленок GST225, в современной литературе отсутствует последовательное описание механизмов изменения морфологии поверхности, а также исследование взаимосвязи лазерно-индуцированных фазовых переходов с формированием ЛИППС, анализ динамики структурных превращений и объяснение оптической и электрофизической анизотропии облученных пленок. Диссертационная работа А.В. Колчина посвящена экспериментальным

исследованиям и численному моделированию описанных выше вопросов, что обуславливает ее **научную новизну и актуальность**.

Автором получен ряд новых и оригинальных результатов. К ним можно отнести следующее:

1. Установлена связь процессов формирования ЛИППС с лазерно-индуцированными фазовыми переходами.
2. Показано влияние присутствия ЛИППС на оптические свойства облученных аморфных тонких пленок GST225.
3. Установлено, что после фемтосекундного лазерного облучения тонкие пленки GST225 проявляют электрофизическую анизотропию в плоскости образца. Удельная проводимость вдоль полос сканирования на несколько порядков больше, чем в ортогональном направлении.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 125 страниц, включая 38 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 119 наименований.

Во введении сформулированы цель и основные задачи работы, обоснованы актуальность, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту. Приведены данные о личном вкладе автора, достоверности, апробации и практической значимости работы.

В первой главе приведен обзор актуального состояния исследований по тематике работы. Представлен обзор литературы, содержащий описание основных свойств полупроводниковых пленок GST225, анализ особенностей применения устройств и компонентов на его основе. Отдельное внимание уделено результатам по фемтосекундному лазерному облучению тонких пленок на основе исследуемого материала. Проанализированы основные механизмы, используемые для описания наблюдаемых экспериментальных результатов по изучению фазовых переходов и структурированию поверхности исследуемых полупроводниковых пленок. В конце первой главы сформулированы основные выводы из обзора литературы и определены задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлено детальное описание технологий формирования исходных аморфных тонких пленок GST225 и проанализированы основные методы их структурирования фемтосекундными лазерными импульсами. Подробно описаны использованные в работе экспериментальные методики, примененные для изучения структурных, оптических и электрофизических свойств полученных образцов, приведены параметры экспериментальных установок, даны подробные характеристики исследуемых образцов. Приведено обоснование применения теоретических подходов, использованных для численного моделирования: метода Сайпа–Друде–Бонзе, двухтемпературной модели и термокапиллярных механизмов формирования ЛИППС.

В третьей главе представлены результаты влияния фемтосекундного лазерного облучения аморфных тонких пленок GST225 на изменение их фазовой структуры и рельефа поверхности пленок. Показано, что период и морфология ЛИППС зависят от числа импульсов и плотности энергии в них, а также от коэффициента отражения подложки. Проведено численное моделирование методом Сайпа–Друде–Бонзе, которое позволило объяснить возникновение ЛИППС генерацией поверхностных плазмон-поляритонов при умеренном числе облучающих лазерных импульсов с плотностью энергии вблизи порога абляции. Показано, что при увеличении параметров облучения на поверхности наблюдается формирование квазиупорядоченных структур в виде островковых пленок или нанокластеров за счет возникновения расплава и перераспределения вещества, обусловленного конвекцией Марангони и неустойчивостью Рэля-Плато. Методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, рентгеновской дифрактометрии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии проведено исследование облученных пленок, которое позволило проанализировать структурные изменения, происходящие в изучаемых образцах. На основании расчетов, выполненных в рамках двухтемпературной модели, подтверждены наблюдаемые в эксперименте кристаллизация и реаморфизация тонких пленок GST225. Сделана оценка характерных времен и скоростей переходов между различными поверхностными фазами.

В четвертой главе приведены результаты по изучению анизотропии отражения и проводимости в плоскости облученной пленки GST225. Показано, что анизотропия отражения в ближнем инфракрасном диапазоне объясняется чередованием компонентов ЛИППС в аморфной и кристаллической фазах GST225. Анизотропия проводимости, наблюдаемая в температурном диапазоне 200 – 400 К, связана с транспортом носителей заряда преимущественно по кристаллическим каналам, формируемым вдоль полос сканирования лазерным лучом.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы.

В качестве замечаний по диссертационной работе А.В. Колчина можно отметить следующее:

1. В разделе 2.2.2 Спектроскопия отражения указано, что для анализа влияния анизотропного структурирования на оптические свойства были измерены спектры падающего света, поляризованного вдоль и перпендикулярно полос (следов) сканирования структурирующим лазерным лучом, приведенные на рисунке 2.3.б. На данном рисунке спектры отсутствуют.
2. В разделе 2.3.1 Теория Сайпа-Друде-Бонзе приведено уравнение для расчета концентрации фотовозбужденных электронов. В тексте работы не указано, что за величина $I(t)$, не объясняется почему релаксация учитывается только за счет электрон-электронных столкновений и не обсуждается изменение время релаксации τ_{ee} при модификации поверхности.
3. В разделе 2.3.2 Двухтемпературная модель в таблице 2.3 приведено единое значение времени электрон-фононной релаксации для кристаллического и аморфного кремния, что не соответствует действительности, поскольку данный параметр зависит от структуры решетки.
4. В разделе 3.1.1. Определение порогов абляции тонких пленок в формуле 3.1 введен параметр пороговой энергии. В тексте не обсуждается физический смысл данного параметра.
5. В четвертой главе приведены спектры отражения в ближнем ИК диапазоне исходной и облученной аморфных пленок GST225. На панели (а) проведено сравнение результатов эксперимента с данными численного моделирования. На экспериментальных кривых отсутствуют ошибки, согласие не является хорошим ни количественно, ни качественно. Есть диапазон длин волн, для которого численные значения превосходят экспериментальные, а есть диапазон, для которого наблюдается обратная тенденция. Сравнение экспериментальных данных на панели (б) с данными расчетов на панели (в) также не содержит ни количественного ни качественного соответствия. Экспериментальные данные показывают, что амплитуда пика при большей длине волны

должна быть меньше, чем амплитуда пика при меньшей длине волны. Результаты расчетов дают противоположный результат.

6. Утверждение о возможности фазового перехода под действием сил Ван-дер-Ваальса, сделанное в работе, является весьма спорным и не подкреплено убедительными данными.

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, являющуюся оригинальным и законченным научным исследованием. Полученные результаты являются актуальными, новыми и представляют значительный научный интерес. Актуальность, новизна, практическая значимость, личный вклад автора и достоверность полученных в работе результатов не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в статьях в научных изданиях, входящих в международные базы данных. Материал, изложенный в диссертационной работе, представлен понятно и логически последовательно. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» (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 приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Соискатель Колчин Александр Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

Профессор кафедры физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета, ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова,

доктор физико-математических наук

Владимир Николаевич Манцевич

Контактные данные:

тел.: 8 (495) 939-50-72, e-mail: vmantsev@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.10 – Физика полупроводников

Адрес официального оппонента:

119991 Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, корп. 2

Тел.: 8 (495) 939-50-72

эл. почта: vmantsev@gmail.com

Подпись В.Н. Манцевича удостоверяю

и.о. декана физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

профессор,

доктор физико-математических наук

В.В. Белокуров