



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«МИРЭА – Российский технологический университет»  
**РТУ МИРЭА**

просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119454  
тел.: (499) 215 65 65 доб. 1140, факс: (495) 434 92 87  
e-mail: mirea@mirea.ru, http://www.mirea.ru

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по инновационному развитию

\_\_\_\_\_ А.В. Рагуткин

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

№ \_\_\_\_\_

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» на диссертационную работу **Могунова Ярослава Александровича** «Пикосекундные импульсы деформации в наноструктурах диоксида ванадия со сверхбыстрым фазовым переходом», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

**Актуальность темы диссертационной работы** обусловлена активным развитием пикосекундной акустики – области физики конденсированного состояния, изучающей генерацию и воздействие волновых пакетов высокочастотных когерентных акустических фононов, формирующих импульсы деформации пикосекундной длительности. Такие импульсы используются для фундаментальных исследований механических свойств различных объектов на нанометровом и пикосекундном масштабах. Эффективно использование пикосекундной акустики для исследования наноструктур различных типов, особенно обладающих нетривиальными физическими свойствами: наноструктурированных пленок, сверхрешеток, Ван-дер-Ваальсовых полупроводников, квазидвумерных антиферромагнетиков. С другой стороны, пикосекундные импульсы деформации являются уникальным способом сверхбыстрого воздействия на кристаллическую решётку материалов. Это позволяет использовать их для воздействия на протекание различных физических процессов, таких, как транспорт носителей через интерфейс, прецессия намагниченности, люминесценция (длина волны и квантовый выход), а также для инициирования фазовых превращений.

В представленной работе автор продемонстрированы новые эффекты в области пикосекундной акустики, благодаря использованию сверхбыстрого структурного фазового перехода диэлектрик-металл в диоксиде ванадия. Этот материал представляет практический интерес для оптоэлектроники и микро(нано)системной техники. Механизмы

сверхбыстрого фазового перехода в нем под действием пикосекундных импульсов до настоящего времени остаются невыясненными. Диссертационная работа Могунова Я. А. направлена на повышение эффективности генерации и воздействия пикосекундных импульсов деформации в целом и на определение механизма сверхбыстрого фазового перехода в оксиде ванадия в частности, что расширяет возможности современной пикосекундной акустики.

### **Структура диссертации:**

Диссертационная работа Могунова Я. А. состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 198 страниц, включая 50 рисунков и 2 таблицы.

Во **введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи, а также выносимые на защиту Положения.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвящённый пикосекундной акустике. Приводится подробное описание известных механизмов генерации импульсов деформации, уравнение, описывающее их распространение через кристалл, а также различные методики детектирования таких импульсов. Описаны современные направления развития пикосекундной акустики, достижения и стоящие перед ней вызовы.

**Вторая глава** также носит обзорный характер и посвящена описанию свойств диоксида ванадия. Описаны свойства электронной и решеточной подсистем диэлектрической и металлической фаз, приведены особенности перехода в наноструктурах на основе  $\text{VO}_2$ , описаны возможные механизмы сверхбыстрого фазового перехода. Также присутствует обзор известных на данный момент способов воздействия на сверхбыстрый фазовый переход.

**Третья глава** посвящена использованным в диссертационной работе образцам и экспериментальным методикам. Приводятся результаты подробной характеристики образцов - тонких плёнок  $\text{VO}_2$  на сапфировых подложках различной ориентации. Даны подробные оптические схемы экспериментальных установок, применённых как в основных, так и во вспомогательных экспериментах. Представлены результаты вспомогательных экспериментов, в которых автор дополнительно характеризует морфологию, оптические свойства образцов, параметры термического и сверхбыстрого фазового перехода в исследуемых плёнках диоксида ванадия.

В **четвёртой главе** представлены результаты определения фотоупругих свойств двух эпитаксиальных нанослоёв диоксида ванадия (гранулированной плёнки и отдельно стоящих nanoостровков) в диэлектрической и металлической фазах. Для этого в них инжектировались пикосекундные импульсы деформации, которые детектировались по фотоупругому эффекту с временным разрешением. Приведены экспериментальные результаты, демонстрирующие временные формы фотоупругих откликов по обе стороны фазового перехода для изученных образцов. Показано, что для гранулированной плёнки формы откликов различны для двух фаз материала. Приводятся результаты теоретического анализа, показывающего, что форма наблюдаемых откликов зависит от комплексного

эффективного фотоупругого параметра  $P$  при фиксированных остальных параметрах. Результаты компьютерного моделирования позволили определить области значений  $P$  на комплексной плоскости для начальных значений времени  $t < 30$  пс. В последующем анализе установлено, что данные области более узкие для гранулированной плёнки и не пересекаются для  $\text{VO}_2$  в различных фазах, а также не пересекаются для двух разных образцов  $\text{VO}_2$  в одинаковой фазе. В заключительном параграфе главы объяснены расхождения форм моделированного и экспериментально полученного откликов для  $t > 30$  пс, а также причины совпадения формы откликов для образца с наноструктурами  $\text{VO}_2$  в двух фазах.

В **пятой главе** представлены результаты исследования генерация пикосекундных импульсов деформации при сверхбыстром лазерно-индуцированном структурном фазовом переходе в двух эпитаксиальных плёнках  $\text{VO}_2$  различной толщины. В начале главы описывается методика определения пикосекундной деформации, генерируемой в плёнке  $\text{VO}_2$ , использующая удлинение импульса при нелинейном акустическом распространении через подложку. Выполнено компьютерное моделирование, устанавливающее связь между удлинением и начальной амплитудой импульса деформации. Далее приводятся экспериментально измеренные временные фотоупругие отклики на импульсы деформации, прошедшие через подложку. По сопоставлению длительностей импульсов, полученных экспериментально и при моделировании, определяется амплитуда деформации, сгенерированной в двух плёнках  $\text{VO}_2$  в двух начальных фазах для каждой величины лазерного возбуждения. Производится анализ погрешностей определения амплитуды деформации. Далее приведен подробный анализ вкладов различных механизмов в сгенерированную амплитуду деформации с учётом термоупругого эффекта и деформационного потенциала, что позволяет вычислить вклад от сверхбыстрого фазового перехода. Приводится расчёт лазерно-индуцированного нагрева плёнки  $\text{VO}_2$  при генерации импульса деформации с учётом наличия скрытой теплоты фазового перехода, сравниваются результаты для образцов в двух начальных фазах. В конце главы обсуждены причины не столь ярко выраженных результатов для образца с более тонкой плёнкой  $\text{VO}_2$ , а также сделаны выводы о немонокотонной трансформации решётки при сверхбыстром фазовом переходе, подтверждаемые в литературе.

Последняя, **шестая глава**, посвящена исследованию воздействия пикосекундных импульсов деформации на сверхбыстрый фазовый переход в эпитаксиальных наноструктурах  $\text{VO}_2$ . Описаны особенности эксперимента с двойным возбуждением, фемтосекундным лазерным импульсом и пикосекундным импульсом деформации с амплитудой  $10^{-3}$ . Приведены результаты моделирования временного профиля деформации внутри нанослоя  $\text{VO}_2$ . Для моделирования используются результаты четвёртой главы, дополненные концепцией эффективной скорости звука в наноструктуре, учитывающей влияние эффекта Пуассона на эффективный фотоупругий параметр. Далее приводятся экспериментально измеренные фотоупругие отклики, полученные при различных величинах лазерного возбуждения, отвечающего за полноту сверхбыстрого фазового перехода в  $\text{VO}_2$ , и моменте возбуждения фазового перехода относительно временного распределения деформации в  $\text{VO}_2$ . Описывается процедура выделения вклада динамической деформации в регистрируемый отклик при возбуждении сверхбыстрого

фазового перехода. Данная процедура сначала продемонстрирована для простого случая высокого лазерного возбуждения, обеспечивающего полный фазовый переход во всех наноостровках, и затем применена для случая фазового перехода в части наноостровков. Показан связанный с динамической деформацией вклад в отклики для различных средних мгновенных значений деформации в наноостровках в момент возбуждения сверхбыстрого фазового перехода. Приведён анализ временной зависимости этих вкладов и зависимости их амплитуды от величины лазерного возбуждения сверхбыстрого фазового перехода. В завершении главы приводится феноменологическая модель, объясняющая наблюдаемые в эксперименте эффекты.

В **заключении** приводятся основные результаты работы и список публикаций Могунова Я. А. по теме диссертации.

#### **Научная новизна** результатов работы:

При помощи новой методики, основанной на анализе временной формы оптических откликов на пикосекундный импульс деформации, впервые определены фотоупругие параметры наноразмерного слоя  $\text{VO}_2$  в обеих фазах и показано, что они изменяются при фазовом переходе.

Впервые продемонстрирована генерация пикосекундных импульсов деформации во время сверхбыстрой трансформации кристаллической решётки материала опто-акустического преобразователя при лазерно-индуцированном фазовом переходе первого рода. Проведен анализ вклада сверхбыстрого фазового перехода в фотогенерируемую деформацию в  $\text{VO}_2$  и впервые определена величина этого вклада, генерируемого без рассеяния тепла и составившего  $+4.5 \times 10^{-3}$ . Также показано, что амплитуда генерируемой в  $\text{VO}_2$  динамической деформации достигает большой величины  $\sim 1.6\%$ . Таким образом продемонстрирована высокая эффективность нового материала диоксида ванадия для опто-акустических преобразователей на основе диоксида ванадия.

В диссертационной работе впервые было продемонстрировано воздействие импульса деформации на сверхбыстрый лазерно-индуцированный фазовый переход. Показано, что наличие деформации в нанослое  $\text{VO}_2$ , состоящем из отдельных наноостровков, приводит к изменению количества наноостровков, трансформируемых в лазерно-индуцированную фазу. При этом показано, что знак и величина эффекта определяются значением деформации в момент возбуждения фазового перехода и не зависят от предшествующей и дальнейшей временных форм импульса деформации. Деформация амплитудой  $10^{-3}$  привела к величине эффекта, оценённого как  $\sim 1\%$ .

**Достоверность и обоснованность** полученных в работе экспериментальных результатов определяются применением автором современных, зарекомендовавших себя методик эксперимента и современного оборудования, проверенных феноменологических моделей и программных кодов для компьютерного моделирования, а также непротиворечивостью результатов моделирования и экспериментально полученных результатов. Достоверность результатов подтверждается согласием наблюдаемых свойств сверхбыстрого фазового перехода в  $\text{VO}_2$  и генерируемых импульсов деформации со свойствами, обширно представленными в литературе, а также отсутствием противоречия

между установленными в литературе фактами и представленными в работе выводами.

**Научная и практическая значимость** результатов работы заключается в следующем:

Определённые в работе фотоупругие свойства наноструктур VO<sub>2</sub>, их изменение при фазовом переходе и зависимость от морфологии необходимо учитывать при конструировании наноразмерных устройств различной структуры на основе VO<sub>2</sub>, в которых предполагается использование изменения оптических свойств VO<sub>2</sub> при фазовом переходе. Новый способ определения фотоупругих параметров важен для устройств, в основе работы которых будут использоваться пикосекундные импульсы деформации. Осуществлённая в работе генерация пикосекундных импульсов деформации высокой амплитуды, сопровождаемая большой ( $4.5 \times 10^{-3}$ ) нетермически сгенерированной деформацией, демонстрирует эффективность опто-акустических преобразователей на основе VO<sub>2</sub> и позволит применять высокоамплитудные импульсы деформации для воздействия на объекты и явления, чувствительные к рассеянному теплу. Продемонстрированное влияние быстроменяющейся деформации на сверхбыстрый фазовый переход открывает путь к сверхбыстрой деформационной инженерии, при которой деформация используется для контролируемого изменения свойств материала на нанометровой и пикосекундной шкалах. При этом значения амплитуды и знака деформации «вырезаются» из профиля пикосекундного импульса деформации. Эффект изменения порога фазового перехода вследствие деформации позволит создать управляемые деформацией массивы оптоэлектронных элементов на основе фазового перехода в VO<sub>2</sub>. Важно отметить, что использованные автором методики и принципы применимы и к другим материалам со сверхбыстрым структурным фазовым переходом первого рода.

Результаты диссертационной работы и развитые в ней подходы **рекомендованы к использованию** в фундаментальных и прикладных исследованиях сверхбыстрых процессов в наноструктурах, лазерно-индуцированных фазовых переходов и экспериментальной пикосекундной акустике, проводимых в таких организациях как ФТИ им. А. Ф. Иоффе, МИРЭА, СПбГУ, ИТМО, СПбПУ им. Петра Великого, ФИ им. П. Н. Лебедева, МГУ им. М. В. Ломоносова и др.

**Автореферат** соответствует содержанию диссертационной работы, достоверно и полно отражает основные результаты и выводы.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1) При высочайшем уровне основных экспериментов по исследованию лазерно-индуцированных процессов, общая характеристика образцов вызывает вопросы. Результаты АСМ с хорошим разрешением представлены только для пленок VO<sub>2</sub> на *c*-плоскости сапфира (рис.3.1). Из приведенной гистограммы, на которую ссылается автор, невозможно определить среднеквадратичное отклонение (rms) при том, что все современные программы обработки изображений АСМ автоматически рассчитывают эту величину. Для пленок на *r*-плоскости сапфира (рис.3.2) шероховатость не определена совсем, в связи, видимо, с режимом «высокой скорости» сканирования, применение которого также вызывает вопросы.

2) В заключении раздела 3.1.2. указывается, что метод АСМ не позволил определить толщину пленки  $VO_2$  на  $r$ -плоскости сапфира, поэтому для более точного, чем АСМ, определения толщины использована методика спектральной эллипсометрии. Результатом работы, описанной в п. 3.1.1 являются толщины пленок, полученные при моделировании с учетом шероховатости (50/50 воздух/ $VO_2$ ). Толщины приведены «с включённой половиной шероховатости». К сожалению, чему равна эта «половина», в работе не указано. Поскольку толщина является одним из важнейших параметров для определения фотоупругих постоянных, желательно было бы использовать более адекватный метод определения толщины, например, ПЭМ.

3) Значения эффективных фотоупругих постоянных  $R_{эфф}$  приведены без погрешности (стр. 113), хотя из рисунка 5.2, по-видимому, можно оценку погрешности провести. Поскольку значения  $R_{эфф}$  получены на основе временных зависимостей коэффициента отражения путем сравнения экспериментальных результатов с теоретическими, а в выражения (4.2.-4.5.) для «пикоакустического отклика» входит толщина пленки, то хотелось бы понять, насколько влияет на результат расчета погрешность определения толщины пленки, а также толщина приповерхностного слоя, моделирующего шероховатость («половина шероховатости»).

4) Диссертация написана достаточно грамотно с точки зрения орфографии и пунктуации, однако изобилует стилистическими недочетами: стр. 110 – « на более больших временах», стр. 73 – «определение толщины выращенных плёнок *за счёт* АСМ измерений», стр. 75 - «половина шероховатости» и т.п.

Указанные замечания не противоречат основным выводам работы, не умаляют научной ценности полученных результатов и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

**Апробация работы** проведена на 10-ти российских и международных конференциях, в том числе было сделано три устных доклада на тематических международных конференциях. Результаты диссертационной работы Могунова Я. А. легли в основу четырёх публикаций, входящих в список ВАК и рецензируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, три из которых опубликованы в ведущих мировых журналах по физике конденсированного состояния.

### **Заключение:**

Диссертационная работа Могунова Ярослава Александровича «Пикосекундные импульсы деформации в наноструктурах диоксида ванадия со сверхбыстрым фазовым переходом» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, посвящённую актуальной теме взаимного влияния пикосекундных импульсов деформации и сверхбыстрых фазовых переходов. Полученные в работе результаты и сформулированные положения являются новыми, достоверными и обоснованными, обладают несомненной научной и практической значимостью.

Диссертационная работа Могунова Ярослава Александровича по форме и содержанию полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8 «физика конденсированного состояния» согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автор диссертационной работы Могунов Ярослав Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

Доклад Могунова Ярослава Александровича по материалам диссертации был заслушан и обсуждён на научном семинаре ФКС кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА 20.01.2022. На все вопросы, возникшие во время обсуждения, были получены ответы.

Отзыв ведущей организации подготовила:

Доктор физ.-мат. наук по специальности 05.27.01,  
профессор, профессор кафедры нанoeлектроники,  
заведующий специализированной учебно-научной  
лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий

\_\_\_\_\_ Мишина Елена Дмитриевна

Доктор физ.-мат. наук по специальности 01.04.07,  
профессор, академик РАН,  
заведующий кафедрой нанoeлектроники \_\_\_\_\_

Сигов Александр Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет",

Адрес: 119454 г. Москва, проспект Вернадского, дом 78,  
Телефон: +7 499 215-65-65 доб. 1140  
E-mail: mirea@mirea.ru