



Могунов Ярослав Александрович

**Пикосекундные импульсы деформации в наноструктурах
диоксида ванадия со сверхбыстрым фазовым переходом**

Специальность 1.3.8
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: PhD (приравниваемая в РФ к степени кандидата физико-математических наук)
Калашникова Александра Михайловна
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе.

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Акимов Андрей Владимирович
Школа Физики и Астрономии, Университет Ноттинггема (University of Nottingham).

Официальные оппоненты: **Гиппиус Николай Алексеевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Центр фотоники и квантовых материалов, Сколковский институт науки и технологий, Москва.

Кириллюк Андрей Иванович,
PhD (приравниваемая в РФ к степени кандидата физико-математических наук), профессор,
Руководитель направления физики конденсированного состояния, Лаборатория FELIX, Университет им. св. Радбода Утрехтского (Radboud University), Наймеген, Нидерланды;
Заведующий лабораторией "Спин-фотоника", Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова, Москва, Россия.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет».

Защита состоится "_____" _____ 2022 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.01 при ФТИ им. А. Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе и на сайте <http://www.ioffe.ru/>.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, ученому секретарю диссертационного совета ФТИ 34.01.01.

Автореферат разослан "_____" _____ 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета ФТИ 34.01.01,

PhD

_____ Калашникова Александра Михайловна

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время наиболее интересным и значимым направлением акустики выступает акустика кристаллических тел и наноструктур, что связано с распространением наноразмерных устройств и широким разнообразием акустических явлений в таких объектах. В кристаллах акустические явления описываются при помощи акустических фононов, которые имеют различную поляризацию (продольные и поперечные), а их скорость распространения зависит от кристаллографического направления. Фундаментальные акустические исследования способны как пролить свет на свойства и процессы в кристаллических нанообъектах, так и продемонстрировать новые явления в них. Прикладная акустика выступает неразрушающим методом характеристики упругих свойств и особенностей кристаллических нанообъектов, а также позволяет осуществлять управляемое воздействие на них. Важно отметить, что теоретический предел частот акустических фононов, достигаемый на границе зоны Бриллюэна, определяется расстояниями между атомами и лежит в терагерцовой области. Этот диапазон частот соответствует сверхбыстрым процессам и явлениям, которые находятся в фокусе современной науки.

На сегодняшний день для акустической характеристики и модуляции свойств кристаллических сред широкое распространение получил ультразвук, с частотами соответствующих фононов в мегагерцовом диапазоне. Однако для достижения более высоких частот фононов необходимо использовать специальные методы их генерации, в том числе импульсные. Генерация акустических фононов с частотами в гига- и терагерцовом диапазоне, также называемых «гиперзвуком», осуществляется за счёт преобразования фемтосекундных лазерных импульсов в специальных преобразователях, как правило представляющих собой наноразмерные металлические плёнки или полупроводниковые наноструктуры. Пикосекундная акустика — область физики конденсированного состояния, изучающая генерацию, распространение и воздействие коротких волновых пакетов когерентных гиперзвуковых акустических фононов, представляющих собой пикосекундные импульсы продольной или сдвиговой деформации. Методы пикосекундной акустики перспективны для наноскопии различных объектов и сверхбыстрого управления электронными и оптическими процессами. Для этого необходимы импульсы деформации малой длительности и высокой амплитуды.

Современные методики позволяют генерировать импульсы деформации длительностью несколько пикосекунд и амплитудой ниже 10^{-3} , что соответствует приложению динамического давления порядка десятков МПа. Импульсы такой амплитуды обладают ограниченной эффективностью воздействия на физические свойства твёрдых тел, по сравнению, например, со статическими деформациями на порядок большей амплитуды, применяемых в деформационной инженерии. К тому же, генерация высокоамплитудных импульсов

деформации сопряжена с термическим разрушением опто-акустического преобразователя, что ограничивает предельные амплитуды. По этим причинам, высокую актуальность имеет поиск как новых эффективных механизмов генерации пикосекундных импульсов деформации, так и новых чувствительных механизмов воздействия импульсов деформации на свойства материалов.

В качестве таких механизмов в данной диссертации впервые предложено использовать сверхбыстрые структурные фазовые переходы. Возникающая при структурных фазовых переходах первого рода перестройка кристаллической решётки может сопровождаться изменениями межатомных расстояний, достигающими нескольких процентов. Более того, в ряде материалов такие фазовые переходы можно возбудить на субпикосекундной временной шкале при помощи фемтосекундных лазерных импульсов, реализуя так называемые сверхбыстрые фазовые переходы. В данной диссертации эти значительные изменения параметров кристаллической решётки, происходящие на субпикосекундной временной шкале, предлагается использовать для генерации импульсов деформации.

Фазовые переходы в сильно-коррелированных оксидах могут сопровождаться резким изменением структуры электронных зон, в том числе коллапсом запрещённой зоны в одной из фаз вещества (переходы «диэлектрик-металл»). Если при переходе диэлектрик-металл происходит и структурный фазовый переход, то возникает возможность управлять изменениями электронных зон при помощи деформации, и наоборот. Такой комбинированный фазовый переход (диэлектрик-металл и структурный) тоже может быть индуцирован на сверхбыстрой временной шкале. В связи с этим, в данной диссертации предложено реализовать на основе такого перехода эффективное сверхбыстрое воздействие деформации на изменения электронной структуры — *сверхбыструю* деформационную инженерию.

Примером комбинированного сверхбыстрого фазового перехода является переход в модельном сильно-коррелированном оксиде — диоксиде ванадия VO_2 . В настоящее время предложено множество применений наноструктур на основе диоксида ванадия в электронике, фотонике, а также в наномеханике. Однако влияние динамических деформаций на оптические свойства таких наноструктур до сих пор не изучалось, что ограничивает возможные приложения высокочастотных деформаций для управления свойствами наноустройств на основе VO_2 .

Целью данной работы является демонстрация новых явлений в области пикосекундной акустики в экспериментах с диоксидом ванадия, претерпевающим сверхбыстрый фазовый переход.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику определения фотоупругих параметров наноразмерных плёнок с использованием пикосекундных импульсов деформации.

2. Определить фотоупругие параметры наноразмерных плёнок диоксида ванадия различных морфологий в диэлектрической и металлической фазе.
3. Осуществить генерацию пикосекундных импульсов деформации в наноразмерной плёнке диоксида ванадия при воздействии на неё фемтосекундным лазерным импульсом.
4. Выявить вклад сверхбыстрого фазового перехода в процесс фотогенерации пикосекундных импульсов деформации в наноразмерных плёнках диоксида ванадия.
5. Осуществить одновременное воздействие пикосекундных импульсов деформации и фемтосекундных оптических импульсов на nanoостровках диоксида ванадия.
6. Определить механизм воздействия пикосекундных импульсов деформации на сверхбыстрый фазовый переход в nanoостровках диоксида ванадия.

Научная новизна:

1. Разработана новая методика для определения фотоупругих параметров тонких плёнок с использованием динамической импульсной деформации.
2. Впервые измерена эффективная фотоупругая постоянная диоксида ванадия в диэлектрической и металлической фазе.
3. Впервые обнаружен эффект нетермической генерации пикосекундных импульсов деформации во время фотоиндуцированного сверхбыстрого фазового перехода.
4. Впервые обнаружен эффект, в котором пикосекундный импульс деформации позволяет понижать или повышать порог фотоиндуцированного сверхбыстрого фазового перехода в диоксиде ванадия.

Практическая значимость:

1. Информация о фотоупругих параметрах наноразмерных плёнок диоксида ванадия и их изменение при фазовом переходе, полученные с использованием высокочастотных акустических фононов, важна при разработке наноустройств, работающих на основе изменения оптических свойств VO_2 при фазовом переходе и сопряжённых с возникновением высокочастотных деформаций — как намеренно прикладываемых к наноустройству, так и возникающих вследствие иных воздействий, таких как лазерное возбуждение сверхбыстрых процессов. Также при разработке таких устройств необходимо учитывать показанную в настоящей работе зависимость фотоупругих свойств нанослоёв VO_2 от их морфологии.
2. Разработанный метод определения фотоупругих параметров применим для наноструктур и высокочастотных акустических возбуждений, что делает его полезным для характеристики фотоупругих свойств

как различных частей интегральных наноустройств, так и всего наноустройства целиком.

3. Генерация импульсов деформации высокой амплитуды за счёт сверхбыстрого структурного фазового перехода сопровождается низким нагревом, что позволяет применять пикосекундную акустику для особенно чувствительных к нагреву объектов, тем самым повысив универсальность методики.
4. Продемонстрированная эффективность опто-акустического преобразователя в виде наноразмерной эпитаксиальной плёнки диоксида ванадия, способного генерировать пикосекундную деформацию с амплитудой более процента при плотностях потока энергии возбуждающих лазерных импульсов ~ 10 мДж/см² и переключаться между двумя режимами генерации за счёт изменения фазы материала, делает такие преобразователи привлекательными для задач пикосекундной акустики, связанных с фоновым возбуждением различных процессов и явлений.
5. Показанная возможность контролируемо изменять долю диоксида ванадия, совершающего сверхбыстрый лазерно-индуцированный фазовый переход, за счёт воздействия пикосекундных импульсов деформации открывает возможности для пикосекундной акустики в приборах на основе материалов со сверхбыстрыми фазовыми переходами как средство модуляции или настройки амплитуды изменения средних значений параметров, связанных с переходом (оптических, электрических, механических).
6. Реализованный в диссертационной работе подход сверхбыстрой деформационной инженерии может быть использован для контроля за фазой отдельных нанобъектов из материала с фазовым переходом, позволив конструировать массивы нанозадающих элементов, управляемых импульсами деформации, для применения в качестве переключателей, памяти и прочих.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Значение эффективной фотоупругой постоянной наноразмерных слоёв диоксида ванадия изменяется при фазовом переходе диэлектрик-металл. Нанослои VO₂ с различной морфологией поверхности демонстрируют различные фотоупругие свойства. В диэлектрической фазе для сплошной гранулированной плёнки VO₂ на (001)Al₂O₃ эффективная фотоупругая постоянная равняется двум с пренебрежимо малой мнимой частью, в металлической фазе её значение имеет существенную мнимую часть и находится в согласии с типичными значениями данной величины для других металлов.
2. Опто-акустический преобразователь, представляющий собой плёнку диоксида ванадия толщиной 100 нм на подложке (112)Al₂O₃, находящуюся либо в диэлектрической, либо в металлической фазе, позволяет осуществлять фотогенерацию пикосекундных импульсов деформации

с высокой начальной амплитудой $7\cdot 8\cdot 10^{-3}$ при падающей плотности потока энергии лазерных импульсов 12 мДж/см^2 . Данная величина на порядок превышает амплитуду импульсов деформации, генерируемых в типичных металлических опто-акустических преобразователях при таком же уровне лазерного возбуждения.

3. Сверхбыстрая трансформация кристаллической решётки при лазерно-индуцированном фазовом переходе в плёнке диоксида ванадия толщиной 100 нм на подложке $(112)\text{Al}_2\text{O}_3$ приводит к вкладу в оптически-генерируемую деформацию растяжения, численно равному $4.5\cdot 10^{-3}$. Благодаря наличию данного вклада, фотоиндуцированная генерация динамической деформации амплитудой $\sim 8\cdot 10^{-3}$ осуществляется с сопутствующим нагревом VO_2 всего на 28 К, что в три раза меньше по сравнению с нагревом, сопутствующим генерации деформации той же амплитуды в плёнке VO_2 , изначально находящейся в металлической фазе.
4. Воздействие пикосекундных импульсов деформации приводит к изменению доли наноостровков диоксида ванадия, эпитаксиально выращенных на подложке $(001)\text{Al}_2\text{O}_3$, трансформируемых в неравновесное металлическое состояние фемтосекундным лазерным импульсом. Величина и знак данного изменения определяются мгновенным значением деформации, присутствовавшим в наноостровках VO_2 в момент лазерного возбуждения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных, отлаженных и зарекомендовавших себя методик измерений, использованием подробно охарактеризованных образцов, а также современных проверенных программных кодов для моделирования результатов экспериментов. Достоверность полученных результатов подтверждается согласием наблюдаемых импульсов деформации и проявлений сверхбыстрого фазового перехода с обширными литературными данными, хорошим согласием между экспериментальными результатами и проведённым моделированием, и непротиворечивостью сделанных заключений известным фактам о генерации импульсов деформации и сверхбыстром фазовом переходе в VO_2 .

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались соискателем лично на 16-ти конференциях и симпозиумах, в том числе на 11-ти международных, в формате стендовых и устных докладов:

- Международная конференция «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 2016г.)
- Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» (Красновидово, 2017г., 2019г., 2021г.)
- Европейская школа по магнетизму («ESM») (Каржез, 2017г.)
- Международная зимняя школа по физике полупроводников (Зеленогорск, 2018г.)
- Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (Сестрорецк, 2018г.)

- Международная конференция «Phonons and PTES» (Нанкин, 2018г.)
- Международная конференция «Laser Ultrasonics» (Ноттингем, 2018г.)
- Международная междисциплинарная конференция «Frontiers of 21st Century Physics and Ioffe Institute» (Санкт-Петербург, 2018г.)
- Международная конференция «META» (Лиссабон, 2019г.)
- Международная конференция «MetaNano» (Санкт-Петербург, 2019г.)
- Международный симпозиум «Нанофизика и Нанoeлектроника» (Нижний Новгород, 2019г.)
- «Russia-UK workshop on magnetization dynamics and picosecond acoustics» (Санкт-Петербург, 2019г.)
- Международная конференция «GRC: Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems» (Багра, 2020г.)

Соискатель выступал на трёх семинарах по теме диссертации: оптическом семинаре университета ИТМО (Санкт-Петербург, 2020г.), семинаре лаборатории высоких магнитных полей (HFML, Nijmegen) (онлайн, 2020г.) и низкоразмерном семинаре ФТИ А. Ф. Иоффе (онлайн, 2021г.). Результаты работы также неоднократно докладывались на рабочих семинарах лаборатории физики ферроиков ФТИ им. А. Ф. Иоффе. По тематике работы соискателем было выиграно два гранта комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга для студентов и аспирантов в 2016 и 2019 году. Данная работа заняла 2-ое место на конкурсе работ молодых учёных ФТИ им. А. Ф. Иоффе за 2019/2020 год.

Личный вклад соискателя заключается в создании всех экспериментальных установок накачки-зондирования, описанных в работе, проведении всех экспериментов по пикосекундной акустике и оптической накачке-зондированию, получении, обработке и анализе экспериментальных данных. Характеризация образцов при помощи оптической и атомно-силовой микроскопии была проведена лично соискателем, эллипсометрические измерения проводились при непосредственном участии соискателя В. С. Левицким (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) и А. В. Муратовым (ФИАН). Соискателем лично проводилось моделирование фотоупругих откликов на импульсы деформации. Соискатель принимал активное участие в интерпретации полученных экспериментальных данных и написании программных кодов. Постановка задачи и формулировка целей осуществлялась совместно с научным руководителем и научным консультантом.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 3-ёх статьях в журналах, индексируемых в базе данных Web of Science, 1-ой конференционной статье в периодическом издании, индексируемом в Web of Science, и в 10-ти тезисах докладов.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована её цель и связанные с ней задачи, обоснована научная новизна и значимость,

сформулированы Положения, выносимые на защиту. Также во введении описан личный вклад соискателя и апробация работы.

Первая Глава представляет собой обзор литературы по пикосекундной акустике. В данной Главе показано место пикосекундной акустики в современной науке, описываются основополагающие принципы и эксперименты [1] по генерации и детектированию пикосекундных импульсов деформации при помощи фемтосекундных лазерных импульсов, а также эффекты, связанные с их распространением в кристаллических телах [2]. В конце Главы приведён обзор современных применений пикосекундной акустики и выделены направления её развития, которым способствует данная диссертационная работа.

В параграфе **1.1** описываются механизмы оптической генерации механических напряжений на пикосекундной временной шкале в опто-акустических преобразователях (см. Рис. 1). Подробно рассмотрены наиболее универсальные

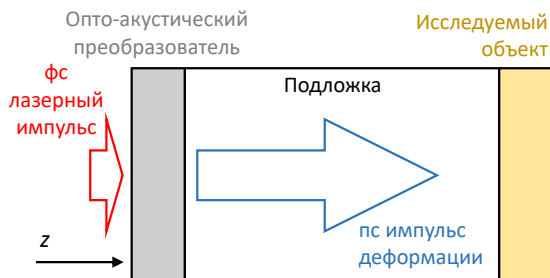


Рис. 1 — Схема образца, используемого в экспериментах пикосекундной акустики. Фемтосекундный лазерный импульс конвертируется в опто-акустическом преобразователе в пикосекундный импульс деформации, который распространяется через подложку, и позволяет получить информацию об исследуемом объекте, либо воздействовать на него.

из таких механизмов — термоупругий эффект и деформационный потенциал. Затем рассматриваются различные опто-акустические преобразователи и временные формы фотогенерируемых пикосекундных импульсов деформации.

Параграф **1.2** посвящён особенностям распространения пикосекундных импульсов продольной деформации через кристаллические тела. К таким особенностям относятся затухание, формирование ударного фронта, эффект частотной модуляции импульса («чирп») и генерация акустических солитонов. Обсуждается как теоретическое описание эволюции формы импульса деформации, так и примеры экспериментальных наблюдений.

В следующем параграфе **1.3** приводится обзор основных методов оптического детектирования пикосекундных импульсов деформации, основанных на изменении оптического отражения преобразователя или исследуемого объекта (см. Рис. 1) вследствие фотоупругого эффекта и изменении интерференции света.

Наконец, параграф **1.4** посвящён обзору применений пикосекундной акустики. Рассмотрены как классические применения для характеристики упругих свойств материалов на нанометровых масштабах [3], так и недавно зародившиеся применения, в которых импульсы деформации высокой амплитуды $>10^{-3}$ используются в качестве возбуждающего воздействия на электронную, спиновую и решёточную подсистемы наноструктур на пикосекундной временной шкале [4].

Во **второй Главе** представлен обзор литературы, посвящённой фазовому переходу в диоксиде ванадия. Дано подробное описание обеих фаз VO_2 и параметров фазового перехода. В данной Главе показано, что трансформация кристаллической решётки при фазовом переходе в VO_2 может происходить на пикосекундной временной шкале [5; 6] и, таким образом, представляет собой перспективное явление для пикосекундной акустики.

В параграфе **2.1** описан квазиравновесный фазовый переход в диоксиде ванадия, представляющий собой переход диэлектрик-металл, сосуществующий со структурным фазовым переходом. Здесь приводятся общепризнанные данные об изменении оптических и электрических свойств при переходе, а также о структуре электронных зон (§2.1.2) и кристаллической решётки (§2.1.3) диоксида ванадия в обеих фазах, приводятся известные на настоящий момент упругие свойства диоксида ванадия. Также обсуждаются возможные механизмы фазового перехода (§2.1.4). В §2.1.5 приводятся известные из литературы фазовые диаграммы при изменении температуры и приложении гидростатического или одноосного давления, показывающие, что фазовый переход в VO_2 может быть вызван давлением, и демонстрирующие разнообразие фаз диоксида ванадия. Наконец, в §2.1.6 обсуждаются особенности фазового перехода в наноструктурах VO_2 , которые характеризуются наличием внутренних напряжений и способны выдерживать многочисленные циклы переключения между фазами без разрушения, и приводится обзор используемых подложек для выращивания наноразмерных плёнок диоксида ванадия.

В параграфе **2.2** подробно рассматривается фазовый переход в диоксиде ванадия, индуцируемый короткими лазерными импульсами на сверхбыстрой временной шкале, то есть быстрее процессов термализации [5]. Приводится принятое в современной науке определение термина «сверхбыстрый фазовый переход». Затем описываются особенности сверхбыстрого лазерно-индуцированного фазового перехода в диоксиде ванадия, такие как порог и насыщение. Особенно отмечается немонотонная динамика кристаллической решётки при сверхбыстром переходе [6]. В завершение высказана идея, лежащая в основе настоящей работы — использовать сверхбыструю трансформацию решётки при лазерно-индуцированном переходе в VO_2 в пикосекундной акустике.

В **третьей Главе** подробно описаны используемые в диссертационной работе образцы и экспериментальные методики.

В параграфе 3.1 приводится характеристика образцов, представляющих собой нанослой VO_2 на сапфировых подложках с напылёнными с противоположной стороны металлическими плёнками (см. схему на Рис. 1). Образцы выращены в Университете Пуэрто-Рико [7]. Представлена кристаллическая структура нанослоёв VO_2 , их морфология, оптические свойства, а также толщины металлических плёнок и слоёв VO_2 (см. таблицу 1). Описаны используемые методики характеристики.

Таблица 1 — Параметры образцов, использованных в работе

Слой VO_2	Подложка	Металлическая плёнка
Плёнка, 145 нм	(001) Al_2O_3 , 350 мкм	Al, 140 нм
Наноостровки	(001) Al_2O_3 , 350 мкм	Al, 140 нм
Плёнка, 100 нм	(012) Al_2O_3 , 290 мкм	Cr, 30 нм
Плёнка, 35 нм	(012) Al_2O_3 , 290 мкм	Cr, 30 нм

В параграфе 3.2 описываются экспериментальные методики. Главные экспериментальные методики, лежащие в основе диссертационной работы, базируются на подходе «накачка-зондирование». Данный подход позволяет измерять динамику процессов на фемтосекундной временной шкале стробоскопически за счёт использования двух фемтосекундных лазерных импульсов накачки и зондирования и регулируемой задержки между ними (см. упрощённую оптическую схему на Рис. 2). В экспериментах лазерный импульс накачки конвертировался

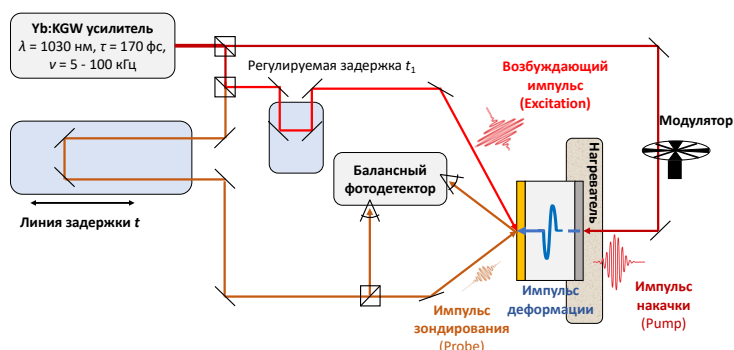


Рис. 2 — Оптическая схема проведённых экспериментов. Импульс из Yb:KGW регенеративного усилителя делится на импульс накачки (показан бордовым), зондирования (коричневый) и возбуждения (красный). Импульс зондирования задержан относительно импульса накачки на время t , а возбуждающий импульс — на время t_1 . Импульс накачки преобразуется в импульс деформации как показано на Рис. 1. В экспериментах детектируется изменение отражения импульса зондирования при изменении величины t и фиксированном t_1 .

в импульс деформации, как показано на Рис. 1, и измерялось изменение оптического отражения импульса зондирования от исследуемого объекта, при этом

использовались различные комбинации лазерных импульсов, изображённых на Рис. 2. Подробные оптические схемы экспериментальных установок также приведены в §3.2.1. Важно отметить, что величина запрещённой зоны VO_2 в диэлектрической фазе составляет 0.6 эВ [8], что меньше энергии фотонов лазерных импульсов, используемых в экспериментах — 1.2 эВ ($\lambda=1028$ нм). Также, в §3.2.2 описаны методики дополнительных экспериментов, служащих для определения вспомогательных параметров: характеристик квазиравновесного и сверхбыстрого фазового перехода в образцах, величин оптического поглощения, толщины опто-акустического преобразователя.

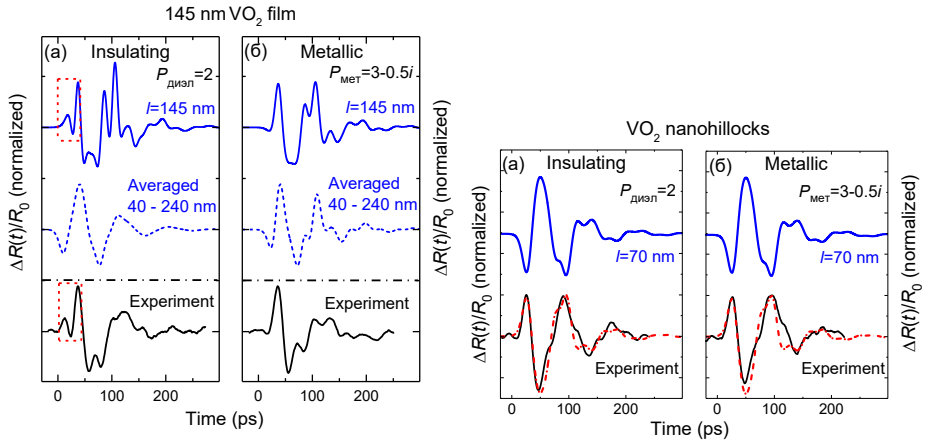
Четвёртая Глава посвящена экспериментальному определению эффективных фотоупругих постоянных P в двух нанослоях VO_2 различной морфологии при двух температурах, соответствующих двум термодинамическим фазам диоксида ванадия. Для определения P использовались пикосекундные импульсы продольной деформации, сгенерированные в типичном опто-акустическом преобразователе в виде плёнки Al толщиной 140 нм. Использовались два образца VO_2 на с-плоскости сапфира, представлявшие собой сплошную гранулированную плёнку и отдельные наноостровки (см. таблицу 1). Результаты Главы опубликованы в статье [A1].

В параграфе 4.1 сформулирована мотивация исследования, содержащегося в данной Главе. Информация о фотоупругих постоянных необходима для оптимизации разработки наноустройств на основе VO_2 с внутренними напряжениями или при внешних воздействиях, создающих деформацию в наноустройстве [9]. Знание фотоупругих свойств нанослоёв VO_2 требуется и для эффективного использования этого перспективного материала в пикосекундной акустике.

В параграфе 4.2 приводятся результаты расчёта амплитуды и временного профиля импульсов деформации $\varepsilon(t)$, инжектируемых в нанослой VO_2 , на основе которых было определено распределение деформации в нанослое $\varepsilon(t, z)$ в зависимости от времени t и координаты вдоль нормали z . Амплитуды использованных импульсов деформации не превышали 10^{-4} , поэтому нелинейные акустические эффекты не наблюдались.

В параграфе 4.3 представлены измеренные временные зависимости изменения оптического отражения $\Delta R(t)$ от нанослоёв VO_2 , происходящего вследствие фотоупругого эффекта и изменения интерференции света при инжекции импульса деформации в нанослой (чёрные кривые на Рис. 3). На экспериментальных данных видно, что временные формы сигналов для плёнки VO_2 толщиной 145 нм в диэлектрической и металлической фазе различны. Это отличие отчётливо проявляется в формах особенностей на малых временах задержки, выделенных красным пунктиром. Также из сравнения Рис. 3(1) и Рис. 3(2) видно, что форма отклика отличается в гранулированной плёнке и наноостровках.

Параграф 4.4 посвящён описанию методики, позволяющей определить эффективные фотоупругие постоянные по *формам* детектируемых откликов. В §4.4.1 приводится аналитическое описание изменения отражения $\Delta R(t)$



- (1) Сплошная гранулированная плёнка VO_2 толщиной 145 нм. Модель: плёнка толщиной 145 нм.
- (2) Слой наностроек VO_2 со средней высотой 70 нм и шириной 200 нм. Модель: плёнка толщиной 70 нм.

Рис. 3 — Измеренные (чёрные кривые) и моделированные (синие кривые) отклики на импульс деформации $\Delta R(t)/R_0$ для нанослоёв VO_2 в диэлектрической (а) и металлической (б) фазах. Сплошные синие линии соответствуют моделированию, проведённому для гладкой плоскопараллельной плёнки. Синие пунктирные кривые представляют собой результат усреднения $\Delta R(t)/R_0$ по плоским плёнкам с толщинами 40-240 нм. Красным штрих-пунктиром показаны инвертированные моделированные кривые.

при инъекции импульса деформации в тонкую плёнку, следуя работе [10]:

$$\frac{\Delta R(t)}{R_0} = 4\text{Im} \left\{ A_N \left[(N + P) \int_0^l \varepsilon(t, z) dz + \frac{1}{2} P \int_0^l \varepsilon(t, z) \left(r_{12} e^{2ik_l(l-z)} + \frac{1}{r_{12}} e^{-2ik_l(l-z)} \right) dz \right] \right\} \quad (1)$$

Здесь A_N — комплексный коэффициент, не зависящий от деформации и P , N — комплексный показатель преломления, r_{12} — амплитудный френелевский коэффициент отражения на границе плёнка/подложка, k_l — волновой вектор света внутри плёнки толщиной l . В данном уравнении величина ΔR определяется двумя слагаемыми, связанными с изменением толщины нанослоя VO_2 и с фотоупругим эффектом. Конкуренция между ними приводит к сложной форме откликов. В §4.4.2 описана процедура численных расчётов, проведённых для определения значений P в двух фазах VO_2 (синие кривые на Рис. 3). Также показано, что для тонких нанослоёв форма отклика перестаёт зависеть от P и N , однако чувствительность к величине P сохраняется в знаке $\Delta R(t)$, что объясняет идентичную форму откликов в обеих фазах для слоя невысоких наностроек и подтверждается численным расчётом (Рис. 3(2)).

Выраженная зависимость формы откликов от значения P проиллюстрирована в параграфе 4.5, где численные расчёты сравниваются с экспериментальными результатами и определяются значения P для плёнки VO_2 толщиной 145 нм. Результат показан штрихованными областями на Рис. 4(а)-(б). Как вид-

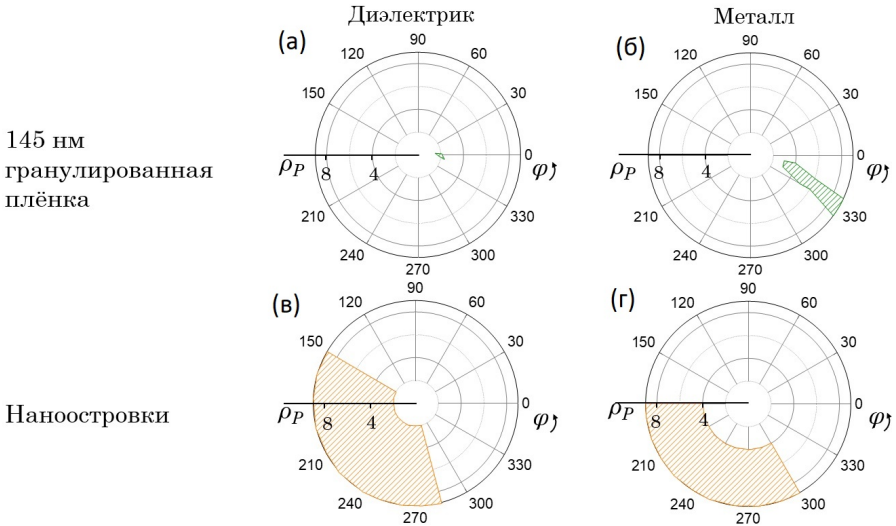


Рис. 4 — Области значений P на комплексной плоскости, соответствующие согласно с экспериментальными данными в пределах 30 % для плёнки толщиной 145 нм [(а) и (б)] и наноостровков VO_2 [(в) и (г)] в диэлектрической [(а) и (в)] и металлической [(б) и (г)] фазах.

но, для VO_2 в диэлектрической фазе удалось определить величину $P_{\text{диэл}} = 2$ с хорошей точностью, однако для VO_2 в металлической фазе значениям эффективной фотоупругой постоянной соответствует луч на комплексной плоскости P с вершиной в $P_{\text{мет}} = 3 - 0.5i$. При этом области значений P , определённые в двух фазах, не пересекаются, следовательно величина P меняется при фазовом переходе в VO_2 . Также в параграфе 4.5 обсуждается несоответствие между экспериментом и расчётом для $t > 30$ пс (см. Рис. 3(1)), что объясняется влиянием морфологии границы и проиллюстрировано численным расчётом с усреднением по распределению толщин около 145 нм (синие штриховые кривые на Рис. 3(1)). Наконец, показано, что в двух изученных образцах значения P различны (см. зелёные и оранжевые штрихованные области на Рис. 4(а) - 4(в) и Рис. 4(б) - 4(г)). Тем самым показано, что эффективные фотоупругие свойства нанослоёв зависят от их морфологии вследствие существенного влияния эффекта Пуассона в наноостровках.

В **пятой Главе** трансформация кристаллической решётки, происходящая при сверхбыстром лазерно-индуцированном фазовом переходе в диоксиде ванадия, использовалась для генерации пикосекундных импульсов продольной деформации. Для этого в качестве опто-акустического преобразователя рассматривались две наноразмерные плёнки VO_2 на г-границы сапфира (см. таблицу 1). Описываемые в данной Главе результаты опубликованы в работе [A2].

В параграфе **5.1** показано, что пикосекундные импульсы деформации высокой амплитуды играют важную роль в современных приложениях пикосекундной акустики. Также описаны сложности, связанные с получением и применением таких импульсов — в первую очередь рассеяние тепла, приводящее к термическому разрушению преобразователя и повреждению чувствительных объектов исследования, таких как биологические объекты [3], и тем самым приведена мотивация работы.

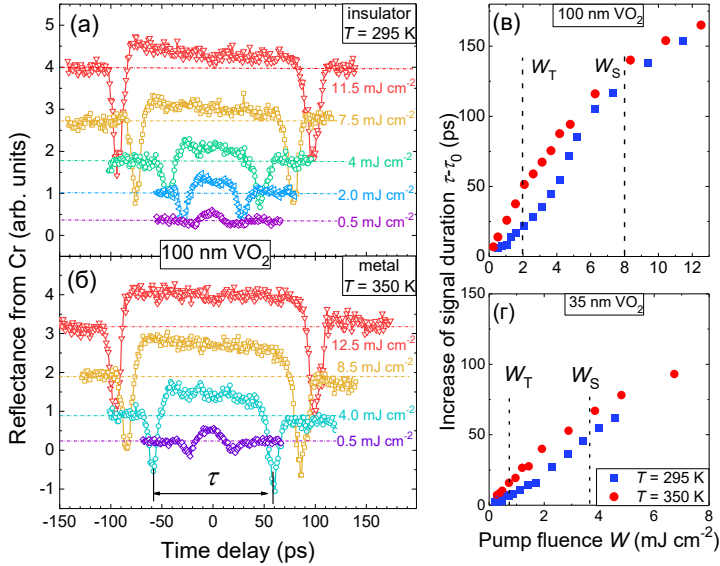


Рис. 5 — (а)-(б) Экспериментально детектируемые импульсы деформации, сгенерированные при фотовозбуждении плёнки VO_2 толщиной 100 нм в диэлектрической (а) и металлической (б) фазе. (в)-(г) Зависимости удлинения сигнала $\tau - \tau_0$ от плотности потока энергии лазерного возбуждения W для плёнки VO_2 толщиной 100 нм (в) и 35 нм (г), находящейся изначально в диэлектрической (синие квадраты) или металлической (красные круги) фазе. Вертикальные линии обозначают значения плотностей потока W для порога W_T и насыщения W_S сверхбыстрого фазового перехода в VO_2 .

В параграфе **5.2** описана методика, позволяющая определить амплитуду деформации, генерируемой при фотовозбуждении опто-акустического преобразователя, по детектируемым временным зависимостям изменения отражения

$\Delta R(t)$ от дополнительной плёнки Cr, напылённой на обратную сторону подложки, представленным на Рис. 5(а)-(б). В §5.2.1 показано, что распространение импульсов продольной деформации через подложку позволяет связать определяемую в эксперименте «длительность» τ фотоупругого отклика на импульс деформации с амплитудой фотогенерируемой деформации ε_0 , поскольку импульса деформации удлиняется за счёт нелинейных акустических эффектов при распространении. Для этого были проведены численные расчёты распространения импульсов деформации различной амплитуды через сапфировую подложку, в результате которых были получены калибровочные кривые для различных образцов при различных температурах, отвечающих начальным фазам VO_2 , представленные на Рис. 6. В §5.2.2 описаны экспериментально полученные

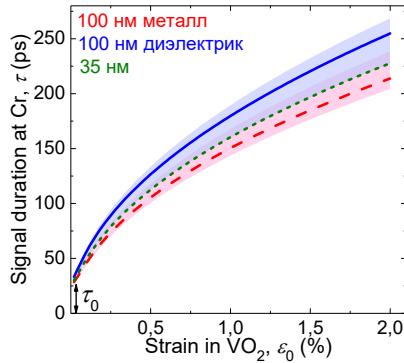


Рис. 6 — Калибровочные кривые $\tau(\varepsilon_0)$, рассчитанные для плёнки VO_2 толщиной 100 нм в диэлектрической и металлической фазах (синяя и красная кривые) и плёнки VO_2 толщиной 35 нм (зелёная кривая, одинаковая для диэлектрической и металлической фазы).

$\Delta R(t)$ и построены зависимости удлинения детектируемого отклика с величиной лазерного возбуждения опто-акустического преобразователя (Рис. 5). Затем, в §5.2.3, экспериментально полученная связь $\tau(W)$ (Рис. 5(в)-(г)) и рассчитанная связь $\tau(\varepsilon_0)$ (Рис. 6) позволили получить зависимости $\varepsilon_0(W)$. На основе значений W были определены величины J энергии лазерных импульсов накачки, поглощённой в VO_2 , и полученные зависимости $\varepsilon_0(J)$ показаны на Рис. 7(а)-(б). Также в данном параграфе производится анализ погрешностей расчётов, показанных как затенённые области на Рис. 6 и Рис. 7(а)-(б).

Выделение вклада сверхбыстрого фазового перехода $\varepsilon_{0,\text{д}}^{\text{фп}}$ в генерируемую деформацию производится в параграфе 5.3. Для этого в §5.3.1 был выполнен пошаговый учёт известных из литературы вкладов в фотогенерируемую деформацию, а именно вклада фотоупругого эффекта $\varepsilon_{0,\text{д}}^l$ и вклада деформационного потенциала $\varepsilon_{0,\text{д}}^e$, в соответствии с выражением [1]:

$$\varepsilon_{0,\text{д(м)}} = \varepsilon_{0,\text{д(м)}}^l + \varepsilon_{0,\text{д(м)}}^e + \varepsilon_{0,\text{д}}^{\text{фп}} = \frac{\alpha_{\text{д(м)}} \delta_{\text{д(м)}}}{C_{\text{д(м)}}} J - \Xi_{\text{д(м)}} \frac{\lambda}{Bhc} J + \varepsilon_{0,\text{д}}^{\text{фп}}, \quad (2)$$

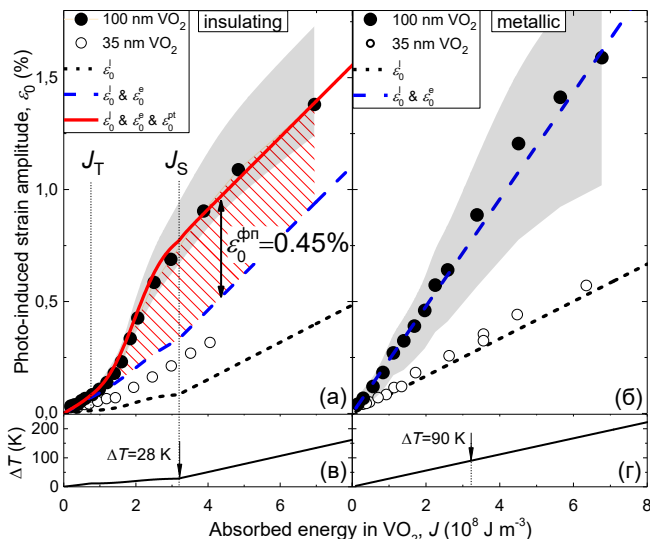


Рис. 7 — (а)-(б) ε_0 в зависимости от поглощённой энергии лазерных импульсов накачки J для плёнок VO_2 в диэлектрической (а) и металлической (б) фазе. Экспериментальные данные для плёнки VO_2 толщиной 100 нм и 35 нм показаны сплошными и открытыми символами, соответственно. Линиями показаны результаты расчётов фотогенерируемой деформации с учётом: только ε_0^l (точечные чёрные кривые); $\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^e$ (пунктирные синие кривые) и $\varepsilon_0^l + \varepsilon_0^e + \varepsilon_0^{\text{fnp}}$ (красная кривая). (в)-(г) Рассчитанные величины нагрева плёнки VO_2 толщиной 100 нм при возбуждении в диэлектрической (в) и металлической (г) фазе.

где индекс «д(м)» означает, что параметр относится к диэлектрической (металлической) фазе VO_2 . Здесь α — линейный коэффициент термического расширения в направлении нормали, δ — доля полной поглощённой энергии, которая перешла в тепло за время ~ 1 пс, C — теплоёмкость единицы объёма, Ξ_d — деформационный потенциал, Ξ_m — коэффициент, описывающий возрастание электронного давления с ростом электронной температуры, B — объёмный модуль упругости, h — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме. Как видно по Рис. 7(а)-(б), сумма $\varepsilon_{0, \text{д(м)}}^l + \varepsilon_{0, \text{д(м)}}^e$ хорошо описывает экспериментальные данные для металлического VO_2 , однако не может описать данные для диэлектрического VO_2 . Дополнительный вклад, обозначенный $\varepsilon_0^{\text{fnp}}$ возникает в диэлектрической фазе VO_2 только для $J > J_T$ и достигает максимума $+4.5 \cdot 10^{-3}$ для $J > J_S$, то есть управляется параметрами сверхбыстрого фазового перехода и действительно описывает вклад от трансформации решётки диоксида ванадия на масштабе времени генерации импульса деформации — т. е. десятка пикосекунд. В §5.3.2 приводится расчёт нагрева опто-акустического преобразователя из VO_2 при различных значениях J (Рис. 7(в)-(г)), демонстрирующий преимущество использования сверхбыстрого фазового перехода первого рода для генерации импульсов деформации. Также отмечается, что

результаты для более тонкой плёнки VO_2 толщиной 35 нм демонстрируют поведение, сходное с более толстой плёнкой толщиной 100 нм, однако для них полученные данные не позволили сделать надёжные выводы. Наконец, производится обсуждение причин, по которым величина $\varepsilon_0^{\text{фп}}$ отлична от величины трансформации решётки в VO_2 , что связывается с немонотонностью динамики решётки при сверхбыстром фазовом переходе [6; 11].

В шестой Главе описана реализация сверхбыстрой деформационной инженерии фазового перехода в диоксиде ванадия. Пикосекундные мультиполярные импульсы продольной деформации были инжектированы в наноструктуру VO_2 , представляющую собой ансамбль разрозненных наноостровков (таблица 1). Показано, что при наличии импульса деформации, оптический импульс индуцирует сверхбыстрый фазовый переход в большем или меньшем количестве наноостровков, в зависимости от того, растягивающая или сжимающая часть импульса деформации присутствует в структуре в момент фотовозбуждения, что влияет на оптические свойства всей структуры. Выбор сжимающей или растягивающей части мультиполярного импульса деформации осуществляется за счёт изменения временной задержки между двумя лазерными импульсами. Поэтому представленный подход позволяет модифицировать свойства наноструктуры VO_2 на нанометровом и пикосекундном масштабах. Данные результаты опубликованы в статье [A3] и конференционной статье [A4].

В параграфе 6.1 вводится понятие сверхбыстрой деформационной инженерии как развития классической деформационной инженерии. Статические деформации долгое время используются для модификации свойств наноструктур и наноустройств [12], и возможность прикладывать динамические деформации позволит управлять этими модификациями на пикосекундной временной шкале.

Параграф 6.2 посвящён экспериментальной реализации сверхбыстрой деформационной инженерии в наноостровках VO_2 при помощи пикосекундных импульсов деформации. Сначала в §6.2.1 было проведено моделирование импульса деформации, сгенерированного в классическом алюминиевом оптоакустическом преобразователе и прошедшего через сапфировую подложку, была определена амплитуда $5 \cdot 10^{-4}$, N-образная форма и длительность ~ 100 пс импульса, инжектированного в VO_2 . Затем был проведён расчёт фотоупругого отклика на такой импульс деформации, в котором учитываются результаты четвёртой Главы и дополнительно уточняется эффективная скорость звука в наноостровках VO_2 . Рассчитана пиковая деформация сжатия и растяжения, вызываемая импульсом деформации в наноостровках VO_2 , составившая $-2 \cdot 10^{-3}$ и $1.3 \cdot 10^{-3}$, соответственно. Затем, в §6.2.2, приводятся экспериментально полученные зависимости изменения отражения: когда сверхбыстрый фазовый переход не возбуждается (чёрные кривые на Рис. 8), когда он возбуждается до инъекции импульса деформации (синие кривые на Рис. 8) и когда возбуждение сверхбыстрого фазового перехода происходит во время присутствия деформации в VO_2 (красные кривые на Рис. 8). Эксперименты были проведены для плотности потока энергии W лазерных импульсов, возбуждающих

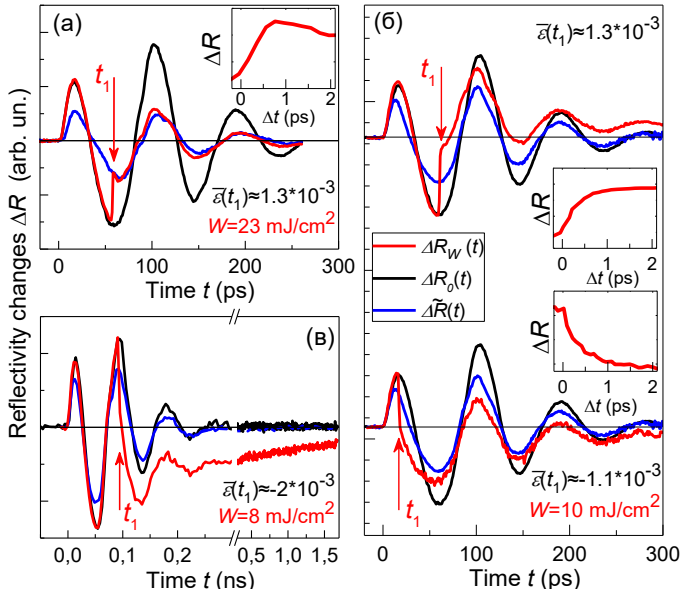


Рис. 8 — Эволюция изменения отражения наностроек VO_2 в присутствии пикосекундного импульса деформации во временном интервале 300 пс (а)-(б) и 1700 пс (в). Чёрные и красные кривые представляют собой сигналы, измеренные без оптического возбуждения $\Delta R_0(t)$ и с ним $\Delta R_W(t)$, соответственно. Момент фотовозбуждения VO_2 $t_1 > 0$ отмечен вертикальными стрелками. Синие кривые соответствуют сигналам $\Delta \tilde{R}(t)$, для которых $t_1 = -30$ пс < 0 . Величина оптического возбуждения: (а) $W > W_S$, (б)-(в) $W_T < W < W_S$. Вставки на панелях (а)-(б) показывают $\Delta R_W(t)$ с 200 фс разрешением и временной координатой, взятой относительно момента фотовозбуждения $\Delta t = t - t_1$.

VO_2 , как выше, так и ниже уровня насыщения сверхбыстрого фазового перехода W_S , и для времени возбуждения перехода t_1 , соответствующего моменту как наибольшего сжатия в наностройках, так и наибольшего растяжения. Основным наблюдаемым эффектом заключается в возникновении дополнительного вклада $\Delta R_\varepsilon(t, t_1)$ в изменение отражения при возбуждении сверхбыстрого фазового перехода с $W < W_S$, проявляющегося как «сдвиг» красных кривых на Рис. 8(б)-(в) относительно синих, и релаксирующего на наносекундной временной шкале. Приведена процедура, позволяющая выделить вклад $\Delta R_\varepsilon(t, t_1)$ из измеренных сигналов, схематически показанная на Рис. 9(а)-(б).

В параграфе 6.3 производится анализ описанного выше эффекта, связанного с появлением вклада ΔR_ε . На Рис. 9(в) показана временная зависимость данного вклада для двух моментов возбуждения сверхбыстрого фазового перехода — при наибольшем сжатии VO_2 (синий) и растяжении (жёлтый). В §6.3.1 из анализа зависимости наносекундной компоненты вклада ΔR_ε от плотности потока энергии лазерных импульсов, возбуждающих сверхбыстрый фазовый переход (Рис. 9(г)), сделан вывод о природе наблюдаемого эффекта: наличие

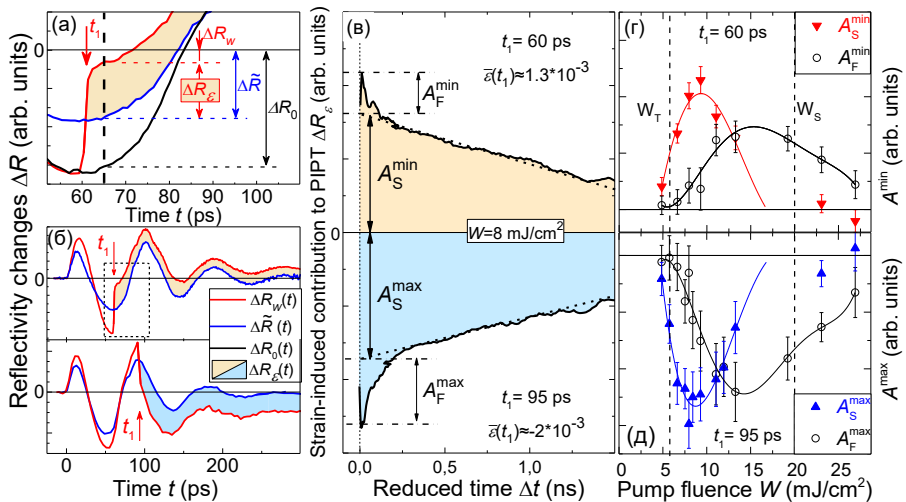


Рис. 9 — Воздействие деформации на сверхбыстрый фазовый переход. (а) Иллюстрация процедуры выделения $\Delta R_\epsilon(t=65 \text{ пс}, t_1=60 \text{ пс})$. Чёрная, синяя и красная кривые соответствуют $\Delta R_0(t)$, $\Delta \tilde{R}(t)$ и $\Delta R_W(t)$. (б) Сигналы $\Delta \tilde{R}(t)$ и $\Delta R_W(t)$ для момента наибольшего растяжения (верхняя панель) и сжатия (нижняя панель), вклад ΔR_ϵ выделен заливкой и представлен отдельно на панели (в). (г)-(д) Зависимости амплитуд A_S (закрашенные символы) и A_F (открытые символы), определённых на панели (в), от плотности потока энергии возбуждающих импульсов W для наибольшего растяжения в VO_2 (г) и сжатия (д). Сплошные линии нарисованы для удобства. Вертикальными пунктирными линиями отмечены значения W_T и W_S .

в наноструктурах VO_2 сжатия (растяжения) вдоль нормали в момент фотовозбуждения приводит к уменьшению (увеличению) числа наноструктур, трансформируемых в фотоиндуцированную металлическую фазу лазерным импульсом. Данный недостаток (избыток) наноструктур релаксирует к значению в отсутствие деформации на наносекундной временной шкале. Также показано, что амплитуда и знак вклада ΔR_ϵ определяются средним мгновенным значением деформации в наноструктурах VO_2 в момент возбуждения сверхбыстрого фазового перехода t_1 , и не чувствительны к динамической деформации при $t > t_1$. Благодаря этому, наблюдаемый эффект не компенсирует себя при прохождении через наноструктуры частей импульса деформации противоположных знаков, что и делает возможной сверхбыструю деформационную инженерию. Далее, в §6.3.2 приводится феноменологическая модель [13], описывающая перечисленные выше особенности, связанные с наблюдаемым ΔR_ϵ . В данной модели, деформация, присутствующая в момент возбуждения сверхбыстрого фазового перехода с $W_T < W < W_S$, изменяет форму термодинамического потенциала Φ в фотоиндуцированном состоянии, что изменяет вероятность наноструктур VO_2 перейти в металлическую фазу или в метастабильную диэлектрическую,

соответствующие минимумам энергии на Рис. 10(a). Показано, что имеющийся

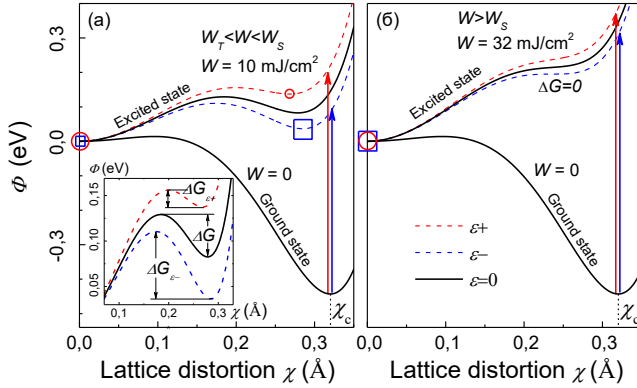


Рис. 10 — Термодинамические потенциалы $\Phi(\chi)$ для VO_2 в изначальной моноклинной фазе (сплошные кривые) и после фотовозбуждения (штрихованные кривые) с $W_T < W < W_S$ (a) и $W > W_S$ (б), рассчитанные с использованием параметров из [13]. Параметр порядка χ представляет собой обобщённое искажение решётки VO_2 , связанное с трансформацией из моноклинной в рутиловую фазу. Чёрными линиями показан термодинамический потенциал в отсутствие деформации. Красные и синие линии соответствуют компоненте деформации, повышающей ϵ^+ или понижающей ϵ^- свободную энергию системы, соответственно. Вертикальные стрелки отвечают процессу фотовозбуждения системы. На вставке на панели (a) показано изменение потенциального барьера ΔG между фотоиндуцированными рутиловой и метастабильной моноклинной фазами.

потенциальный барьер между минимумами соответствует характерному времени, необходимому для перераспределения количества наноструктур между ними, лежащему в наносекундной области. Отсутствие эффекта при $W > W_S$ проиллюстрировано на Рис. 10(б) и связано с отсутствием побочного минимума в потенциальной энергии фотовозбуждённой фазы.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые сформулированы следующим образом:

1. Были впервые экспериментально определены значения эффективной фотоупругой постоянной в нанослоях VO_2 в диэлектрической и металлической фазе материала через сравнение с результатами компьютерного моделирования. Было выявлено, что фотоупругие свойства зависят как от фазы VO_2 , так и от морфологии исследуемого нанослоя.
2. Была впервые осуществлена генерация пикосекундных импульсов деформации при сверхбыстром фазовом переходе в опто-акустическом преобразователе на основе VO_2 . Проведённый анализ показал, что

сверхбыстрый фазовый переход ответственен за нетермическую генерацию деформации амплитудой $+4.5 \cdot 10^{-3}$ в первые 10 пс с момента фотовозбуждения.

3. При помощи специально созданной уникальной установки, позволяющей осуществлять комбинированное возбуждение образца фемтосекундным лазерным импульсом и пикосекундным импульсом деформации, было впервые продемонстрировано влияние импульсов деформации на сверхбыстрый фазовый переход в наноостровках VO_2 . Экспериментально показано, что изменение доли наноостровков, трансформируемых в металлическую фазу, определяется мгновенным значением средней деформации в момент возбуждения сверхбыстрого фазового перехода. Была экспериментально продемонстрирована концепция «сверхбыстрой деформационной инженерии», позволяющая управлять знаком и величиной дополнительной доли наноостровков, трансформируемых при сверхбыстром фазовом переходе, за счёт изменения задержки импульса деформации относительно оптического импульса, возбуждающего фазовый переход.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

- A1. Photoelasticity of VO_2 nanolayers in insulating and metallic phases studied by picosecond ultrasonic / Ia. A. Mogunov, S. Lysenko, F. Fernández, A. Rúa, A. V. Muratov, A. J. Kent, A. M. Kalashnikova and A. V. Akimov // *Phys. Rev. Materials*. — 2020. — Dec. — Vol. 4, issue 12. — P. 125201. — DOI: [10.1103/PhysRevMaterials.4.125201](https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.125201).
- A2. Large non-thermal contribution to picosecond strain pulse generation using the photo-induced phase transition in VO_2 / Ia. A. Mogunov, S. Lysenko, A. E. Fedianin, F. E. Fernández, A. Rúa, A. J. Kent, A. V. Akimov and A. M. Kalashnikova // *Nature Communications*. — 2020. — Apr. — Vol. 11. — P. 1690. — DOI: [10.1038/s41467-020-15372-z](https://doi.org/10.1038/s41467-020-15372-z).
- A3. Ultrafast Insulator-Metal Transition in VO_2 Nanostructures Assisted by Picosecond Strain Pulses / Ia. A. Mogunov, F. Fernández, S. Lysenko, A. J. Kent, A. V. Scherbakov, A. M. Kalashnikova and A. V. Akimov // *Phys. Rev. Applied*. — 2019. — Jan. — Vol. 11, issue 1. — P. 014054. — DOI: [10.1103/PhysRevApplied.11.014054](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.014054).
- A4. A role of a picosecond strain in an ultrafast optically-driven phase transition in VO_2 nanostructures / Ia. A. Mogunov, S. Lysenko, A. E. Fedianin, A. J. Kent, A. V. Akimov and A. M. Kalashnikova // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — Mar. — Vol. 1461. — P. 012108. — DOI: [10.1088/1742-6596/1461/1/012108](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1461/1/012108).

Список литературы

1. Surface generation and detection of phonons by picosecond light pulses / C. Thomsen [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 1986. — Т. 34, вып. 6. — С. 4129—4138. — DOI: [10.1103/PhysRevB.34.4129](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.34.4129).
2. *Capel, P. J. S. van.* Nonlinear ultrafast acoustics at the nano scale / P. J. S. van Capel, E. Péronne, J. I. Dijkhuis // *Ultrasonics.* — 2015. — Т. 56. — С. 36—51. — DOI: [10.1016/j.ultras.2014.09.021](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.09.021).
3. All-optical broadband ultrasonography of single cells / T. Dehoux [и др.] // *Scientific Reports.* — 2015. — Т. 5. — С. 8650. — DOI: [10.1038/srep08650](https://doi.org/10.1038/srep08650).
4. Coherent Magnetization Precession in Ferromagnetic (Ga,Mn)As Induced by Picosecond Acoustic Pulses / A. V. Scherbakov [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Т. 105, вып. 11. — С. 117204. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.105.117204](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.117204).
5. Femtosecond Structural Dynamics in VO₂ during an Ultrafast Solid-Solid Phase Transition / A. Cavalleri [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2001. — Т. 87, вып. 23. — С. 237401. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.87.237401](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.237401).
6. *Yang, D.-S.* Ultrafast electron crystallography of the cooperative reaction path in vanadium dioxide / D.-S. Yang, P. Baum, A. H. Zewail // *Structural Dynamics.* — 2016. — Т. 3, № 3. — С. 034304. — DOI: [10.1063/1.4953370](https://doi.org/10.1063/1.4953370).
7. Photoinduced insulator-to-metal phase transition in VO₂ crystalline films and model of dielectric susceptibility / S. Lysenko [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2007. — Т. 75, вып. 7. — С. 075109. — DOI: [10.1103/PhysRevB.75.075109](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.075109).
8. *Wegkamp, D.* Ultrafast dynamics during the photoinduced phase transition in VO₂ / D. Wegkamp, J. Stähler // *Progress in Surface Science.* — 2015. — Т. 90, № 4. — С. 464—502. — DOI: [10.1016/j.progsurf.2015.10.001](https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2015.10.001).
9. Vanadium Dioxide: The Multistimuli Responsive Material and Its Applications / Y. Ke [и др.] // *Small.* — 2018. — Т. 14, № 39. — С. 1802025. — DOI: [10.1002/smll.201802025](https://doi.org/10.1002/smll.201802025).
10. *Gusev, V.* Laser hypersonics in fundamental and applied research / V. Gusev // *Acustica.* — 1996. — Т. 82. — С37—S45.
11. Structural and electronic recovery pathways of a photoexcited ultrathin VO₂ film / H. Wen [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2013. — Т. 88, вып. 16. — С. 165424. — DOI: [10.1103/PhysRevB.88.165424](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.165424).
12. Strain engineering in semiconducting two-dimensional crystals / R. Roldán [и др.] // *Journal of Physics: Condensed Matter.* — 2015. — Т. 27, № 31. — С. 313201. — DOI: [10.1088/0953-8984/27/31/313201](https://doi.org/10.1088/0953-8984/27/31/313201).
13. Ultrafast structural dynamics of VO₂ / S. Lysenko [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2017. — Т. 96, вып. 7. — С. 075128. — DOI: [10.1103/PhysRevB.96.075128](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.075128).

Могунов Ярослав Александрович

Пикосекундные импульсы деформации в наноструктурах диоксида ванадия
со сверхбыстрым фазовым переходом

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1.5. Тираж _____ экз.

Типография _____