

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника»
Российской академии наук»

РЕФЕРАТ - ПРЕЗЕНТАЦИЯ

«Разработка технологий формирования и методов диагностики квазидвумерных структур носителей заряда и механических деформаций в диэлектриках»

№	Ф.И.О. авторов, ученые степени и звания, должности по основному месту работы
1.	Куликов Антон Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»

Введение

Создание новейших вычислительных и запоминающих устройств основано на возможности оперативного переключения их функциональных характеристик в процессе работы. Одним из перспективных способов изменения физических свойств системы является контролируемая перестройка структурной организации материала с целью её частичного разупорядочения за счет управления дефектами.

С точки зрения контроля и управления дефектами существует потребность в создании чувствительных методик для наблюдения динамики точечных дефектов малых концентраций в кристаллах в условиях внешних воздействий. Еще больший интерес представляют возможности динамического формирования компактных структур из заряженных дефектов, которые могут являться источниками управляемых механических деформаций и электрического тока.

Основная научно-техническая идея настоящей работы состоит в создании комплексной технологии формирования и управления квазидвумерными структурами заряженных дефектов и/или деформаций в кристаллах при помощи внешних воздействий и методический подход *in-situ* диагностики параметров данных структур.

Технология подразумевает получение принципиально новых модификаций материалов на границах разделов за счет контролируемого разупорядочения структуры на уровне отдельных атомов. Указанные квазидвумерные структуры перспективны в качестве локализованных источников электрического тока и управляемых механических деформаций с заданной топологией, сформированных ионами, вакансиями и другими носителями заряда с помощью внешних воздействий.

Созданный комплексный методический подход с использованием рентгеновской дифракции позволяет проводить неразрушающий контроль динамики формирования наноразмерных слоев в условиях различных внешних воздействий с высокой локальностью и чувствительностью, а также изучать функциональные характеристики и свойства таких систем с временным разрешением до наносекунд.

Содержание работы

1. Разработка времяразрешающих рентгенодифракционных методик исследования индуцированных процессов в кристаллах в условиях внешних воздействий.

Разработанные времяразрешающие рентгендифракционные методики [A1, A2] могут применяться для всех типов источников рентгеновского излучения, начиная от лабораторных приборов и заканчивая установками класса *mega science* – синхротронов 3-го и 4-го поколений. Методики протестированы и апробированы для исследований с временным разрешением до 100 нс на лабораторном стенде на базе трехкристального рентгеновского спектрометра, а также на экспериментальных станциях Курчатовского источника синхротронного излучения.

Кроме того, разработаны специальные устройства для скоростного (до нескольких кГц) управления спектрально-угловыми характеристиками рентгеновского пучка на основе рентгеноакустических элементов на базе пьезоактуаторов с использованием изгибных колебательных мод [A3, A4, A5]. Интеграция данного элемента в рентгенооптическую схему также позволяет реализовывать ряд методик на основе спектроскопии, дифракции и рассеяния рентгеновского излучения на синхротронных источниках.

2. Разработка методов формирования и исследования квазидвумерных структур носителей заряда и деформаций в кристаллах.

Предложен подход и установлены соответствующие закономерности, обеспечивающие возможность формирования тонких заряженных наноразмерных слоев (*квазидвумерных структур*) в ряде функциональных диэлектрических кристаллов за счет миграции носителей заряда ионного типа во внешнем электрическом поле и управления параметрами данных структур при помощи внешних воздействий.

Важно, что формируемые квазидвумерные структуры не только создают определенную топологию зарядов, но и одновременно образуют на границах

раздела локальные деформации, создание которых в последнее время является весьма перспективной задачей стрейнтроники.

Предложен экспериментальный способ на основе методов двух- и трехкристальной рентгеновской дифрактометрии для исследования приповерхностных заряженных слоев [А6]. Обнаружена зависимость динамики формирования и релаксации квазидвумерных структур от энергии активации носителей заряда и проводимости материала. Определены такие ключевые характеристики как пространственное распределение деформаций и профиль концентрации носителей заряда, а также их зависимости в электрически-сформированных квазидвумерных структурах у поверхности кристаллов [А7]. Установлена анизотропия параметров формируемых слоев, обусловленная атомной структурой кристалла [А8]. Впервые получены экспериментальные данные о различии в распределении носителей заряда противоположного знака (вакансий и ионов), а также определены характерные толщины заряженных слоев [А9].

Разработан подход моделирования картин дифракции на основе многослойного представления кристаллической решетки в условиях изменения концентрации носителей заряда при воздействии внешним электрическим полем. Указанный подход позволил визуализировать градиент приповерхностных деформаций в кристалле, индуцированных за счет миграции и скопления носителей заряда.

3. Экспериментальное обнаружение и доказательство возможности формирования квазидвумерных заряженных структур с длительными временами релаксации.

Впервые экспериментально подтверждена возможность длительного существования заряженного состояния квазидвумерных слоев у границ раздела (*порядка года и более*) и предложены соответствующие материалы, что открывает путь к созданию специализированных микро- и наноразмерных источников электрического поля с заданной топологией [А10]. Эти структуры характеризуются не только длительным временем сохранения накопленного заряда, но и приповерхностными деформациями с соответствующим временем жизни.

4. Способ создания управляемых деформаций с помощью обнаруженного и экспериментально исследованного пьезофотовольтаического эффекта.

Предложен принципиально новый способ создания и модуляции деформаций в некоторых нецентросимметричных кристаллах (таких как $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$) за счет освещения посредством обнаруженного пьезофотовольтаического эффекта [A11]. Освещение приводит к возникновению комбинации эффектов: установлению постоянного электрического поля (фотовольтаический эффект), которое за счет пьезоэлектрического эффекта создает в кристалле механическую деформацию. Эта деформация определялась при помощи разработанных рентгенодифракционных методик с различным временным разрешением в процессе установления поля.

Обнаруженный эффект создает возможности для бесконтактной и эффективной модуляции индуцированными локализованными деформациями, что также перспективно для использования в стрейнтронике.

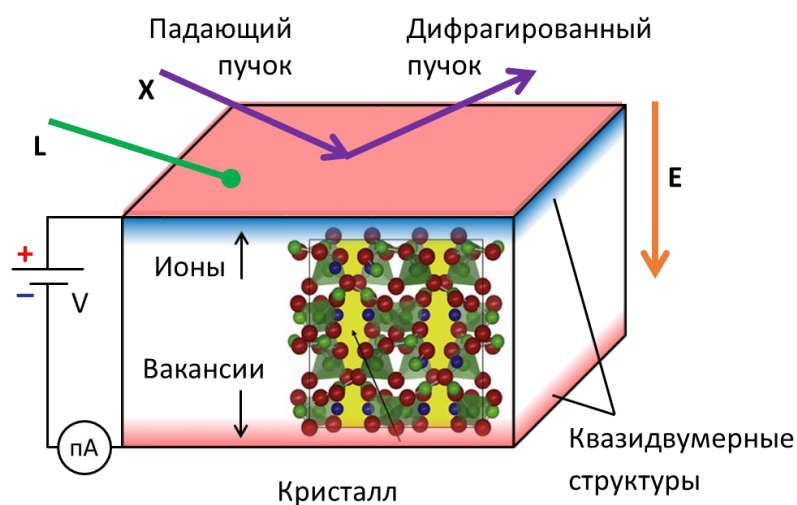


Рисунок 1. Схема формирования приповерхностных квазидвумерных структур в кристалле у границ раздела при миграции носителей заряда за счет локального воздействия электрическим полем (**E**) или лазерной засветкой (**L**). Исследование свойств системы и контроль формирования заряженных слоев осуществляется по дифракции рентгеновского излучения (**X**).

Практическое применение разработок

Совокупность результатов данной работы открывает путь для создания интеллектуальных материалов и подложек за счет направленной и управляемой модификации структуры и свойств путем имплантации и перемещения носителей заряда. Данный комплексный подход модификации материалов является

перспективным для интеграции его в различные технологические процессы производства новейших типов энергоэффективной памяти, вычислительных устройств, сенсоров, специализированных компактных и автономных источников электрического тока и устройств фотоники, обладающих высоким уровнем эксплуатационных свойств и качеств. Разработанный комплекс уникальных методик рентгенодифракционной диагностики для исследования свойств и тестирования кристаллических элементов внедрен на нескольких экспериментальных станциях Курчатовского синхротрона и на ряде лабораторных рентгеновских спектрометров в ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Достигнутый экономический и социальный эффект

В рамках работы осуществлено формирование задела в создании отечественной компонентной базы, основанной на новейших принципах построения. Описанная разработка модификации исходных материалов является перспективной и конкурентоспособной для создания энергоэффективных устройств на основе таких систем за счет относительно низкой стоимости и простоты интеграции разработки в технологическую базу предприятий, а также обеспечивает ресурсоэффективность и экологичность производства. Готовые устройства на основе описанной разработки также устойчивы к различным внешним воздействиям, включая радиационное, и могут применяться для большинства сфер промышленности.

Список публикаций по теме работы

- A1. N.V. Marchenkov, A.G. Kulikov, A.A. Petrenko, et al. // *Review of Scientific Instrum.* **89**(9), 095105 (2018)
- A2. Н.В. Марченков, А.Г. Куликов, И.И. Аткин, и др. // *Успехи физических наук* **189**(2), 187–194 (2019)
- A3. A.E. Blagov, A.G. Kulikov, N.V. Marchenkov, et al. // *Experimental Techniques* **41**(5), 517–523 (2017)
- A4. A. Kulikov, A. Blagov, N. Marchenkov, et al. // *Sensors and Actuators A: Physical* **291**, 68–74 (2019)
- A5. N. Marchenkov, A. Kulikov, A. Targonsky, et al. // *Sensors and Actuators A: Physical* **293**, 48–55 (2019)
- A6. М.В. Ковальчук, А.Е. Благов, А.Г. Куликов, и др. // *Кристаллография* **59**(6), 950–954 (2014)
- A7. А.Г. Куликов, А.Е. Благов, Н.В. Марченков, и др. // *Письма в ЖЭТФ* **107**(10), 679–683 (2018)
- A8. A.G. Kulikov, A.E. Blagov, A.S. Ilin, et al. // *Journal of Applied Physics* **127**, 065106 (2020)
- A9. А.Г. Куликов, А.Е. Благов, Н.В. Марченков, и др. // *Физика твердого тела* **62**(12), 2120–2128 (2020)
- A10. А.Г. Куликов, Ю.В. Писаревский, А.Е. Благов, и др. // *Физика твердого тела* **61**(4), 671–677 (2019)
- A11. F.S. Pilyak, A.G. Kulikov, V.M. Fridkin, et al. // *Physica B: Condensed Matter*, 412706 (2020)