

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу **Лисьих Бориса Игоревича** «Формирование доменной структуры в объеме сегнетоэлектриков ультракороткими лазерными импульсами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Работа Лисьих Бориса Игоревича посвящена изучению формирования доменной структуры на поверхности и в объеме одноосных монокристаллов семейства ниобата лития и танталата лития в результате облучения импульсным лазерным излучением двух видов: микросекундным излучением с длиной волны 10.6 мкм и фемтосекундным излучением с длиной волны 1.03 мкм. Ниобат лития и танталат лития находят широкое применение при создании пьезо- и пироэлектрических преобразователей, устройств на основе нелинейных фотонных кристаллов. Практические применения основаны на использовании стабильных доменных структур с заданными параметрами, создание которых в подавляющем большинстве случаев осуществляется за счет нанесения электродов на поверхность кристаллов и приложении внешнего электрического поля. Применение лазерного облучения позволяет упростить создание доменных структур, кроме того, широкое использование фемтосекундных лазеров привело к возникновению ряда исследований, посвященных переключению поляризации в объеме кристаллов. Следует отметить, что в опубликованных работах наблюдается недостаток качественного объяснения природы формирования доменов под действием фемтосекундного лазерного излучения, сфокусированного в объеме. **Актуальность** работы заключается в развитии методов создания регулярных доменных структур в объеме сегнетоэлектрических кристаллов, изучении закономерностей образования доменов различных форм и предложении механизма их формирования.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, перечня условных обозначений и сокращений и списка цитируемой литературы, состоящего из 150 наименований. Общий объем диссертации составляет 106 страниц, содержит 47 рисунков и 1 таблицу. В заключении работы представлены выводы и перспективы дальнейшей разработки темы.

Первая глава посвящена обзору основных свойств сегнетоэлектриков, кинетическому подходу, используемому при описании формирования и эволюции доменной структуры, а также экспериментальным результатам создания доменных структур при помощи лазерного излучения. В главе представлен краткий обзор основных свойств кристаллов семейства ниобата лития и танталата лития.

Во **второй главе**, являющейся методической, представлены описание исследуемых материалов, использованных экспериментальных установок и методик исследования доменной структуры. Исследование проводилось в монокристаллических монодоменных пластинах ниобата и танталата лития различных составов, вырезанных перпендикулярно полярной оси. Визуализация доменных структур проводилась при помощи сканирующей элеткронной микроскопии, микроскопии генерации второй гармоники, сканирующей зондовой микроскопии.

Третья глава посвящена исследованию особенностей формирования доменных структур при облучении сегнетоэлектрика расфокусированным микросекундным лазерным излучением дальнего ИК-диапазона.

На примере танталата лития конгруэнтного состава продемонстрировано, что в результате облучения монодоменной пластины, покрытой проводящим слоем, происходит формирование полосовых доменных структур, вид которых отличается в зависимости от расстояния до центра лазерного пятна. Проведены

визуализация доменных структур на поверхности и в объеме образцов, а также анализ ориентации доменных структур.

Выявлены три типа областей с доменными структурами различных видов: 1) центральная область со скругленными полосовыми доменами и слабо выраженной ориентацией доменов вдоль трех Y -направлений; 2) промежуточная область с прямыми полосовыми доменами и хорошо выраженной ориентацией вдоль трех Y -направлений; 3) внешняя область с прямыми полосовыми доменами, ориентированными вдоль одного из Y -направлений.

В четвертой главе представлены результаты создания и анализа доменных структур в ниобате лития, легированном магнием.

Было показано, что облучение фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК-диапазона, сфокусированном в объеме сегнетоэлектрика, приводит к формированию модифицированных областей (микротрек), на которых были локализованы домены. В зависимости от энергии лазерных импульсов наблюдался рост доменов от микротрек в сторону Z - полярной поверхности кристалла. Если домены достигали полярной поверхности, то их форма была призматической с нейтральными доменными стенками; если рост завершался в объеме, то домены приобретали форму конусов с заряженными доменными стенками. Также было показано, что отжиг кристалла после создания в его объеме микротрек приводит к росту доменов в сторону обеих полярных поверхностей на всю глубину кристаллов.

Формирование доменов обусловлено возникновением связанных электрических зарядов на поверхности раздела кристалл-микротрек.

Пятая глава посвящена сравнению изолированных доменов, возникающих при облучении фемтосекундным лазерным излучением различных энергий и с разным количеством импульсов.

Показано, что в ниобате лития конгруэнтного состава роста доменов от микротрек не происходило. В танталате лития, легированном магнием,

происходил рост доменов с поперечным сечением в форме трехлучевых звезд, лучи которых ориентированы вдоль Y^+ направлений. В стехиометрическом танталате лития домены имели веретенообразную форму. Представлены зависимости размеров доменов от параметров лазерного излучения: энергии и количества импульсов.

В заключительной части главы представлено объяснение полученного разнообразия форм доменов на основе кинетического подхода, использующего превышение локального значения электрического поля над пороговым значением в качестве движущей силы роста доменов.

В **шестой главе** представлены результаты формирования доменных структур в конгруэнтном ниобате лития в результате линейного сканирования фемтосекундным лазерным излучением, сфокусированном в объеме кристалла.

Выявлено, что линейное сканирование приводит к формированию полосовых доменов в форме двойных гребней, их поперечное сечение аналогично случаю локального облучения ниобата лития конгруэнтного состава. При помощи сканирующей зондовой микроскопии выявлены структурные особенности микротрекков: наблюдалась квазипериодическая структура, состоящая из аморфизированных областей, которая являлась источником деполяризующего поля, действие которого приводило к формированию домена. Также показано, что рост доменов происходил под действием пироэлектрического поля, возникающего при изменении температуры образца, поскольку лазерное излучение приводило к локальному нагреву материала.

Степень обоснованности, достоверности, научная новизна, практическая и теоретическая значимость положений и выводов, сформулированных в диссертации.

Экспериментальные данные получены с использованием современного оборудования и современных методов обработки данных. Они согласуются между собой, а также с результатами предыдущих исследований как лабораторией

УрФУ, так и лабораторий мировых лидеров в области тематики диссертации. Полученные результаты не противоречат физическим моделям, признанными в научном сообществе. Достоверность научных положений, вынесенных на защиту, подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science.

Результаты диссертации обладают явной новизной. Впервые установлено, что под действием фемтосекундного лазерного излучения сегнетоэлектрика возникают локализованные в объеме домены, обволакивающие аморфизованные микротрещины. Введено удачное понятие «обволакивающих» доменов. В явном виде на СЭМ показано, что поверхностные домены имеют в основании шестиугольник. Показано также, что в объеме домены имеют форму гексагональных пирамид, а после прорастания приобретают форму гексагональных призм. В легированном магнием танталате лития выявлены условия формирования изолированных доменов с поперечным сечением в форме трехлучевых звезд (гексагональные призмы с «крыльями» в 3D). Такая четкость форм доменов никем не наблюдалась ранее. Показано, что возникновение доменов в объеме обусловлено превышением пироэлектрического поля над пороговыми значениями; различие пороговых значений в различных кристаллах приводит к разнообразию форм образующихся доменов.

Представленные результаты имеют фундаментальную значимость, поскольку демонстрируют экспериментально и теоретически закономерности формирования доменных структур в различных сегнетоэлектриках при их облучении лазерным излучением. Прикладная значимость работы заключается в перспективах применения полученных знаний при создании устройств нелинейной оптики для частотно-геометрических преобразований лазерного излучения.

Таким образом, результаты, полученные автором, имеют существенное значение для физики конденсированного состояния и оптики, а также их

практического применения. Выводы работы являются полными и непротиворечивыми.

Вопросы и недостатки в содержании и оформлении диссертации.

1. Неясен смысл нанесения пленки ИТО на поверхность кристалла при его облучении CO_2 лазером. Неконтролируемое распространение нагрева на более широкую область, чем область, облученная лазером, должно приводить к более сложной интерпретации экспериментальных данных. Желательно было бы сравнить структуры, полученные при наличии пленки и без нее, и параметры лазерного излучения, приводящего к возникновению тех или иных структур.
2. В работе изучены условия образования доменов различной формы и размеров, однако реальной систематики, заявленной в разделе «Новизна», и даже сводного сравнения результатов не приведено.
3. На стр. 54 указано, что при использовании CO_2 лазера «Размер облученной области составил 500 мкм в диаметре, что хорошо соответствует 480 мкм дисперсии гауссова распределения...». В чем различие и как обе эти величины измерялись? Размер облученной области при использовании фемтосекундного лазера не приведен совсем. Не приведены параметры установки, в частности, кольцевой диафрагмы, используемой при регистрации Черенковской второй гармоники.
4. Неясно, чем вызвана неоднородность интенсивности ВГ в некоторых поперечных сечениях доменов (рис. 4.7а, рис.5.4 - 220мкм).
5. Термин «двойной гребень» требует разъяснения.
6. Встречаются неполные или ошибочные подписи к рисункам. Например, рис. 4.7. имеет четыре панели, а в подписи описаны только две. При этом представлены как поперечные, так и боковые сечения, в то время как в подписи указаны только поперечные.

Заключение по диссертации.

Диссертационная работа Лисьих Бориса Игоревича «Формирование доменной структуры в объеме сегнетоэлектриков ультракороткими лазерными импульсами» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Замеченные недостатки не снижают ее научной значимости.

Содержание диссертации соответствует научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Работа отвечает критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Лисьих Борис Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Мишина Елена Дмитриевна,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий
кафедры наноэлектроники института перспективных технологий и
индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА-Российский
технологический университет».

Адрес: 119454, Москва, проспект Вернадского, дом 78

Телефон: +7 (499) 215-65-65; +7 (916) 550 6239

Адрес электронной почты: mishina_elenas57@mail.ru, mishina@mirea.ru

Мишина Е.Д.

«22» августа 2024 г.

Подпись руки

УДОСТОВЕРЯЮ:

Начальник Управления кадров М.М. Бухан

