

### **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 экспериментальному изучению формирования доменной структуры в одноосных сегнетоэлектриках семейства ниобата и танталата лития в результате облучения импульсным микро- и фемтосекундным лазерным излучением. Многие применения ниобата и танталата лития основаны на использовании стабильных доменных структур, создание которых в основном проводится при помощи нанесения электродов на поверхность кристаллов и последующего приложения внешнего электрического поля. Лазерное излучение, позволяет упростить создание подобных структур и ряд научных групп проводят исследования в этом направлении. Тем не менее в опубликованных работах имеется недостаток качественного объяснения природы формирования доменов под действием лазерного излучения. **Актуальность** работы заключается в изучении закономерностей образования доменов в объеме сегнетоэлектрических кристаллов и предложении механизма их формирования, а также развитии методов создания регулярных доменных структур в объеме сегнетоэлектриков под действием сфокусированного в объеме фемтосекундного лазерного излучения.

#### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа содержит введение, 6 глав, заключение, список условных обозначений и сокращений, а также список литературных источников, состоящий из 150 наименований. Объем диссертационной работы составляет 106 страниц, включая 47 рисунков и 1 таблицу. Выводы и перспективы дальнейшей разработки темы представлены в заключении.

В **первой главе** представлен обзор свойств сегнетоэлектриков, подхода к описанию формирования доменных структур. Представлено описание экспериментальных результатов создания доменных структур с помощью лазерного излучения. Глава содержит краткий обзор физических свойств одноосных сегнетоэлектриков ниобата лития и танталата лития.

**Вторая глава** является методической, в ней представлено описание исследуемых материалов, экспериментальных установок и методов исследования доменных структур. Исследование проводилось в монокристаллических монокристаллических пластинах ниобата и танталата лития различных составов, вырезанных перпендикулярно полярной оси.

**Третья глава** посвящена исследованию формирования доменных структур при облучении танталата лития микросекундным лазерным излучением дальнего ИК-диапазона.

Было показано, что при облучении монокристаллической пластины, покрытой проводящим слоем, формируются доменные структуры, внутренняя структура каждой зависит от интенсивности лазерного излучения. Анализ изображений показал, что выделяются три характерные области. 1) Центральная область, со слабо выраженной ориентацией полосовых доменов вдоль трех  $Y^+$  направлений. 2) Промежуточная область, с ярко выраженной ориентацией полосовых доменов вдоль  $Y^+$  направлений. 3) Внешняя область, в которой параллельные домены были ориентированы вдоль одного из  $Y^+$  направлений.

**Четвертая глава** посвящена исследованию формирования доменов в легированном магнием ниобате лития при помощи облучения фемтосекундным лазерным излучением.

Облучение в объеме приводило к формированию аморфизованных областей кристалло – микротрещин, на которых формировались обволакивающие домены. Увеличение энергии лазерных импульсов приводило к росту доменов в Z-

полярном направлении. Домены имели пирамидальную форму и заряженные доменные стенки, если рост доменов останавливался в объеме. Если же домены достигали полярной поверхности, то форма менялась на призматическую с нейтральными доменными стенками.

Отжиг кристаллов, предварительно облученных, приводил к росту от микротрещин сквозных доменов в сторону обеих полярных граней.

В **пятой главе** представлено сравнение форм доменов, возникающих при локальном облучении фемтосекундным лазерным излучением, в ниобате и танталате лития различных составов.

В зависимости от состава материала, определяющего величину энергетического порога формирования доменов, форма доменов значительно изменялась: в ниобате лития конгруэнтного состава наблюдались только обволакивающие домены, тогда как в танталате лития стехиометрического состава происходил рост веретенообразных доменов; в легированном магнием танталате лития с ростом энергии и количества лазерных импульсов происходил рост доменов с трехлучевым поперечным сечением. В главе приводится описание механизма, определяющего представленное разнообразие форм доменов.

В **шестой главе** продемонстрированы результаты формирования доменных структур в ниобате лития при помощи сканирования фемтосекундным излучением, сфокусированным ниже полярной поверхности.

В результате линейного сканирования были получены двойные гребневые структуры, локализованные на полосовых микротрещинах. Форма в поперечном сечении была схожей с формой при локальном облучении. Исследование при помощи сканирующей зондовой микроскопии выявило, что микротрещины имели квазипериодическую субструктуру, на которой были локализованы домены. Субструктура микротрещин становилась источником наведенного электрического заряда, приводящего к формированию деполяризующего поля, в

результате действия которого формировались обволакивающие домены, тогда как их рост происходил под действием пьезоэлектрического поля на этапе охлаждения образца после локального нагрева.

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

**Научные положения**, выносимые на защиту, подтверждаются публикациями в рецензируемых в базах данных Web of Science и Scopus научных журналах. Экспериментальные данные не противоречивы и согласованны.

**Научная новизна** исследования заключается в сравнении сегнетоэлектрических доменных структур, сформированных в результате облучения различных сегнетоэлектрических материалов микро- и фемтосекундным лазерным излучением. Было продемонстрировано, что в зависимости от соотношения энергии и количества лазерных импульсов и пороговых полей форма доменов значительно изменяется. В работе впервые представлены результаты по формированию доменов с трехлучевым поперечным сечением в танталате лития, легированного магнием.

Результаты работы обладают фундаментальной значимостью в силу того, что демонстрируется закономерность формирования доменных структур в кристаллах семейства ниобата лития и танталата лития в результате облучения фемтосекундным лазерным излучением. К прикладной значимости работы относятся перспективы применения полученных результатов в создании устройств нелинейной оптики и фотоники.

**Вопросы и замечания к содержанию диссертационной работы.**

1. В третьей главе исследовано формирование доменных структур при облучении танталата лития микросекундным лазерным излучением дальнего ИК-диапазона. Было бы актуально сравнить те же процессы, происходящие в

ниобате лития. Остается только домысливать, возможно ли формирование доменных структур при облучении ниобата лития микросекундным излучением или эти эксперименты просто выходят за рамки проделанной работы?

2. Говоря о природе сформированных фемтосекундным излучением микротрещин, вокруг которых формируются домены, автор, ссылаясь на работу, проделанную другими авторами в другом образце ([Wang e. A. // *Adv. Mater.* 2023, 35, p. 2303256]) на стр. 15 автореферата идентифицирует их как аморфизованную область. Вместе с тем, такое потемнение выглядит похожим «laser damage» (изменение показателя преломления под действием электрического поля, вызванного появлением зарядов на границе освещенной области, - фотогальваническим эффектом), впервые описанным в классической работе [A. Ashkin; G. D. Boyd; e.a.// *Appl. Phys. Lett.* 9, 72–74 (1966)]. В этом случае полосы должны были бы исчезнуть при нагреве облученного образца, что прояснило бы эти сомнения относительно конкретной экспериментальной ситуации.
3. На стр. 15 автореферата написано, что пороговое поле в MgOCLN в четыре раза меньше чем в CLN, что способствует эффективному формированию доменов в MgOCLN. Вместе с тем, примесь MgO (за счет увеличения проводимости?) существенно подавляет электрические поля в кристалле. Хотелось бы получить комментарий, основанный из независимых экспериментов, во сколько раз эта примесь уменьшает электрические поля и могут ли при этом образоваться поля, превышающие 5 kV/cm?

Следует отметить, что приведенные выше замечания не умаляют достоинств представленной работы.

**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.

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

Пугачев Алексей Маркович,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Лаборатории спектроскопии  
конденсированных сред, ФГБУУН Институт автоматки и электротрии  
Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, Новосибирск, проспект академика Коптюга, дом 1

Телефон: (383) 330-79-69, (383) 339-93-58

Адрес электронной почты: apg@iae.nsk.su

 / Пугачев А.М. / «09» сентября 2024 г.

Подпись Пугачева А.М. заверяю:

Ученый секретарь ИАЭ  
к.ср.м.н. Иваненко

