



**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)**

Утверждаю
Директор ИАиЭ СО РАН
член-корр. РАН, д.ф.-м.н.
_____ Бабин С.А.

«__» _____ 20__ г.

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Института автоматки и электрометрии” Сибирского отделения Российской академии Наук на диссертацию Савченкова Евгения Николаевича на тему “Дифракция световых волн на регулярных доменных структурах в сегнетоэлектрических кристаллах LiNbO_3 и LiNbO_3 ”, представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы. Диссертационная работа Савченкова Евгения Николаевича “Дифракция световых волн на регулярных доменных структурах в сегнетоэлектрических кристаллах LiNbO_3 и LiTaO_3 ” посвящена экспериментальному исследованию, а также моделированию, дифракции света на периодических и квази-периодических доменных структурах в важнейших для приложений сегнетоэлектрических материалах – кристаллах ниобата и танталата лития. В англоязычной литературе подобные структуры носят сокращённые названия PPLN и PPLT, автор же именует их регулярными доменными структурами (РДС). Важность РДС связана с их высокой стабильностью и многочисленными приложениями в области нелинейной оптики (quasi-phase-matching), а также для модуляторов света и высокочастотных оптических микрорезонаторов. Немалый дополнительный интерес к этой области связан с недавним обнаружением высокой проводимости доменных стенок. Данный эффект может иметь важные последствия как для инженерии доменных структур, так и для их физических свойств. Важно также, что дифракционные свойства могут контролироваться приложенным полем и существенно зависеть от геометрии стенок – прямые они или наклонные. Это открывает широкие возможности для дифракционных исследований РДС и анализа их свойств. Ясно

также, что методы Брэгговской дифракции должны адаптироваться к объекту исследования. На основании вышесказанного считаем, что тема диссертации является вполне актуальной для физики конденсированного состояния.

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 159 страниц, включая 35 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 142 наименования.

Во введении сформулированы актуальность и степень разработанности темы исследования, общая цель работы и её конкретные задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов и их апробация, структура работы, а также личный вклад автора.

В Главе 1 представлен обзор работ, по регулярным доменным структурам, возникающим при переполяризации сегнетоэлектрических кристаллов ниобата и танталата лития внешним электрическим полем, по характеристике этих материалов, а также методам описания и исследования доменных структур, а также их приложениям, связанным с преобразованием спектральных параметров и модуляцией лазерного излучения.

В Главе 2 изложены результаты оригинальных работ с участием автора по анализу возмущений тензора оптической диэлектрической проницаемости в кристаллах группы $3m$ для незаряженных 180° доменных стенок. Рассматривается случаи отсутствия и присутствия приложенного электрического поля. В отсутствие поля анализируются квазидвумерные изменения проницаемости за счёт резкого скачка спонтанной поляризации на стенках и трёхмерные периодические изменения, обусловленные упругими деформациями вокруг стенок и флексоэлектрическим эффектом. Рассмотрение ведётся в рамках теории Ландау-Гинзбурга-Девоншира. В присутствии поля, анализируется также дополнительный вклад в изменения проницаемости, обусловленный линейным электрооптическим эффектом. Кроме того, анализируются общие геометрические схемы изотропной и анизотропной Брэгговской дифракции. Рассмотренные результаты формируют теоретический базис для последующего рассмотрения экспериментальных данных.

Глава 3 посвящена изложению оригинальных результатов экспериментальных исследований изотропной и анизотропной дифракции световых волн на РДС с незаряженными стенками в отсутствие внешнего поля применительно к кристаллу $1\% \text{MgO}:\text{LiTaO}_3$. В частности, зарегистрированы многие порядки изотропной дифракции на поверхностном рельефе, а также многие процессы, отвечающие Брэгговской изотропной и анизотропной дифракции. Установлены основные эмпирические закономерности дифракционных порядков. Анализ показал, что угловая селективность Брэгговской дифракции обусловлена неидеальностью реальных периодических доменных структур.

В Главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований и моделирования изотропной Брэгговской дифракции на РДС с наклонными (заряженными) доменными стенками в кристаллах $5\% \text{MgO}:\text{LNbO}_3$. Этот случай представляет особый вызов для исследователя и вносит качественные изменения в картину дифракции. Эксперименты проведены как в отсутствие внешнего электрического поля, так и в случае приложенного

к образцам синусоидального напряжения. Подробно описана оригинальная методика эксперимента, позволяющего видеть изменения ширины \pm доменов вдоль z .

Глава 5 посвящена изучению фотоиндуцированной проводимости регулярных доменных структур с заряженными доменными стенками в кристаллах $5\%MgO:LiNbO_3$. Оно развивает результаты, полученные в предыдущей главе. Исследования проводились на разных длинах волн, как методами Брэгговской дифракции с использованием внешнего электрического поля, так и методами нестационарной фотоэдс. Подробно описана методическая сторона экспериментов и изложены их результаты. Дана интерпретация экспериментальных данных в терминах эффективной фотопроводимости, учитывающей вклад доменных стенок.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается во первых в том, что выбранная тема – исследование регулярных доменных структур в сегнетоэлектриках неразрушающими методами дифракции световых волн – является по существу новой. Во вторых, она подтверждается новизной указанных выше основных результатов автора. В работе получен целый ряд новых научных результатов. Среди них можно выделить следующие:

- 1) Анализ возможных процессов Брэгговской дифракции на доменных стенках РДС в кристаллах симметрии $3m$ со стенками разных типов в отсутствие приложенного поля и выяснение условий экспериментальной реализации этих процессов.
- 2) Моделирование возмущений показателя преломления в РДС со стенками разных типов в кристаллах группы $3m$ с учётом электрического поля, приложенного в z направлении, учитывая как электрооптические вклады, так и вклады доменных стенок.
- 3) Наблюдение различных порядков изотропной и анизотропной дифракции для РДС с прямыми доменными стенками в кристалле $1\%MgO:LiTaO_3$ в отсутствие приложенного поля. Получение количественных экспериментальных данных по дифракционной эффективности и объяснение полученных данных на основе разработанного общего подхода.
- 4) Экспериментальное установление основных качественных и количественных закономерностей Брэгговской дифракции для РДС с наклонными доменными стенками в кристалле $5\%MgO:LiNbO_3$ в отсутствие приложенного электрического поля. Объяснение этих данных на основе теоретической модели Брэгговской дифракции в приближении слабой связи.
- 5) Обнаружение и экспериментальное исследование методом Брэгговской дифракции фотопроводимости РДС, обусловленной присутствием заряженных доменных стенок, в кристалле $5\%MgO:LiNbO_3$ в видимой области спектра. Выяснение спектральных закономерностей и зависимости от интенсивности света.
- 6) Применение экспериментального метода нестационарной фотоэдс к исследованию РДС с заряженными доменными стенками в кристалле $5\%MgO:LiNbO_3$, независимое подтверждение результатов, полученных методами Брэгговской дифракции, и получение дополнительных данных о характере фотоиндуцированных электронных процессов.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, представленных в диссертации, подтверждается их внутренней непротиворечивостью, согласием с имеющимися общими физическими представлениями, с результатами других

исследователей, а также использованием современного оборудования и верифицированных методов физического и численного моделирования. Представленные результаты изложены в 25 научных публикациях, включая 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 4 статьи в журналах, индексируемых в базах Scopus и/или Web of Science, и 10 публикаций в сборниках научных трудов и материалов научно-практических конференций, входящих в РИНЦ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на более чем двадцати российских и международных научных конференциях, симпозиумах и семинарах, включая Всероссийские школы-семинары "Волновые явления в неоднородных средах", международные конференции "Голография", международные конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям, International Conference "Scanning Probe Microscopy", Международная конференции "Фотоника и информационная оптика", Международные конференции "Фотоника и информационная оптика".

Практическая значимость работы связана с тем, что доменная инженерия в сегнетоэлектриках, и, в частности, в ниобате лития, чрезвычайно важна для многих уже имеющихся и потенциальных приложений, таких как параметрическая генерация, генерация световых гармоник, частотные комбы в микрорезонаторах, нано-электроника. Поэтому разработка неразрушающих оптических методов контроля доменных структур весьма важна. Она может быть хорошим дополнением к уже имеющимся методам, таким как травление и сканирующая силовая микроскопия.

Основные научные положения, выносимые на защиту, являются новыми и достоверными.

Рекомендации по использованию результатов работы: Результаты диссертации могут быть использованы при проведении научно-исследовательских работ в области оптики и инженерии сегнетоэлектрических материалов. Они также могут найти применения при разработке оптических устройств, использующих сегнетоэлектрики LiNbO_3 и LiTaO_3 . В частности они могут быть использованы в лаборатории сегнетоэлектриков НИИ физики и прикладной математики УрГУ (г. Екатеринбург), лаборатории кристаллофизики ИФ СО РАН (г. Красноярск) и лаборатории спектроскопии конденсированных сред ИАиЭ СО РАН (г. Новосибирск).

По тексту диссертации имеются следующие замечания:

- 1) Применение подхода/теории Ландау-Гинзбурга-Девоншира к сегнетоэлектрикам LN и LT едва ли может быть обосновано из-за очень высоких температур фазового перехода. С другой стороны, понятия теории упругости, электрооптики и пр. сохраняют свою силу вне рамок теории Ландау-Гинзбурга.
- 2) Моделирование рассмотренных в диссертации оптических эффектов может быть упрощено, если не пытаться искусственно разрешить субволновую (типично нанометровую) структуру доменных стенок, а использовать дельта-функциональные изменения оптических характеристик на этих стенках.
- 3) К сожалению, в диссертации нет сравнения характеристик (качества) исследованных доменных структур, произведённых в ООО ЛАБФЕР, с коммерческими образцами PPLN, применяемыми в нелинейной оптике. Такое сравнение могло бы быть полезным.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не умаляют высокой оценки диссертационной работы.

Заключение

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, защищаемые положения и выводы. Диссертационная работа Савченкова Евгения Николаевича “Дифракция световых волн на регулярных доменных структурах в сегнетоэлектрических кристаллах LiNbO_3 и LiNbO_3 ”, представляет собой самостоятельное законченное исследование. Оно отвечает 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, а ее автор Савченков Евгений Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Доклад Е. Савченкова, отражающий основные результаты диссертационной работы был заслушан и обсуждался на совместном семинаре лаборатории спектроскопии конденсированных сред, лаборатории нелинейной физики и теоретической группы нелинейной оптики ИАиЭ СО РАН. Семинар состоялся 22.09.2023, на нем присутствовало 15 человек, включая одного чл.-корр РАН и пять докторов физико-математических наук. На все вопросы, возникшие во время обсуждения, были получены ответы.

Отзыв составлен г.н.с. Е.В. Подивиловым и г.н.с. Б.И. Стурманом.

Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

_____ Подивилов Е.В.

Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

_____ Стурман Б.И.

Подписи сотрудников заверяю
ученый секретарь ИАиЭ СО РАН, к.ф.-м.н.

_____ Донцова Е.И.

Контакты ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН). 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д.1, т.: (383) 330-79-69, факс: (383)330-88-78, e-mail: iae@iae.nsk.su.