

ОТЗЫВ официального оппонента

**на диссертацию Кадетовой Александры Владимировны
на тему: «Дефекты структуры и нелинейно-оптические свойства
легированных кристаллов ниобата лития», представленную
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния**

Ниобат лития в настоящее время является одним из важных компонентов, входящих в состав современных телекоммуникационных и акустооптических устройств, оптических модуляторов терагерцового излучения, обеспечивающих передачу информации по одному оптоволокну со скоростями от 8 до 800 Гбит/с. Подобную востребованность ниобата лития можно объяснить уникальной комбинацией физических свойств этого материала: он обладает широким окном прозрачности (для электромагнитного излучения с длинами волн от 0,32 до 5 мкм), достаточно большими значениями электрооптических, нелинейно-оптических, акустооптических и пьезоэлектрических коэффициентов. Однако применение чистых кристаллов ниобата лития LiNbO_3 ограничено их низким порогом к оптическому повреждению. Одним из способов обойти это ограничение является использование ниобата лития, легированного различными нефоторефрактивными двух-, трех- и четырехвалентными примесями.

Актуальность темы диссертационной работы Кадетовой А.В. обусловлена указанными выше причинами, поскольку эта работа посвящена изучению концентрационного влияния легирования кристаллов ниобата лития примесями цинка, эрбия и тербия на структурное состояние и физические характеристики, в частности, на коэффициенты нелинейно-оптической восприимчивости, а также описанию дефектной структуры таких объектов.

Научная новизна работы Кадетовой А.В. заключается в том, что впервые установлены модели расположения собственных и примесных дефектов в кристаллах ниобата лития, легированных цинком методом прямого и гомогенного легирования в широком концентрационном диапазоне, для

исследованных в данной работе легированных редкоземельными примесями (эрбием и тербием) кристаллов ниобата лития впервые обнаружены пороговые эффекты и установлены модели расположения собственных и примесных дефектов, впервые рассчитаны коэффициенты тензора нелинейно-оптических восприимчивостей исследованных в диссертационной работе объектов, впервые рентгенографическими методами исследования атомной структуры вещества зарегистрирована сверхструктура в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития различного состава и генезиса, обусловленная нарушением чередования катионов в направлении полярной оси и появлением протяженных дефектов ильменитового типа.

Научно-практическая значимость работы Кадетовой А.В. состоит в том, что в ней содержатся рекомендации по возможному применению в реальных оптических устройствах кристаллов ниобата лития, легированных активной (Er, Tb) и нефоторефрактивной (Zn) примесями в целях увеличения их устойчивости к оптическому повреждению, а также заданы концентрационные ограничения для достижения этих свойств.

Обоснованность и достоверность положений, выносимых на защиту, а также научных выводов, сформулированных в работе Кадетовой А.В. обеспечена применением современных методов получения исследованных кристаллов и компьютерной обработки данных, полученных с помощью аттестованного научно-исследовательского оборудования (рентгеновского дифрактометра, рамановского спектрометра, установки для проведения экспериментов по фотоиндуцированному рассеянию света). Сочетание методов рентгеноструктурного анализа и рамановской спектроскопии позволило достоверно оценить реальную структуру исследуемых кристаллов. Высокий уровень полученных результатов подтверждается 14 публикациями в рецензируемых российских и иностранных научных журналах, а также их апробацией на ряде международных и всероссийских конференций.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и 2-х приложений.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, а также выносимые на защиту положения, научно-практическая значимость и апробация работы.

В первой главе приводится обширный литературный обзор источников, посвященных подробному обсуждению вопросов установления структуры кристаллов ниобата лития и моделей расположения собственных дефектов в них, а также фоторефракционным свойствам номинально чистых и легированных кристаллов ниобата лития и влиянию природы легирующих примесей на их функциональные оптические характеристики.

Во второй главе приведено подробное описание способов получения номинально чистых и легированных кристаллов ниобата лития, а также примененных для их изучения экспериментальных методик – рентгеноструктурного анализа, расчета нелинейно-оптической восприимчивости, спектроскопии комбинационного рассеяния света (рамановской спектроскопии), фотоиндуцированного рассеяния света и лазерной коноскопии.

В третьей главе приведены результаты качественного фазового анализа порошкообразных образцов ниобата лития, легированных примесями цинка, эрбия и тербия, в том числе индицирования дифракционных пиков. Присутствие на экспериментальных дифрактограммах запрещенных пространственной группой симметрии $R3c$ сверхструктурных линий объясняется ильменитоподобным упорядочением дефектов в катионной подрешетке кристаллов ниобата лития. Этот вывод подтверждается результатами анализа спектров комбинационного рассеяния.

В четвертой главе приведены результаты исследования номинально чистых и легированных цинком кристаллов ниобата лития различными методами. На основании проведенных измерений методами рентгенографии и лазерной коноскопии было показано, что кристалл, полученный методом гомогенного легирования, при общей высокой композиционной однородности имеет неоднородную структуру и худшее оптическое качество, чем кристаллы, полученные методом прямого легирования. Данный вывод подтверждается оценкой степени дефектности структуры методом оптической микроскопии. Обнаружены пороговые значения концентраций легирующей примеси, при которых структурные изменения заметно влияют на нелинейно-оптические свойства кристаллов. На основании сравнения результатов для кристаллов, легированных различными методами, делается вывод о том, что кристаллы $LiNbO_3:Zn$, полученные методом прямого легирования, предпочтительнее для нелинейной оптики в качестве среды, в которой происходит преобразование излучения во вторую гармонику, в то время как

кристаллы, полученные методом гомогенного легирования, могут быть использованы для линейного преобразования характеристик оптического излучения.

В пятой главе приведены результаты исследования кристаллов ниобата лития, легированных редкоземельными элементами – эрбием и тербием, в частности, описывается доменная структура соответствующих монокристаллов. Автор предоставляет рекомендации о возможном использовании в лазерных источниках, излучающих в синей области спектра, кристаллов с допороговой концентрацией тербия (до 2 мол.%).

В Заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа Кадетовой А.В. является завершенным исследованием, в котором подробно и скрупулезно освещены вопросы влияния легирования атомами цинка и редкоземельных элементов (эрбия и тербия) на структурные и оптические характеристики кристаллов ниобата лития, изучены и обоснованы соответствующие концентрационные зависимости. По итогам проведенных исследований автором даются рекомендации о наиболее перспективных для использования в лазерных и оптоволоконных устройствах системах на основе легированного ниобата лития. Особое внимание следует обратить на результаты проведенных автором теоретических расчетов значений линейной восприимчивости и тензорных нелинейно-оптических коэффициентов для всех исследованных образцов, приведенные в приложении к диссертационной работе.

Несмотря на общее хорошее впечатление о диссертационной работе, по ней присутствуют ряд **вопросов и замечаний**:

1. В описании методики регистрации экспериментальных дифрактограмм приводятся угловой диапазон и шаг сканирования, но отсутствует информация об использовавшейся геометрии сканирования, режиме сканирования (непрерывный или поточечный), а также скорости сканирования в случае непрерывного сканирования либо времени регистрации в точке в случае поточечного сканирования;

2. Не приводятся численные критерии выбора функций Пирсон χ^2 для описания формы экспериментальных дифракционных максимумов;
3. Термины «дифрактограмма» и «рентгенограмма», например, в разделе 2.1.2, описывающем методику полнопрофильного анализа дифракционных картин по Ритвельду, применяются в произвольном порядке, что несколько затрудняет их восприятие;
4. Дифрактограммы на рис. 26 следовало бы поместить на один график для облегчения их визуального сравнения друг с другом. Аналогично для рис. 27 и 28;
5. В таблице 8 не приведены погрешности для определенных значений углового положения дифракционных максимумов и рассчитанных по ним величин межплоскостных расстояний;
6. В главе 3 приведено сравнение расчетной дифрактограммы с экспериментальной только для ниобата лития, легированного 3 мол. % тербия, при этом не описываются (хотя бы кратко) результаты такого сравнения для остальных легированных систем;
7. Результаты экспериментов по изучению оптического поглощения в кристаллах, легированных цинком, приводятся в главе 5, посвященной описанию структуры и свойств кристаллов, легированных редкоземельными элементами, что представляется недостаточно логичным;
8. Подписи по осям графиков на некоторых рисунках (например, 46, 58 и 59) приведены без перевода на русский язык.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют научной и практической значимости проведенного Кадетовой А.В. диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении

ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а сама диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Кадетова Александра Владимировна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,
исполняющий обязанности ведущего научного сотрудника сектора №9
«Физико-химических исследований» лаборатории №2 «Химии нефти и
нефтехимического синтеза» ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени
Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН

Левин Иван Сергеевич

31.05.2023

Контактные данные:

тел.: _____, e-mail: levin@ips.ac.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация:

01.04.07 «Физика конденсированного состояния»

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, дом 29.

Тел.: 8(495)955-42-01; e-mail: tips@ips.ac.ru

Подпись сотрудника ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Института
нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН И.С. Левина удостоверяю:



31.05.2023 г.