

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Смирнова Максима Владимировича на тему:
«Структурные дефекты и рекомбинационные процессы в монокристаллических и керамических твердых растворах $\text{LiNbO}_3:\text{Me}$ (Me – Nb, Zn, Mg) и ANbO_4 (A – Gd, Y)»
по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Актуальность работы

Одним из наиболее важных сегнетоэлектрических материалов является нелинейно-оптический монокристалл ниобата лития. Окно прозрачности ниобата лития простирается от ближней ультрафиолетовой до средней инфракрасной области (0.25-3.9 эВ) и величина нелинейно оптического коэффициента ($d_{33} \approx 38$ пм/В) выше, чем у других сегнетоэлектрических кристаллов, что позволяет использовать ниобат лития в качестве функционального материала нелинейной и лазерной оптики. Однако, под действием лазерного излучения с длиной волны ближнего УФ и видимого диапазона происходит модуляция коэффициентов преломления и, как следствие, наведение оптической неоднородности, так называемого фоторефрактивного эффекта, в объеме кристалла ниобата лития. Данный эффект нарушает условие фазового синхронизма, и эффективность нелинейного преобразования излучения сильно уменьшается, что ограничивает практическое применение кристалла ниобата лития в оптических приложениях. Регулировать в широких пределах чувствительность кристалла ниобата лития к оптическому повреждению можно путем легирования и изменения отношения $R=\text{Li}/\text{Nb}$. Фоторефрактивный эффект связан с миграцией свободных носителей заряда из освещенной в неосвещенную область с последующим распределением их по каналам рекомбинации в запрещенной зоне кристалла. Формирование зонной структуры, локализованных уровней энергии в запрещенной зоне кристалла и, как следствие, фоторефрактивных и эмиссионных свойств зависит от особенностей дефектной структуры ниобата лития. При этом диссипация части энергии лазерного излучения, проходящего через монокристаллическую среду, уходит на излучательные и безызлучательные процессы с участием структурных и лазерно-индуцированных дефектов. Исследование релаксации свободных носителей заряда, возбуждаемых УФ излучением, через множественные каналы с участием дефектов кристаллической структуры ниобата лития различного состава является актуальной задачей физического материаловедения. В этой связи важны задачи получения качественных матриц с оптимальными физическими характеристиками на основе ниобата лития. Сравнение механизмов собственной люминесценции монокристаллических и керамических материалов на основе ниобийсодержащих соединений позволяет исследовать вклад в общий люминесцентный сигнал центров свечения различного типа. Последнее является фундаментальной задачей физики твердого тела и конденсированных систем.

Диссертационная работа Смирнова М.В. посвящена экспериментальному исследованию взаимосвязи структурных дефектов и рекомбинационных процессов в монокристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Me}$ (Me – Nb, Zn, Mg) и керамиках ANbO_4 (A – Gd, Y), полученных по разным технологиям. В качестве методов исследования выбраны оптическая абсорбционная спектроскопия и фотолюминесцентный анализ в оптической области спектра. Объекты исследования представляли собой монокристаллы ниобата лития номинально чистого состава: конгруэнтный ($\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$) и стехиометрический ($\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$) кристаллы, и кристалл $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}(6.0 \text{ мас. \% K}_2\text{O})$, выращенные из конгруэнтного расплава с примесью K_2O ; легированные цинком и магнием в широком концентрационном диапазоне кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(0.04\text{-}5.19 \text{ мол. \% ZnO})$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0.19\text{-}5.29 \text{ мол. \% MgO})$. Большая часть легированных кристаллов были получены по технологии прямого легирования, несколько кристаллов по технологии гомогенного легирования и легирования с участием твердофазной лигатуры. Другие образцы в форме прессованных таблеток представляли собой керамики ниобата гадолиния, иттрия и лития (ANbO_4 (A – Gd, Y) и LiNbO_3), и активированная ионами европия ниобат гадолиния ($\text{Gd}_{1-x}\text{NbO}_4:\text{Eu}_x$ ($x=0.01$ 0.20 и 0.40 мол.%)), полученные по разным технологиям. Часть керамик GdNbO_4 была подвержена вакуумному отжигу.

Научная новизна работы заключается в получении информации о зонной структуре кристаллов ниобата лития разного генезиса с помощью взаимодополняющих методов исследования вещества: фотолюминесцентный анализ и оптическая абсорбционная спектроскопия в области собственного поглощения. Наиболее полно исследованы зависимости фотолюминесценции от стехиометрии, типа и концентрации легирующего металла (Zn, Mg), технологии получения в монокристаллах и керамиках $\text{LiNbO}_3:\text{Me}$ (Me – Nb, Zn, Mg) и ANbO_4 (A – Gd, Y). Впервые обнаружены концентрационные пороги легирующих элементов ($\text{ZnO}=2.01$ и $\text{MgO}=3.03$ мол. %), при которых изменяются механизмы излучательной рекомбинации в легированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (0.04-5.19 мол.% ZnO) и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ (0.19-5.29 мол.% MgO). Впервые обнаружен вклад в эмиссионный сигнал люминесценции от поверхностных макродефектов и дефектов кристаллической структуры ниобата лития, сделано сравнение с фотолюминесценцией керамического образца. Предложены механизмы излучательной рекомбинации центров свечения на основе литературных данных и дедуктивных рассуждений о дополнительных центрах свечения, отсутствующих в литературе и связанных со структурными дефектами исследуемых образцов. Впервые проведены исследования температурного тушения центров свечения в оптической области в диапазоне $T=293-363$ К и найдены их значения энергии активации для всех кристаллов ниобата лития.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в создании и корректировке технологий получения монокристаллических и керамических образцов, в лучшем понимании участия структурных дефектов, в частности, полярных и биполярных пар, в излучательных/безызлучательных рекомбинационных процессах, оценке собственной люминесценции монокристаллических и керамических матриц. Важным прикладным направлением является возможность контроля концентрации водорода в протонообменных слоях кристалла по спектрам фотолюминесценции ближнего ИК диапазона. Кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (2.01 мол. % ZnO, прямое легирование) и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ (5.23 мол. % MgO, легирование с использованием твердофазной лигатуры) имеют наиболее дискретные эмиссионные свойства и наименьшую спонтанную фотолюминесценцию в оптической области, что позволяет их предложить в качестве функциональных материалов лазерной техники и фотоники.

Достоверность полученных результатов работы обеспечивается корректностью постановки задач исследований и физического эксперимента, согласованностью полученных результатов между собой и литературными данными других авторов, их неоднократным представлением на научных конференциях различного уровня, публикацией научных статей в ведущих научных журналах, часть из которых имеют высокий квартиль. Экспериментальные результаты работы были получены на аттестованном оборудовании: спектрограф SOL SL-100M с ПЗС-детектором FLI ML 1107 BlackIlluminated (Hamamatsu) и спектрофотометр СФ-56 (ООО «ЛОМО-СПЕКТР»). Для обработки экспериментальных данных использовали соответствующие лицензируемые программы (Vomem Grams V. 2.03, LabSpec 5.5, Origin 8.1).

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка публикаций по теме диссертации, списка цитируемой литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 168 страниц, включая 40 рисунков, 16 таблиц, 8 формул. Список литературы содержит 235 наименований. Краткое описание основных разделов диссертационной работы:

Во введении дана общая характеристика работы: обоснована актуальность и степень разработанности темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлена научная новизна работы, а также её практическая и теоретическая значимость, выделены основные положения на защиту, представлена характеристика образцов, достоверность полученных результатов и апробация работы.

В первой главе представлен литературный обзор по тематике исследования. Рассмотрены различные модели дефектной структуры номинально чистых и легированных кристаллов ниобата лития на основании дифракционных методов исследования вещества. Проведён анализ литературы по исследованию собственной люминесценции ниобата лития разного состава и описаны основные центры рекомбинации. Представлен раздел об особенностях проявления

фоторефрактивного эффекта в кристаллах ниобата лития разного состава. В конце главы сформулированы основные проблемы и выводы.

Вторая глава включает в себя методику выращивания методом Чохральского высокосовершенных монокристаллов ниобата лития разного состава (LiNbO_3 _{стех}, LiNbO_3 _{стех}(6.0 мас. % K_2O), LiNbO_3 _{конг}, $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (0.04-5.19 мол.% ZnO) и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ (0.19-5.29 мол.% MgO)) и генезиса начиная от приготовления гранулированной шихты LiNbO_3 и заканчивая процессом монодоменизации кристаллической булы. Уделено особое внимание оценки качества полученных кристаллов. Описаны основные особенности получения керамических образцов (ANbO_4 (A – Gd, Y), LiNbO_3 и $\text{Gd}_{1-x}\text{NbO}_4:\text{Eu}_x$ ($x=0.01, 0.20$ и 0.40 мол.%)) по традиционной керамической технологии (высокотемпературный отжиг в воздушной атмосфере) и технологии горячего прессования (высокотемпературный отжиг при постоянном давлении). Приведены особенности регистрации спектров отражения и пропускания, фотолюминесценции на соответствующем оборудовании, описаны особенности получения температурно-кинетических зависимостей фотолюминесценции и представлены методы обработки экспериментальных данных.

В третьей главе представлен анализ края собственного поглощения и зонных характеристик (энергия Урбаха, ширины запрещённой зоны прямого и непрямого перехода, энергия фононов) номинально чистых кристаллов ниобата лития с точки зрения влияния состава и технологии получения образцов. Установлено, что наилучшие зонные характеристики показывает кристалл LiNbO_3 _{стех}(6.0 мас. % K_2O), что говорит о его высоком оптическом качестве. Высокие значения энергии Урбаха, энергии фононов, а также «пологое» поглощение вблизи края собственного поглощения кристалла LiNbO_3 _{стех} указывают на высокую дефектность относительно центров, создающих множественные мелкие уровни энергии на границе запрещенной зоны, и оптическую неоднородность. Исследование фотолюминесценции номинально чистых кристаллов дало возможность разделить люминесцентный сигнал от двух областей кристалла: поверхностные макродефекты и центры свечения бесконечно транслируемой кристаллической решетки ниобата лития. Определены основные центры свечения в оптической области спектра данных кристаллов и зависимость их интенсивности люминесценции от состава и технологии получения кристалла. Показано, что поверхностная фотолюминесценция от макродефектов в меньшей степени зависит от состава кристалла, чем эмиссия от центров свечения с «объёма» кристалла. В последнем случае кристалл LiNbO_3 _{конг} показывает максимальную биполярную люминесценцию $\text{Nb}_{\text{Li}}-\text{Nb}_{\text{Nb}}$, кристалл LiNbO_3 _{стех} – минимальную, за счёт разного содержания дефекта Nb_{Li} . Указано, что поляронная люминесценция в ближней ИК области может зависеть от разных типов центров свечения и максимальное значение наблюдается в кристалле LiNbO_3 _{стех}(6.0 мас. % K_2O). Исследовано температурное тушение центров свечения в видимой и ближней ИК области спектра и определены их энергии активации в номинально чистых кристаллах ниобата лития. Показано, что кристалл LiNbO_3 _{конг} имеет наименьшие значения энергии активации полос люминесценции в оптической области относительно кристаллов LiNbO_3 _{стех} и LiNbO_3 _{стех}(6.0 мас. % K_2O).

В разделе, посвященном керамическим твердым растворам, показаны различия в спектрах фотолюминесценции керамик ниобата гадолиния и иттрия, полученных по технологии горячего прессования и традиционной керамической технологии. Последние показывают наименьшее количество центров свечения с участием дефектов структуры. Показано, что вакансии по кислороду выступают в качестве центров тушения собственной люминесценции керамической матрицы ниобата гадолиния. Из сравнения экспериментальных спектров фотолюминесценции монокристаллического и керамического LiNbO_3 конгруэнтного состава установлено, что в последнем наблюдается комплексное свечения от поверхностных и дефектных центров свечения в видимой области. Установлена пороговая концентрация ионов европия ($\text{Eu}=0.2$ мол.%) в матрице ниобата гадолиния, выше которой наблюдается концентрационное тушение фотолюминесценции. В конце главы предоставлены основные выводы.

В четвёртой главе показана зависимость ширины запрещенной зоны, энергии Урбаха и других зонных характеристик от концентрации цинка в кристалле ниобата лития. В кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (1.42-5.19 мол. % ZnO) наблюдается смещение края собственного поглощения в коротковолновую область при высоких концентрациях легирующего металла ($\text{ZnO}=4.50-5.19$ мол.%) и предложено объяснение в рамках модели Бурштейна-Мосса. В кристаллах

$\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(4.50\text{-}5.19 \text{ мол.}\% \text{ ZnO})$ относительно $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ наблюдается увеличение стехиометрического соотношения R за счёт уменьшения дефектов Nb_{Li} .

Изучение спектров фотолюминесценции кристаллов ниобата лития, легированных цинком в широком концентрационном диапазоне, полученных по разным технологиям, проведено с точки зрения влияния концентрации цинка на поверхностную люминесценцию и люминесценцию от центров свечения с участием точечных и комплексных дефектов структуры ниобата лития. Поверхностная фотолюминесценция кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(0.07\text{-}4.74 \text{ мол.}\% \text{ ZnO})$ имеет немонотонный характер изменения: наибольшие изменения в спектре наблюдаются в области малых энергий ($E < 2.5 \text{ эВ}$), которая обусловлена точечными дефектами (Nb_{Li} , V_{Li} и т.д.) структуры ниобата лития. Фотолюминесценция от «объёма» кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(0.04\text{-}5.19 \text{ мол.}\% \text{ ZnO})$ имеет пороговый характер. Ниже концентрации $\text{ZnO} \leq 2.01 \text{ мол.}\%$ происходит постепенное уменьшение люминесценции от биполярнов $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-Nb}_{\text{Nb}}$ (при 2.04 эВ) за счёт изоморфного замещения дефекта Nb_{Li} легирующей примесью. Выше концентрации $\text{ZnO} > 2.01 \text{ мол.}\%$ наблюдается смещение в высокоэнергетическую область благодаря образованию нового канала излучательной рекомбинации при 2.45 эВ в видимой области. Природа данной эмиссии соотнесена с парами $\text{Nb}_{\text{Nb}}\text{-O}$ вблизи дефекта Zn_{Li} . В ближней ИК области в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(4.46\text{-}5.19 \text{ мол.}\% \text{ ZnO})$ интенсивность полос при 1.35 и 1.53 эВ увеличивается за счёт увеличения доли дефектов Zn_{Li} и V_{Li} на основании модели литиевых вакансий. Аналогичные закономерности наблюдаются в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0.19\text{-}5.29 \text{ мол.}\% \text{ MgO})$. Концентрация легирующей примеси, при которой меняется скачком люминесценция в оптической области спектра, равна $\text{MgO} = 3.03 \text{ мол.}\%$. Ниже её наблюдается уменьшение свечения биполярнов $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-Nb}_{\text{Nb}}$, выше неё – образуется центр свечения $\text{Nb}_{\text{Nb}}\text{-O}$ с участием Mg_{Li} в видимой области. В ближней ИК области в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(1.53\text{-}5.29 \text{ мол.}\% \text{ MgO})$ наблюдается сильная корреляция интенсивности полос при 1.35 и 1.53 эВ с концентрацией связанного водорода в кристалле. Проведено исследование зависимости энергии активации температурного тушения центров свечения в оптической области в легированных кристаллах ниобата лития. Все полосы люминесценции подвержены моноэкспоненциальному затуханию с ростом температуры. Установлено, что до и после пороговой концентрации легирующей примеси ($\text{ZnO} = 2.01 \text{ мол.}\%$ и $\text{MgO} = 3.03 \text{ мол.}\%$) электронная структура центров свечения меняется, что приводит к резкому уменьшению энергии активации в ближней ИК области. В конце главы сформулированы основные выводы.

В заключительной части сформулированы основные выводы диссертационного исследования. Наиболее значимые результаты диссертационной работы включают в себя:

1. Показано, что кристалл $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ ($6.0 \text{ масс.}\% \text{ K}_2\text{O}$) характеризуется гораздо лучшей композиционной и оптической однородностью вследствие меньшей концентрации дефектов, выступающих в роли мелких ловушек электронов по сравнению с кристаллами $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ и $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$. Кристаллы $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(1.42 \text{ мол.}\% \text{ ZnO})$, полученный методом прямого легирования, показывают наиболее худшие зонные характеристики в области фундаментального поглощения относительно номинально чистых и серии кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(4.50\div 5.19 \text{ мол.}\% \text{ ZnO})$, полученных как методом прямого легирования расплава, так и методом гомогенного легирования с использованием прекурсора $\text{Nb}_2\text{O}_5:\text{Zn}$. Для кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(4.50\div 5.19 \text{ мол.}\% \text{ ZnO})$ характерна высокая стехиометрия ($R = 0.965 \div 0.967$) вследствие образования дефекта Zn_{Li} . При этом смещение ширины запрещенной зоны в сторону высоких значений энергий объяснено в рамках эффекта Бурштейна-Мосса.

2. Установлено, что в стехиометрических кристаллах $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ и $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ ($6.0 \text{ мас.}\% \text{ K}_2\text{O}$) относительно конгруэнтного кристалла $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ наблюдается больший вклад собственного свечения NbO_6 -групп в поверхностную фотолюминесценцию. В области малых энергий ($E < 2.5 \text{ эВ}$) вклад в интенсивность фотолюминесценции растёт в ряду кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$, $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ и $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ ($6.0 \text{ мас.}\% \text{ K}_2\text{O}$) за счёт увеличения количества собственных дефектов (Nb_{Li} , V_{Li} и др.) на границе «кристалл-окружающая среда». Показано, что в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(0.07\div 4.74 \text{ мол.}\% \text{ ZnO})$ изменение интенсивности свечения при $E < 2.5 \text{ эВ}$ носит немонотонный характер.

3. Интенсивность фотолюминесценции в видимой области с «объёма» кристалла, обусловленная биполярнами $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-Nb}_{\text{Nb}}$ при 2.04 эВ , увеличивается в ряду кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$, $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ ($6.0 \text{ мас.}\% \text{ K}_2\text{O}$) и $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ за счёт увеличения концентрации точечных дефектов Nb_{Li} .

В кристалле LiNbO_3 стех(6.0 мас. % K_2O), в отличие от кристаллов LiNbO_3 конг и LiNbO_3 стех, наблюдается аномальный рост интенсивности свечения в ближней ИК области, что указывает на аддитивный характер механизмов люминесценции в нём от нескольких центров свечения, отличных от центров свечения с участием только дефектов Nb_{Li} .

4. Установлено, что керамики ANbO_4 ($A - \text{Gd}, \text{Y}$), полученные высокотемпературным отжигом в воздушной атмосфере, отличаются меньшей концентрацией дефектов (центров свечения), участвующих в рекомбинационных процессах NbO_4 -групп, относительно керамик, синтезированных по технологии горячего прессования. Вакуумный отжиг керамик GdNbO_4 вне зависимости от технологии их получения приводит к тушению фотолюминесценции посредством образования дефектов V_O . В керамике $\text{Gd}_{0.8}\text{NbO}_4:\text{Eu}_{0.2}$ наблюдается максимальная интенсивность люминесценции в «оранжевой» области спектра за счёт эффективного переноса энергии между NbO_4 -группами и $4f^n-4f^n$ переходами иона Eu^{3+} относительно других составов.

5. Обнаружено, что в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(0.04\div 5.19$ мол. % ZnO) и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0.19\div 5.29$ мол. % MgO) фотолюминесценция в видимой области носит пороговый характер: при концентрации $\text{ZnO} \leq 2.01$ мол. % и $\text{MgO} \leq 3.03$ мол. % происходит уменьшение интенсивности свечения биполярона $\text{Nb}_{\text{Li}}-\text{Nb}_{\text{Nb}}$ при 2.04 эВ за счёт вытеснения атомов Nb из литиевых позиций атомами Zn/Mg; при $\text{ZnO} \geq 4.46$ мол. % и $\text{MgO} \geq 5.23$ мол. % наблюдается максимум свечения при 2.45÷2.49 эВ за счёт образования нового центра свечения $\text{Nb}_{\text{Nb}}\text{O}-\text{Me}_{\text{Li}}$ ($\text{Me} - \text{Zn}, \text{Mg}$).

6. В ближней ИК области в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(0.04-5.19$ мол.% ZnO) изменение интенсивности полос люминесценции при 1.35 и 1.53 эВ обусловлено уменьшением концентрации (при повышении концентрации цинка) центров свечения в виде точечных дефектов Nb_{Li} вследствие образования дефектов Zn_{Li} . Обнаружена корреляция между интенсивностью полосы при 1.53 эВ и концентрацией OH^- групп в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(1.66\div 5.29$ мол.% MgO) вследствие образования «новых» комплексных центров свечения с участием OH^- групп.

7. Температурное тушение полос излучения при 1.35, 1.53 и 2.04 эВ описывается моноэкспоненциальной зависимостью для всех исследованных кристаллов LiNbO_3 . Наименьшие значения энергии активации тушения люминесценции для данных полос имеет кристалл LiNbO_3 конг. В видимой области тушение биполяронов $\text{Nb}_{\text{Li}}-\text{Nb}_{\text{Nb}}$ и комплексных центров свечения $\text{Nb}_{\text{Nb}}\text{O}-\text{Me}$ ($\text{Me} - \text{Zn}, \text{Mg}$) в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(0.04\div 5.19$ мол.% ZnO) в среднем выше, чем в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(1.66\div 5.29$ мол.% MgO). Тушение люминесценции в ближней ИК области обусловлено концентрационным изменением электронной структуры центров свечения и носит пороговый характер. Установлено, что более подвержены термолизу центры свечения для сильно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(4.46\div 5.19$ мол.% ZnO) и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(5.23\div 5.29$ мол.% MgO).

К диссертационной работе есть ряд замечаний:

1. В качестве объектов исследований были выбраны монокристаллические и керамические твердые растворы полученные по разным технологиям с заданными параметрами. Очевидно, что даже незначительное изменение технологии получения или состава образцов приведет к изменению характеристик люминесценции. Чем обусловлен выбор именно этих параметров исследуемых образцов (интерес с фундаментальной точки зрения, практические приложения и т.д.)?

2. При описании результатов экспериментов по люминесценции в главе 4, было бы желательно пояснить параметры приповерхностного слоя исследуемых кристаллов.

3. Использование термина гало при описании спектров (например Рис 4.3) является не очень удачным. Или требуется пояснение, что имеется в виду.

4. Среди заявленных задач была задача «исследовать по спектрам оптического поглощения в области края фундаментального поглощения оптическое качество...», однако, в основных результатах и защищаемых положениях решение этой задачи не раскрыто.

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Апробация результатов диссертационного исследования проведена на конференция различного уровня. Результаты работы опубликованы в 16-ти статьях, 11 из которых реферируются в базах данных Web of Science и Scopus. В высокорейтинговых журналах (Q_1 и Q_2) опубликовано три статьи. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0226-2018-0004, регистрационный номер АААА-А18-

118022190125-2) и при финансовой поддержке РФФИ (грант «Аспиранты» № 20-33-90078, 2020-2022 гг.). Содержание диссертационной работы Смирнова М.В. соответствует паспорту специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Диссертация Смирнова Максима Владимировича «Структурные дефекты и рекомбинационные процессы в монокристаллических и керамических твердых растворах $\text{LiNbO}_3:\text{Me}$ (Me – Nb, Zn, Mg) и ANbO_4 (A – Gd, Y)» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научно-методическом уровне. По актуальности темы, обоснованности научных положений, сформулированным выводам, научной новизне и практической значимости диссертация полностью удовлетворяет всем требованиям положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Смирнов Максим Владимирович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент
высококвалифицированный ведущий научный сотрудник Лаборатории когерентной оптики
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им
П.Н.Лебедева РАН
Чернега Николай Владимирович

Подпись сотрудни
Ученый секретари
Колобов Андрей I

Контактные данни

Тел.: +7(499)132-65-51; e-mail: cherneganv@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им
П.Н.Лебедева РАН

Тел.: +7 (499) 132-65-54; e-mail: office@lebedev.ru