

## ПИСЬМЕННЫЙ ОТЗЫВ

официального рецензента на диссертационную работу Убаева Жигера Картбаевича «Экситоноподобная люминесценция кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI в поле легкого катиона-гомолога и упругой деформации», представленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D060400 – Физика»

№п/п	Критерии	Соответствие критериям (необходимо отметить один из вариантов ответа)	Обоснование позиции официального рецензента
1.	Тема диссертации (на дату ее утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам	1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки или государственным программам: <b>1) <u>Диссертация выполнена в рамках проекта или целевой программы, финансируемого(ой) из государственного бюджета (указать название и номер проекта или программы)</u></b> 2) Диссертация выполнена в рамках другой государственной программы (указать название программы) 3) Диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан (указать направление)	Диссертация выполнена в соответствии с темой научного проекта грантового финансирования МОН РК «Направленное воздействие на излучательную релаксацию электронных возбуждений с целью улучшения люминесцентных характеристик функциональных материалов на базе щелочногалоидных кристаллов» ИРН АР08855672 на 2020-2022 годы по приоритетному направлению развития науки «Научные исследования в области естественных наук» и специализированного научного направления «Фундаментальные и прикладные исследования в области физики и астрономии».

2.	Важность для науки	Работа <b>вносит</b> /не вносит существенный вклад в науку, а ее важность хорошо <b>раскрыта</b> /не раскрыта	Диссертационная работа вносит существенный вклад в науку в области радиационной физики и люминесценции материалов, в том числе, в исследование релаксации электронных возбуждений в щелочногалоидных кристаллах (ЩГК) при понижении симметрии решетки локальной и упругой деформацией, сопровождающееся колоссальным изменением между излучательным каналом и каналом создания первичных радиационных дефектов. Важным для науки представляется эффект разгорания интенсивности люминесценции кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI под действием локальной (Li, Na) и низкотемпературной упругой деформации, которые могут найти широкое применение при разработке сцинтилляционных детекторов на основе ЩГК.
3.	Принцип самостоятельности	Уровень самостоятельности: <b>1) Высокий;</b> 2) Средний; 3) Низкий; 4) Самостоятельности нет	<p>Высокий уровень самостоятельности диссертанта в исследовании фундаментальных вопросов люминесценции ЩГК обосновывается тем, что он самостоятельно модернизировал многофункциональный спектральный комплекс, управляемый компьютерными программами SpectraScan и ThermoScan на основе цифровых технологий.</p> <p>Спектральный комплекс позволяет сканировать спектры рентгенолюминесценции (РЛ), туннельной люминесценции (ТЛ), термостимулированной люминесценции (ТСЛ), временную развертку интегральной ТЛ и интегральной ТСЛ ЩГК при понижении симметрии решетки локальной и упругой деформации.</p> <p>Из диссертационной работы следует, что автор принимал активное участие во всех экспериментах, проводимых в научном центре «Радиационная физика материалов» Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова и в лаборатории «Физики ионных кристаллов» Института физики Тартуского университета Эстонии. Компьютерная обработка экспериментальных результатов проделана лично автором, а их анализ и интерпретации выполнены совместно с консультантами.</p>
4.	Принцип внутреннего единства	4.1 Обоснование актуальности диссертации: <b>1) Обоснована;</b> 2) Частично обоснована; 3) Не обоснована.	В ЩГК надежно установлены основные закономерности релаксации высокоэнергетических электронных возбуждений (ЭВ), созданные под действием ионизирующей радиации, в низкоэнергетическое автолокализованное экситонное состояние, через которое происходит излучательная аннигиляция и создание первичных радиационных дефектов Френкеля – $F$ , $H$ и $\alpha$ , $I$ . Образование пакета фононов при распаде автолокализованного экситона (АЛЭ) до сих пор не исследовано,

так как пока еще отсутствует комплексная методика, позволяющая синхронно контролировать три канала релаксации АЛЭ.

Однако, все эти закономерности релаксации электронных возбуждений служили всего лишь паспортными данными для конкретного кристалла, и не позволяли изменить ход процесса между каналами распада АЛЭ. Например, получение оптических материалов на основе ЦГК, прозрачность которых сохранилась бы в широком интервале спектра или новых сцинтилляторов, помимо существующих, с улучшенными люминесцентными характеристиками.

Таким образом, привлекательность исследования физических процессов в ЦГК обоснована важными техническими применениями в качестве материалов многофункционального назначения. Кристаллы LiF и NaF имеют высокую оптическую прозрачность в широком интервале спектра от вакуумного ультрафиолета до инфракрасной области – (95-1500 нм). Кристалл NaI, имеющий высокий квантовый выход люминесценции и используемый как реперный сцинтиллятор, применяется и в качестве основного узла детектирования в сверхактуальных экспериментах по обнаружению регистрации энергии частиц темной материи. В кристаллах-сцинтилляторах NaI-Tl, KI-Tl, CsI-Tl, перенос энергии возбуждения к центрам свечения происходит благодаря высокой подвижности свободных экситонов и электронно-дырочных пар. Несмотря на длительную историю применения и исследования ЦГК, механизмы формирования сцинтилляционного импульса в этих системах окончательно не выяснены. Исследование внешнего воздействия на механизмы передачи энергии в сцинтилляторах позволит определить реальные пути повышения качества сцинтилляционных детекторов.

Прямым фактором воздействия на эффективность излучательной релаксации электронных возбуждений ЦГК является одноосная деформация, которая, как показывают эксперименты, существенно сокращает длину свободного пробега экситонов до автолокализации и последующей излучательной аннигиляции.

В результате воздействия локальной деформации за счет разности катионов-гомологов и упругой деформации разумно ожидать резкое увеличение вероятности автолокализации электронных возбуждений в регулярных узлах решетки и, как следствие, усиление экситоноподобной люминесценции ЦГК. Локальная деформация решетки реализована активированием ЦГК легкими катионами-гомологами, ионные радиусы которых существенно меньше, чем у основного катиона решетки (например,

		<p>NaCl-Li и KCl-Na).</p> <p>Целенаправленное деформационное воздействие на предраспадные состояния различных ЭВ в ЩГК позволит получить оригинальные экспериментальные результаты по комплексному исследованию взаимосвязи каналов аннигиляции ЭВ, чем обосновывается актуальность диссертационной работы.</p> <p>В целом исследование процессов релаксации АЛЭ ЩГК в поле возмущающих факторов является весьма перспективным и актуальным направлением для создания материалов с заданными люминесцентными и оптическими характеристиками в широком интервале спектра при воздействии на них температуры, деформации и ионизирующей радиации.</p> <p>Таким образом, актуальность темы диссертационной работы в соответствии с современными требованиями науки и техники <b>полностью обоснована.</b></p>	
		<p>4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации:</p> <p><b>1) Отражает;</b></p> <p>2) Частично отражает;</p> <p>3) Не отражает</p>	<p><b>Содержание диссертации отражает тему диссертации</b> «Экситоноподобная люминесценция кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI в поле легкого катиона-гомologa и упругой деформации» и состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников.</p> <p><b>Во введении</b> обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, обозначены – объект, предмет и методы исследования, определены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов с применением современных люминесцентных методов на основе цифровой технологии, личный вклад автора, показывающий высокий уровень самостоятельности диссертанта, связь темы с планами научных работ государственного финансирования МОН РК, отражены апробация и публикации, а также приведены структура и объем диссертации.</p> <p><b>В первом разделе</b> приведен литературный обзор, посвященный исследованию природы собственной люминесценции и радиационного дефектообразования в ЩГК. Описаны современное представление о механизмах предраспадного состояния излучательной аннигиляции анионных ЭВ, классифицированные тремя конфигурациями АЛЭ (симметричной, слабоасимметричной и сильноасимметричной), которые приняты считать собственной люминесценцией ЩГК. Приведены спектральные характеристики (поглощение, излучение, относительные стоксовы сдвиги, поляризации, конфигурации) свободных и АЛЭ, длины свободного пробега экситонов до автолокализации и их температурные зависимости в кристаллах NaCl,</p>

KCl, KI и RbI. Подробно описаны механизмы создания первичных радиационных дефектов Френкеля ( $F$ ,  $H$ - и  $a$ ,  $I$ ) и их температурная зависимость при безызлучательном распаде АЛЭ, преимущественно, в кристаллах NaCl, KCl, KI и RbI.

Наиболее важной частью литературного обзора представляется обсуждение о влиянии одноосной низкотемпературной (83÷100К) деформации на предраспадное излучательное состояния экситоноподобных ЭВ в кристаллах NaCl, KCl, KI и RbI на основании которого сформулирована постановка задач диссертации.

**Во втором разделе** подробно описан многофункциональный спектральный комплекс позволяющий регистрировать спектры РЛ, ТЛ и ТСЛ, а также интегральной развертки ТЛ и ТСЛ кристаллов с помощью светосильного монохроматора МСД-2 и фотоэлектронного умножителя типа Н 8259 фирмы «Hamamatsu», работающие в режиме счета фотонов, управляемые специальными программами SpectraScan и ThermoScan в широком интервале спектра 200÷850 нм и температур 85÷400 К под воздействием одноосной деформации ( $\epsilon=0,1\div2,0\%$ ) в условиях высокого технического вакуума.

*Однако, низкотемпературная точка регистрации спектров варьируется в пределах от 83 К до 100 К. Если учесть, что температура жидкого азота абсолютно фиксирована и соответствует 77 К, то не ясно с чем связан градиент температуры образца.*

По техническим характеристикам аппаратуры получено авторское свидетельство (Ав. свидетельство: №12980 от 03.11.2020) и 2 патента Республики Казахстан (патент на изобретение: №34978 от 02.04.2021, патент на полезную модель: №5978 РК от 09.04.2021).

В диссертации исследованы кристаллы NaCl, KCl, KI и RbI, выращенные в Институте физики Тартуского университета (Эстония). Выбор объектов исследования был обусловлен вариацией в широком интервале длины свободного пробега экситонов до автолокализации в матрице кристаллов.

**В третьем разделе** приведены экспериментальные результаты по воздействию локальной и упругой деформации на излучательные аннигиляции экситоноподобных образований в кристаллах NaCl и NaCl-Li. Локальная деформация была реализована за счет активирования катиона-гомолога (Li) ионный радиус которого меньше, чем основной катион (Na) решетки NaCl-Li, а упругая деформация – путем одноосной деформации при низких температурах (83÷90 К) в специальном криостате при



высоком вакууме. Уникальность методов деформации заключается в том, что граница упругой и пластической деформации определялись экспериментально по линейному участку зависимости интенсивности люминесценции от степени деформации, при которой выполняется закон Гука.

В кристаллах NaCl и NaCl-Li на основе люминесцентной и термоактивационной спектроскопии экспериментально установлено, что усиление интенсивности экситоноподобной люминесценции с максимумом при 3,5 эВ с сильно-асимметричной конфигурации ( $\pi$ -поляризации) происходит за счет локальной деформации легкими катионами-гомологами (Li) и упругой деформацией ( $\epsilon=0,9\div 1,0\%$ ), наведенные при низких температурах (83 $\div$ 85 K).

Таким образом, сильно-асимметричная конфигурация ( $\pi$ -поляризация) АЛЭ очень чувствительна к деформациям решетки по сравнению с симметричной конфигурацией ( $\sigma$ -поляризация) АЛЭ в кристаллах NaCl и NaCl-Li, что является наиболее важным экспериментальным результатом для распространения и на другие 20 щелочногалоидных соединений.

Осуществлены прецизионные эксперименты по регистрации слабых сигналов в спектрах ТСЛ в облученных кристаллах рентгеновской радиацией и получена информация по формированию экситоноподобного образования в результате термостимулированной рекомбинации радиационных дефектов –  $F'$ ,  $V_K$  для NaCl с характерной люминесценцией с максимумами при 5,2 эВ ( $\sigma$ ) и 3,5 эВ ( $\pi$ ) и  $F'$ ,  $H_4(Li)$  для NaCl-Li с характерной люминесценцией с максимумом при 2,7 эВ. Относительно последнего выдвигается идея о том, что в кристаллах NaCl-Li присутствие легкого катиона лития, ионный радиус которого меньше, чем у основного катиона натрия эффективно формируется экситоноподобное образование в поле лития в одном анионном узле решетки в отличие от классической структуры АЛЭ в ЩГК.

**В четвертом разделе** исследованы деформационно-стимулированные люминесцентные свойства кристаллов RbI, KI и KCl. Исторический обсуждаемый спорный вопрос о собственной или примесной природы  $E_x$  – люминесценции с максимумом при 3,1 эВ в кристаллах RbI решен в пользу собственной люминесценции АЛЭ с слабо-асимметричной конфигурацией, что является крайне важным для науки результатом благодаря применению низкотемпературной упругой деформации в качестве внешнего воздействующего фактора на предраспадное состояние электронных возбуждений в ЩГК. Вывод сделан на основании коррелированного

роста интенсивности собственной  $\sigma$ - люминесценции с максимумом при 3,89 эВ и  $E_x$  – люминесценции с максимумом при 3,1 эВ с ростом степени одноосной упругой деформации при прямой регистрации спектров РЛ кристаллов RbI.

Логическим продолжением применения одноосной упругой деформации привело к исследованию спектров РЛ кристаллов KI после длительного хранения, соответствующее эксплуатационным временам сцинтилляционных детекторов на практике. Экспериментально установлено, что одноосная деформация приводит к спектральному разделению полос люминесценции за счет смещения максимумов 3,3 эВ  $\rightarrow$  3,9 эВ и 3,0 эВ  $\rightarrow$  2,85 эВ. Эффект смещения полос люминесценции интерпретирован с изменениями конфигураций экситоноподобных образований от слабого к симметричному (3,3 эВ  $\rightarrow$  3,9 эВ) и от слабого к сильно-асимметричной позиции в решетке KI, что крайне важно для моделирования люминесцентных параметров сцинтилляционных детекторов при эксплуатации.

При комнатной температуре в кристалле KCl-Na обнаружен эффект усиления интенсивности экситоноподобного излучения с максимумами при 2,8 эВ и 3,1 эВ в зависимости от концентрации натрия, в отличие от чистого кристалла KCl, в котором отсутствуют подобные излучения. Излучения с максимумами при 2,8 эВ и 3,1 эВ интерпретированы излучательной релаксацией экситоноподобного образования, формирующихся путем рекомбинации нерелаксированных дырок с электронами в поле одиночных и парных ионов натрия, соответственно.

Эффект многократного возрастания интенсивности излучения при 2,8 эВ и 3,1 эВ в кристалле KCl-Na именно при комнатной температуре при локальной деформации решетки маленьким натрием вполне заслуживает рассмотрения данного кристалла в качестве нового сцинтилляционного детектора.

*В третьем и четвертом разделах диссертации обстоятельно проанализированы спектры термостимулированной люминесценции кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI, которые не всегда удаются из-за недостаточности чувствительности аппаратуры. Однако, для убедительной интерпретации природы рекомбинирующих пар радиационных дефектов желательно провести сравнительные эксперименты при оптической стимуляции  $F'$ - центров, исключив термостимулированные процессы. Например, при оптической стимуляции  $F'$ - центров можно получить серии рекомбинационных люминесценций  $F', V_K; F', V_{K4}; F', V_{K4A}$  и  $F', V_F$  – центров и т.д.*

	<p>4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации:</p> <p><b>1) соответствуют;</b></p> <p>2) частично соответствуют;</p> <p>3) не соответствуют</p>	<p><b>Цели и задачи полностью соответствуют теме диссертации</b> «Экситоноподобная люминесценция кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI в поле легкого катиона-гомолога и упругой деформации».</p> <p><b>Целью диссертации</b> является установление прямого воздействия легкого катиона-гомолога и упругой деформации на предраспадные излучательные состояния экситоноподобных электронных возбуждений в кристаллах NaCl, KCl, KI и RbI.</p> <p>Для достижения цели были поставлены следующие <b>основные задачи</b>:</p> <p>1. Модернизация спектрального комплекса фотоэлектронными умножителями типа H 8259 фирмы «Hamamatsu», работающими в режиме счета фотонов, управляемыми специальными программами на основе цифровой технологии SpectraScan и ThermoScan в интервале спектра 200÷850 нмс задаваемым набором скоростей сканирования (1÷50 нм/с), позволяющими осуществлять регистрацию 5 люминесцентных характеристик ЦГК в условиях низкотемпературной (85÷95К) деформации: спектры РЛ, ТЛ, ТСЛ, а также временную развертку ТЛ и интегральной ТСЛ.</p> <p>2. Комплексное исследование воздействия легкого катиона и одноосной низкотемпературной (82÷85 К) деформации на люминесцентные и термоактивационные характеристики кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI.</p> <p>3. Исследование влияния упругой деформации на конфигурации экситоноподобной люминесценции кристаллов NaCl, KI и RbI.</p> <p>4. Применение упругой деформации для исследования природы собственной люминесценции экситонов кристалла RbI.</p> <p>5. Оптическое создание и рекомбинационное формирование околонатриевых экситоноподобных люминесценции в матрицах KCl.</p>
	<p>4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны:</p> <p><b>1) полностью взаимосвязаны;</b></p> <p>2) взаимосвязь частичная;</p> <p>3) взаимосвязь отсутствует</p>	<p>Все разделы и положения диссертации полностью взаимосвязаны, а также прослеживается последовательно выстроенная структура и логическая взаимосвязь между разделами и экспериментальными данными путем сопоставительных анализов, которые привели к завершённой исследовательской работе.</p> <p>После каждого раздела <b>приведены выводы</b>, которые являются <b>полностью новыми</b> и позволяющие детально рассмотреть корректность поставленных экспериментальных задач и полученных результатов, а также их обработки и интерпретации. Все выводы сделаны (обоснованы) на основании прямых экспериментальных исследований по регистрации люминесцентных характеристик</p>



		<p>4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями:</p> <p>1) <b><u>критический анализ есть;</u></b></p> <p>2) анализ частичный;</p> <p>3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов</p>	<p>кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI при понижении симметрии решетки локальной и упругой деформацией.</p> <p>Проведен подробный анализ экспериментальных и теоретических исследований процессов создания и эволюции ЭВ в ЩГК. Наряду с безызлучательным каналом распада ЭВ с образованием первичных радиационных дефектов (<math>F</math>, <math>H</math> и <math>a</math>, <math>I</math>), особое внимание было уделено излучательному каналу релаксации ЭВ с появлением различных видов люминесценции, что является основой принципа работы новых сцинтилляционных детекторов.</p> <p>Из анализа следует, что АЛЭ в ЩГК соответствует образованию, дырочная компонента которого имеет структуру галоидной квазимолекулы <math>X_2^-</math>, расположенной в двух соседних анионных узлах решетки, и является электронным возбуждением чувствительным к понижению симметрии решетки ЩГК.</p> <p>Именно чувствительность структуры АЛЭ к локальной симметрии решетки лежит в основе диссертационной работы, и является оригинальным подходом к исследованию экситоноподобных образований в условиях воздействия на симметрию их ближайшего кристаллического окружения посредством локальной (Li, Na) и упругой деформации, наведенной при низкой температуре (85 К) в кристаллах NaCl, KCl, KI и RbI.</p> <p>На основе критического анализа, проведенного в литературном обзоре (раздел 1), выбрано направленное деформационное воздействие на предраспадные состояния экситоноподобных образований с целью получения высокого квантового выхода люминесценции исследуемых образцов.</p>
5.	Принцип научной новизны	<p>5.1 Научные результаты и положения являются новыми?</p> <p>1) <b><u>полностью новые;</u></b></p> <p>2) частично новые (новыми являются 25-75%);</p> <p>3) не новые (новыми являются менее 25%)</p>	<p><b>Научная новизна диссертации</b> и приведенные ниже экспериментальные результаты являются <b>полностью новыми</b>, полученные современными экспериментальными методами на основе цифровой технологии с применением уникальных технических решений, понижающих симметрию решетки кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI и имеющие совершенно новые интерпретации:</p> <p>1. Экспериментально установлено прямое воздействие одноосной упругой деформации, приложенное по кристаллографическому направлению <math>\langle 100 \rangle</math> на структуру асимметричной конфигурации автолокализованных экситонов в кристаллах NaCl, которое зарегистрировано по усилению интенсивности (в 7-10 раз) люминесценции АЛЭ с максимумом при 3,5 эВ и полушириной 0,75 эВ при 85 К.</p> <p>2. В кристаллах NaCl-Li при низкотемпературной упругой деформации в спектрах</p>

		<p>термостимулированной люминесценции обнаружена новая полоса излучения с максимумом при 2,7 эВ, которая интерпретируется как люминесценция экситоноподобного возбуждения в поле легкого лития.</p> <p>3. С применением низкотемпературной упругой деформации установлена собственная природа <math>E_x</math>-люминесценции в кристаллах RbI на основании синхронного линейного роста интенсивности <math>E_x</math>-люминесценции (3,1 эВ) и собственной <math>\sigma</math>-люминесценции (3,89 эВ) АЛЭ с увеличением степени упругой деформации (<math>\varepsilon=0,5\div 1,0\%</math>).</p> <p>4. Экспериментально установлено прямое оптическое создание фотонами в ВУФ области спектра, а также рекомбинационное формирование околонатриевых экситоноподобных возбуждений, дающих люминесценцию с максимумом при 2,8 эВ в кристаллах KCl-Na.</p>	
	<p>5.2 Выводы диссертации являются новыми?  <b>1) полностью новые;</b>  2) частично новые (новыми являются 25-75%);  3) не новые (новыми являются менее 25%)</p>		<p>Выводы, вытекающие из прямых экспериментальных результатов, полученные на основе многочисленных взаимоконтролирующих параметров люминесцентной и термоактивационной спектроскопии с применением цифровой технологии являются полностью новыми и возможно их применение для аналогичных материалах.</p> <p>В заключение предлагаются рекомендации по конкретному использованию выводов исследования. Полученные экспериментальные результаты по усилению интенсивности люминесценции кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI под действием низкотемпературной деформации могут быть использованы при разработке сцинтилляционных детекторов на основе щелочногалоидных кристаллов.</p>
		<p>5.3 Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными:  1) полностью новые;  2) <b>частично новые (новыми являются 25-75%);</b>  3) не новые (новыми являются менее 25%)</p>	<p>Технические и технологические подходы для достижения цели диссертации являются частично новыми (75%) и обоснованными, связанные с модернизацией многофункционального спектрального комплекса, работающего в режиме счета фотонов, с помощью компьютерных программ SpectraScan и ThermoScan в широком интервале спектра 200÷850 нм, позволяющий сканировать последовательно до пяти люминесцентных характеристик ЩГК в условиях низкотемпературной (85÷95К) деформации.</p>

6.	Обоснованность основных выводов	<p>Все основные выводы <b>основаны</b>/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам)</p>	<p><b>Все выводы основаны</b> на результате прямых экспериментальных исследований люминесцентной и термоактивационной спектроскопии в широком интервале температур (4,2÷500 К) и спектра (1,5÷7,7 эВ) при понижении симметрии решетки локальной и упругой деформации кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI:</p> <p>1. Модернизирован спектральный комплекс по люминесцентной и термоактивационной спектроскопии, управляемый специальными программами на основе цифровой технологии SpectraScan и ThermoScan в интервале спектра 200-850 нм с задаваемым набором скоростей сканирования (1÷50 нм/с), а также снабженный светосильным монохроматором МСД-2, фотоэлектронными умножителями фирмы «Hamamatsu», работающими в режиме счета фотонов, и специальным криостатом, позволяющим осуществлять низкотемпературную (85 К) деформацию в условиях высокого технического вакуума, что послужило основой для получения оригинальных экспериментальных результатов данного диссертационного исследования.</p> <p>2. По исследованию спектров рентгенолюминесценции и термостимулированной люминесценции кристаллов NaCl (Harshaw), NaCl-Li и NaCl (Галит) под воздействием допирования легкими катионами (Li) и низкотемпературной (85 К) деформации установлено, что прямое воздействие на предраспадное излучательное состояние автолокализованного экситона происходит за счет упругого сжатия решетки, направленного на усиление интенсивности <math>\pi</math>-люминесценции, характерной для асимметричной конфигурации экситоноподобного образования.</p> <p>3. По исследованию спектров термостимулированной люминесценции упругодеформированных (<math>\epsilon=1\%</math>) кристаллов NaCl и NaCl-Li в температурном интервале (100-110 К), связанном с термическим разрушением <math>F'</math>-центров, обнаружены излучения с максимумами при 3,5 эВ и 2,7 эВ, которые интерпретированы как результат рекомбинации возникающих электронов проводимости с автолокализованными дырками (<math>V_K</math>) и <math>H_A(Li)</math>-центрами, соответственно.</p> <p>4. Исследование спектров рентгенолюминесценции кристаллов RbI при 85 К позволило обнаружить синхронный и линейный рост интенсивности <math>E_x</math>-люминесценции (3,1 эВ) и собственной <math>\sigma</math>-люминесценции АЛЭ (3,89 эВ) с увеличением степени упругой деформации (<math>\epsilon=0,5\div 1,0\%</math>). На основании этого <math>E_x</math>-люминесценция интерпретирована как собственная люминесценция АЛЭ со слабо-асимметричной (weak off) конфигурацией, излучательно релаксирующих в регулярных</p>
----	---------------------------------	---	---

			<p>узлах решетки.</p> <p>5. Исследование спектров рентгенолюминесценции кристаллов KI с продолжительным сроком хранения, аналогично эксплуатационным, позволило обнаружить эффект чувствительности к низкотемпературной (85 K) одноосной упругой деформации собственных полос излучения с максимумами при 3,3 эВ (<math>\pi</math>) и 4,1 эВ (<math>\sigma</math>). Под воздействием упругой деформации (<math>\epsilon = 0,2\%</math>) максимум <math>\pi</math>-люминесценции (3,3 эВ) смещается в сторону высоких энергий спектра до 3,9 эВ, а максимум <math>E_x</math>-люминесценции (3,0 эВ) смещается в сторону низких энергий до 2,85 эВ. Эффект разнонаправленного спектрального смещения интерпретируется как воздействие упругой деформации на изменение конфигурации АЛЭ: от слабосимметричной к симметричной (weak <math>\rightarrow</math> on) – 3,3 эВ (<math>\pi</math>) <math>\rightarrow</math> 3,9 эВ; и от слабосимметричной к сильноасимметричной (weak <math>\rightarrow</math> strong) – 3,0 эВ (<math>E_x</math>) <math>\rightarrow</math> 2,85 эВ.</p> <p>6. Для кристалла KCl-Na тремя способами была реализована излучательная релаксация экситоноподобного образования в поле натрия, дающая полосу люминесценции с максимумом при 2,8 эВ: во-первых, путем оптического создания в ВУФ-области спектра с энергией фотонов 7,6 эВ в температурном интервале при 4,2÷200 K, во-вторых, путем дырочно-электронной рекомбинации при рентгеновском облучении в температурном диапазоне при 150-250 K, в-третьих, путем электронно-дырочной рекомбинации при оптической <math>F'</math>-стимуляции кристалла, предварительно облученного рентгеновскими лучами при 85K.</p> <p>7. Эффект усиления интенсивности люминесценции при 2,8 эВ и 3,1 эВ в кристаллах KCl-Na в зависимости от концентрации натрия интерпретирован как результат рекомбинационной сборки экситоноподобных возбуждений в поле натрия за счет роста длины свободного пробега нерелаксированных дырок при повышении температуры до комнатной.</p> <p>После каждого раздела <b>приведены выводы</b>, которые являются <b>полностью новыми</b> и позволяющие детально рассмотреть корректность поставленных экспериментальных задач и полученных результатов, а также их обработки и интерпретации.</p>
7.	Основные положения, выносимые на защиту	Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности:	<p><b>Основные положения диссертации, выносимые на защиту доказаны прямыми экспериментальными данными, полученные методами люминесцентной и термоактивационной спектроскопии в широком интервале температур (4,2÷500 K) и спектра (1,5÷7,7 эВ) при понижении симметрии решетки локальной и упругой</b></p>

	<p>7.1 Доказано ли положение?  <b>1) доказано;</b>  2) скорее доказано;  3) скорее не доказано;  4) не доказано</p>	<p>деформации кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Прямое воздействие одноосной упругой деформации на асимметричную конфигурацию экситоноподобных образований в кристаллах NaCl, которое зарегистрировано по усилению интенсивности в области спектра <math>\pi</math>-люминесценции с максимумом при 3,5 эВ и полушириной 0,75 эВ при 85 К.</li> <li>2. Применение низкотемпературной упругой деформации для установления природы <math>E_x</math>-люминесценции с максимумом при 3,1 эВ в кристаллах RbI по регистрации спектров рентгенолюминесценции в зависимости от степени сжимающего напряжения (<math>\epsilon = 0,5 \div 1,0\%</math>).</li> <li>3. Экспериментальная демонстрация механизма разделения <math>\pi(3,3 \text{ эВ})</math> - и <math>E_x(3,0 \text{ эВ})</math>-люминесценции АЛЭ в длительно хранившихся кристаллах KI по спектрам рентгенолюминесценции в зависимости от степени деформации.</li> <li>4. Оптическое создание фотонами в ВУФ области спектра, а также рекомбинационное формирование околонатриевых возбуждений, дающих экситоноподобную люминесценцию с максимумом при 2,8 эВ в кристаллах KCl-Na.</li> </ol>
	<p>7.2 Является ли тривиальным?  1) да;  <b>2) нет</b></p>	<p>Защищаемые положения диссертации не являются тривиальными, а наоборот, являются результатом нового подхода к исследованию релаксации электронных возбуждений в ЦГК, приводящий к улучшению люминесцентных характеристик сцинтилляционных материалов в целом.</p>
	<p>7.3 Является ли новым?  <b>1) да;</b>  2) нет</p>	<p>Защищаемые положения диссертации являются новыми, и впервые полученными результатами экспериментальных исследований люминесцентных характеристик кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI в условиях понижения симметрии решетки локальной и упругой деформации. Впервые экспериментально продемонстрировано воздействие понижения симметрии решетки на предраспадное состояние экситоноподобных образований на предмет улучшения квантового выхода люминесценции, которое является центральной проблемой при разработке сцинтилляционных детекторов.</p>
	<p>7.4 Уровень для применения:  1) узкий;  <b>2) средний;</b>  3) широкий</p>	<p>Экспериментальный метод локальной и одноосной низкотемпературной деформации примененный для кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI по воздействию на конфигурации АЛЭ можно распространить для всех 20 ЦГК и других материалов, в которых формируются АЛЭ.</p> <p>Впервые применен метод одноосной упругой деформации для кристаллов RbI по разделению природы люминесценции в регулярных узлах решетки или в поле</p>



			<p>примеси.</p> <p>Возможно применение в качестве нового сцинтилляционного детектора кристалла KCl-Na на основании полученного эффекта многократного возрастания интенсивности излучения при комнатной температуре в поле натрия.</p> <p><i>Обнаруженный эффект разгорания интенсивности люминесценции с максимумами при 2,8 эВ и 3,1 эВ в кристалле KCl-Na именно при комнатной температуре выдвигает данный кристалл в качестве нового сцинтилляционного детектора, <b>однако</b> отсутствует сравнительное исследование по интенсивности с существующими сцинтилляторами CsI-Na, CsI-Tl и т.д.</i></p>
		<p>7.5 Доказано ли в статье?</p> <p><b>1) да;</b> 2) нет</p>	<p>Все защищаемые положения диссертации доказаны публикациями в научных изданиях в области физики низких температур, ядерной физики и методов, а также люминесценции материалов.</p> <p>Доказательной базой защищаемых положений диссертации являются более 10 опубликованных работ в научных журналах, входящих в базу данных Web of Science, Scopus и КОКСОН МОН РК, а также патентами на изобретение и полезную модель и авторским свидетельством. Результаты диссертационного исследования широко обсуждены на различных научных конференциях международного уровня:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– 12-ой Международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, 24-27 июнь 2019);</li> <li>– 20th International Conference on Radiation Effects in Insulators (Nur-Astana, August 19-23, 2019);</li> <li>– 13th International Conference Functional Materials &amp; Nanotechnologies (Vilnius, November 23-26, 2020).</li> </ul>
8.	<p>Принцип достоверности. Достоверность источников и предоставляемой информации</p>	<p>8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно описана</p> <p><b>1) да;</b> 2) нет</p>	<p><b>Достоверность</b> полученных в диссертации результатов и обоснованность научных положений подтверждается согласованностью экспериментальных результатов с фундаментальными положениями физики конденсированного состояния, а также применением современных экспериментальных методов регистрации люминесцентных характеристик исследуемых кристаллов на основе цифровой технологии, управляемых специальными программами SpectraScan и ThermoScan (Патент на изобретение № 34978 РК от 02.04.2021, Авторское свидетельство №12980, 03.11.2020) в сочетании с криостатом, позволяющим деформировать кристаллы при низких температурах (Патенты РК №14831 от 30.06.2004, №26141 от 03.08.2012, №28731 от 19.06.2014).</p>

		<p>8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий:</p> <p><b>1) да;</b> 2) нет</p>	<p>Экспериментальные результаты диссертационной работы получены с применением современного многофункционального спектрального комплекса, позволяющий осуществлять сканирования спектры РЛ, ТЛ и ТСЛ, а также интегральной развертки ТЛ и ТСЛ кристаллов с помощью светосильного монохроматора МСД-2 и фотоэлектронного умножителя типа Н 8259 фирмы «Hamamatsu», работающие в режиме счета фотонов, управляемые компьютерными программами SpectraScan и ThermoScan в широком интервале спектра 200÷850 нм и температур 85÷400 К под воздействием одноосной деформации (<math>\varepsilon=0,1\div1,2\%</math>) в условиях высокого технического вакуума.</p> <p>Экспериментальные результаты диссертационной работы получены с применением высокочувствительных методов люминесцентной спектроскопии на основе цифровой технологии регистрации с уникальными возможностями локальной и упругой деформации, приводящие к понижению симметрии решетки кристаллов.</p>
		<p>8.3 Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты доказаны на основе педагогического эксперимента):</p> <p><b>1) да;</b> 2) нет</p>	<p>Выявленные закономерности усиления интенсивности люминесценции кристаллов, сопровождающиеся влиянием локальной (Li, Na) и упругой деформации на асимметричную конфигурацию экситоноподобного образования доказаны прямой регистрацией спектров рентгенолюминесценции кристаллов NaCl-Li, KCl-Na, NaCl, KCl, KI и RbI.</p> <p>Модели экситоноподобного образования в поле локальной и упругой деформации в кристаллах NaCl-Li, KCl-Na, NaCl, KCl, KI и RbI экспериментально продемонстрированы путем прямой оптической генерации и рекомбинации электронно-дырочных пар с применением вакуумно-ультрафиолетового и рентгеновской радиации.</p>
		<p>8.4 Важные утверждения <b>подтверждены</b>/частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу</p>	<p>Важные утверждающие моменты экспериментальных результатов, а также интерпретации обнаруженных явлений, связанные с природой люминесценции и механизмами рекомбинационных процессов радиационных дефектов, стимулированные локальной и упругой деформацией подтверждены соответствующими ссылками на работы, опубликованные в международных научных журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus.</p>

		8.5 Используемые источники литературы <b>достаточно</b> /не достаточно для литературного обзора	Используемые источники литературы достаточны для литературного обзора и анализа полученных экспериментальных результатов и насчитывают 139 наименований, включая собственные публикации автора. Проанализированы классические и современные публикации, обзоры и монографии по релаксации электронных возбуждений в ЦГК. При интерпретации люминесцентных эффектов, связанных с понижением симметрии решетки сопоставлены результаты различных видов деформации: локальной деформации за счет размеров, как катионов, так и анионов-гомологов, гидростатической и одноосной деформации, пластической деформации, а также деформации точечных вакансионных дефектов и т.д.
9.	Принцип практической ценности	9.1 Диссертация имеет теоретическое значение: 1) да; <b>2) нет</b>	Диссертация посвящена фундаментальным явлениям релаксации электронных возбуждений в ЦГК под действием локальной и упругой деформации, а также ионизирующей радиации и температуры, из чего вытекает прикладное направление применения установленных экспериментальных результатов и выводов, частично оформленных в виде патентов и авторского свидетельства.
		9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике: <b>1) да;</b> 2) нет	В ходе исследования фундаментальных физических явлений на основе ЦГК в экспериментальном плане были практически применены способы регистрации спектров и оценки длины свободного пробега экситонов под действием деформации. Разработан высокочувствительный способ регистрации спектров термостимулированной люминесценции щелочногалоидных кристаллов (патент на изобретение № 34978 РК от 02.04.2021). Разработан оригинальный способ воздействия на длину свободного пробега экситонов в щелочногалоидных кристаллах (патент на полезную модель № 5978 РК от 09.04.2021). Получено авторское свидетельство на цифровую технологию сканирования интегральной туннельной люминесценции и термостимулированной люминесценции щелочногалоидных кристаллов (№ 12980 от 03.11.2020).
		9.3 Предложения для практики являются новыми? <b>1) полностью новые;</b> 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%)	Способ разделения природы люминесценции с применением низкотемпературной одноосной деформации является полностью новым и впервые применен для определения природы $E_x$ - люминесценции в кристаллах RbI. Полученные экспериментальные результаты по усилению интенсивности люминесценции кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI под действием низкотемпературной деформации могут быть использованы при разработке сцинтилляционных детекторов на основе щелочногалоидных кристаллов.

10.	Качество написания и оформления	Качество академического письма: <u>1) высокое;</u> 2) среднее; 3) ниже среднего; 4) низкое.	<p>Диссертационная работа написана высоким академическим языком с применением устоявшейся терминологии и определения фундаментальных процессов в области радиационной физики и люминесценции твердых тел, а также оформлена в соответствии с требованиями ИЦГНТЭ РК.</p> <p><i>Однако, некоторые подрисуночные тексты оформлены не совсем корректно. Например, на странице 57 при описании спектров туннельной люминесценции отсутствуют время и температура облучения кристаллов для накопления концентрации туннелирующих пар радиационных дефектов. На странице 80 имеются стилистические ошибки, в частности, тавтология (длинных длин волн).</i></p>
-----	---------------------------------	--	---

#### Заключение о возможности присуждения степени доктора философии (PhD)

В связи с вышеизложенным диссертационная работа Убасва Жигера Картбаевича «Экситоноподобная люминесценция кристаллов NaCl, KCl, KI и RbI в поле легкого катиона-гомолога и упругой деформации» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D060400 – Физика по таким основным признакам, как актуальность решаемой проблемы, новизна полученных результатов, их обоснованность и достоверность, объем исследований и практическая значимость, является законченным научным трудом, имеющим вполне определенное значение для развития физики ионных кристаллов. Диссертация по структуре и содержанию соответствует всем предъявляемым требованиям «Правил присуждения степеней», а ее автор заслуживает присуждения ему степени доктора философии (PhD).

#### Официальный рецензент:

Доктор физико-математических наук, профессор  
Карагандинского университета имени В. А. Букетова

Подпись д. ф. м. н., профессора Т. А. Кокстай

«Завершено»

ВАСТАЙМЫН  
 ФАЛИМ ХАТЫШ  
 А. К. КИТИБАЕВА  
 «     »     20     »



Т. А. Кокстай

Ученый секретарь Карагандинского университета имени В. А. Букетова  
Доктор PhD А. К. Китибасва

Гербовая печать

16 августа 2021 года