

ՀՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ  
ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԿԻՐԱՌ-ԱԿԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ ՎԱԶԱԳԱՆ ՎԻԿՏՈՐԻ

ՍԻՆԹԵԶԻՆՈՆ ՓԼԶԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ԼԱՅՆԱԳՈՏԻ ՕՔՍԻԴԱՅԻՆ  
ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ ԸՆՈՒԱԳԱՅԹԱՀԱՐՄԱՆ-ԽԱՌՆՈՒՐ-  
ԴԱՅԻՆ ԱՐԱՏՆԵՐԻ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ  
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա.04.07 – «Պինդ մարմնի ֆիզիկա»  
մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտորի  
գիտական ասպիրանտի հայրման արեմախոսության

ՍԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2000

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ ФИЗИКИ

АРУТЮНЯН ВАЧАГАН ВИКТОРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАДИАЦИОННО-  
ПРИМЕСНЫХ ДЕФЕКТОВ В ШИРОКОЗОННЫХ ОКСИДНЫХ  
МОНОКРИСТАЛЛАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОТРОННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук по специальности

01.04.07 – «Физика твердого тела»

ЕРЕВАН - 2000

Արենայանության թեման հաստատվել է Երևանի Ֆիզիկայի  
ինստիտուտում

Գիրական խորհրդատու՝  
Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր,  
առաջարար գիտ. աշխատող

Վ.Ա. Գևորգյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր  
Լ.Ա. Զոչարյան (ՖԿՊԻ, ԳԱԱ)  
Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր  
Ա.Օ. Մարկոսյան (ԼՊՀ)  
Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր  
Ռ.Կ. Կարախանյան (ԵՊՀ)

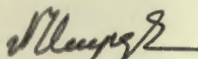
Առաջարար կազմակերպություն՝ Միջուկային հեղուկությունների  
միաբնակ ինստիտուտ, քարտ Լճերգիայի լաբ.  
(ք. Դուրմա, Մոսկվայի մարզ)

Պաշտպանությունը կայանալու է 2000թ. դեկտեմբերի 6 ժամը 14<sup>00</sup>-ին  
ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների ինստիտուտի 021  
մասնագիտացված խորհրդում: Հասցեն՝ 375014, Երևան, Հր.  
Ներսիսյանի փ., 25:

Արենայանությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի  
կիրառական պրոբլեմների ինստիտուտի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2000թ. նոյեմբերի 6

Մասնագիտացված խորհրդի գիրական քարտուղար,  
Ֆիզ.-մաթ. գիտությունների թեկնածու՝

  
Մ. Հ. Սարգսյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском Физическом Институте  
Научный консультант:

доктор физ.-мат. наук

В.А. Геворкян

ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук Л.А. Кочарян  
(ИППФ НАН РА)

доктор физ.-мат. наук, профессор

А.О. Матковски (Львовский политех. у-т)

доктор физ.-мат. наук Р.К. Караханян

(Ереванский гос. университет)

Ведущая организация:

Объединенный ин-т ядерных исследований

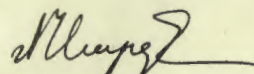
лаб. высоких энергий (г. Дубна, Московская область)

Защита состоится 6 декабря 2000г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании  
специализированного совета (021) при Институте Прикладных Проблем  
Физики НАН РА по адресу: 375014, Ереван, ул. Гр. Нерсисяна, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Прикладных  
Проблем Физики НАН РА.

Автореферат разослан 6 ноября 2000г.

Ученый секретарь специализированного совета,  
кандидат физ.-мат. наук

  
М.А. Саркисян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В течение нескольких десятилетий фундамен-  
тальные исследования в области физики твердого тела тяготели к изучению  
модельных кристаллов с экстремальными свойствами, в частности,  
широкозонных оксидных монокристаллов. С появлением возможности  
использования синхротронного излучения (СИ) был существенно расширен  
спектральный диапазон исследований, а также появились новые  
методические возможности для ВУФ спектроскопии, связанные, в частности,  
с использованием импульсной временной структуры СИ.

В последние годы запросы современной техники сделали особенно  
актуальными исследования твердых тел со сложной элементарной ячейкой, в  
частности, оксидов алюминия  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  и иттрий-алюминиевого граната  
 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (ИАГ), как кристаллические оптические материалы, матрицы  
активных элементов, вообще материалов, выдерживающих большие внешние  
воздействия. Кристаллы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (корунд) применяются в качестве  
потенциального материала первой стенки термоядерных реакторов и  
контейнеров для содержания водорода благодаря его высокой радиационной  
стойкости и отработанности технологии выращивания крупногабаритных  
монокристаллов.

Кроме того, интерес к изучению широкозонных кристаллов связан с их  
широким использованием в сцинтилляционных детекторах, работающих в ус-  
ловиях больших нагрузок, например, в электромагнитных калориметрах в экс-  
периментах по физике высоких энергий на современных суперколлайдерах.

Многочисленные исследования показали, что радиация “отрицательно”  
влияет на параметры материалов и устройств на их основе. Однако, при  
определенных условиях получено “положительное” воздействие на  
материалы, что позволяет использовать ионизирующее излучение для создания  
ряда активных сред в оптоэлектронных системах лазерных элементов.  
Поэтому, в настоящее время проводится интенсивное исследование не только  
стойкости материалов к воздействию ионизирующих излучений, но и  
изучения физических процессов протекающих в них с целью выяснения  
механизмов образования и распада дефектов в кристаллах. Несмотря на  
накопленные литературные данные как теоретического, так и эксперимен-  
тального характера по изменению оптических свойств, процессы формиру-  
ющие спектральные свойства, квантовый выход и кинетику люминесценции,  
оставались малоизученными. В частности, не была понята природа ВУФ  
люминесценции и рентгенолюминесценции при высокоэнергетическом  
возбуждении.

Хотя в исследовании оптических характеристик корунда и ИАГ были  
достигнуты определенные успехи, многие вопросы, особенно в коротковол-  
новой области ( $h\nu > 6\text{эВ}$ ) оставались неизученными. В частности, не были  
выяснены механизмы дефектообразования в области, прилегающей к

коротковолновой границе прозрачности кристаллов, очень мало данных было получено об эффективности возбуждения центров свечения за красом фундаментального поглощения, не была понята природа компонент люминесценции возникающих под действием кванта света, а также влияние облучения высокоэнергетических частиц на поверхностные свойства и кинетику образования радиационных центров окраски.

Приведенные выше аргументы диктуют необходимость комплексного и целенаправленного изучения оптических свойств радиационно-примесных дефектов в широкозонных оксидных монокристаллах с использованием СИ, как незаменимого инструмента для исследований твердых тел.

Целью настоящей работы являлось провести систематические исследования радиационно-примесных дефектов широкозонных монокристаллов с использованием техники высоко разрешенной спектроскопии при возбуждении СИ. В частности, были поставлены следующие задачи:

1. Всесторонне исследовать энергетическую структуру полос оптического поглощения и отражения в кристаллах корунда, облученных высокоэнергетическими частицами в широкой области спектра (от УФ, ВУФ до рентгеновской).
2. Исследовать особенности процессов размножения электронных возбуждений в широкозонных кристаллах корунда и граната.
3. Изучить рентгенолюминесценцию и процессы передачи энергии в кристаллах граната с редкоземельными ионами.
4. Выяснить природу разрешенных по времени анионных центров в кристаллах корунда, обладающими быстрой УФ и ВУФ люминесценцией.
5. Исследовать подпороговое дефектообразование в кристаллах корунда с использованием синхротронного излучения.
6. Определить фундаментальные оптические функции в "чистых" и облученных монокристаллах корунда.

Научная новизна. Научная новизна работы в том, что впервые в широкой области спектра (от УФ, ВУФ до рентгеновской) были систематически изучены спектральные свойства (поглощение, отражение, возбуждение люминесценции, рентгенолюминесценция и др.) широкозонных диэлектриков при импульсном возбуждении синхротронным излучением. Установлены закономерности высокоэнергетического возбуждения люминесценции в области фундаментального поглощения для оксидных монокристаллов. Всесторонне изучено увеличение отражения в облученных кристаллах корунда, что очень важно с прикладной точки зрения.

Практическая значимость. Начатые автором работы по исследованию оптических характеристик в широкозонных оксидных кристаллах по существу стимулировали развитие нового направления в области радиационной физики твердого тела связанного с применением синхротронного излучения.

Новые методики исследования люминесценции кристаллов с использованием синхротронного излучения позволили провести изучение возбуждения

люминесценции и рентгенолюминесценции с целью получения информации об электронной структуре, а также о механизмах размножения электронного возбуждения (РЭВ), что важно для практического применения в сцинтилляционных детекторах, в частности экспериментах по физике высоких энергий (в электромагнитной калориметрии), а также в качестве оптических материалов для коротковолновой области спектра. Важным результатом с точки зрения поиска новых радиационно-стойких материалов является разработка новых методов исследований механизмов образования дефектов в твердых телах с использованием синхротронного излучения. Кроме того, при облучении корунда электронами с энергией 8МэВ методом радиационной стимуляции и сопровождающих его термостимулированных процессов, возможно очистить от неконтролируемых примесей ионов группы железа и достичь значительной прозрачности.

Использование облученных кристаллов корунда, как защитного экрана солнечного элемента позволяет увеличить интенсивности излучения широкополосных твердотельных детекторов.

Основными защищаемыми положениями являются:

1. Исследование оптических свойств анионных  $F^+$  - центров, наводимых высокоэнергетическими частицами на основе измерения спектров поглощения в области фундаментального поглощения.
2. Изучение влияния облучения на энергетическую структуру монокристаллов корунда и эффект "зеркального" отражения от ВУФ до рентгеновской области спектра. Кинетика изменения радиационных дефектов на поверхности облученных кристаллов корунда.
3. Установление закономерностей высокоэнергетического возбуждения люминесценции в оксидных кристаллах в широкой области фундаментального поглощения.
4. Подпороговое дефектообразование при облучении синхротронным излучением. Выяснение механизмов образования радиационных дефектов.
5. Разрешенные по времени спектральные свойства компонент центров свечения кристаллов корунда, обладающих быстрой УФ и ВУФ люминесценцией.
6. Изучение влияния редкоземельных ионов на рентгенолюминесценцию граната.
7. Определение комплекса фундаментальных оптических функций кристаллов в ВУФ области.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзной конференции по физике вакуумного ультрафиолета и его взаимодействие с веществом (Москва, 1982); на Всесоюзном совещании по использованию синхротронного излучения СИ-82 (Новосибирск, 1982); на Всесоюзном семинаре по радиационной физике твердого тела (Ереван, 1985); на Международной

конференции по физике поверхности (Бехуне, ЧССР, 1985); на VII Всесоюзной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов, (Рига, 1989); на Международных конференциях СИ-86, СИ-88, СИ-90, (Новосибирск, 1986, 1988, Москва, 1990); на III Международной конференции по изучению влияния на свойства материалов энергетических импульсов и пучков заряженных частиц (Дрезден, ГДР, 1989); на VIII-ой Всесоюзной конференции "Физика вакуумного ультрафиолета и его взаимодействие с веществом", (Иркутск, 1989); на V-ой Еврофизической конференции по дефектам в диэлектрических материалах (Леон, Франция, 1994); на I-ой Европейской конференции по использованию СИ-94 для исследования материалов (Честер, Великобритания, 1994); на IX-ой Международной конференции по радиационным процессам (Стамбул, Турция, 1994); на XIII-XV-ой Международной конференции по применению ускорителей в науке и технике (Техас, США, 1994, 1996, 1998); на Международной конференции по люминесценции (Москва, 1994); на Международной конференции по ВУФ и радиационной физике (Токио, Япония, 1995); на Международной конференции по люминесценции и оптической спектроскопии конденсирования вещества (Прага, Чехия, 1996); на 5-ой Европейской конференции по применению ускорителей в науке и технологии (Дельфт, Нидерланды, 1997); на 13-ой Международной конференции по анализу ионных пучков (Лиссабон, Португалия, 1997); на Международном симпозиуме по радиационной технологии. (Закопане, Польша, 1997); на I-ой Национальной конференции по полупроводниковой микроэлектронике (Дилижан, Армения, 1997); на Международной конференции по лазерной физике (Аштарак, Армения, 1997, 1998); на Национальной конференции по исследованию материалов (Москва, 1999); на Международной конференции по органическим скинтилляторам (Москва, 1999).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Приложения и Заключения и содержит 225 страниц, включая 80 рисунков и список литературы из 206 наименований.

**Личный вклад автора.** Диссертационная работа является результатом научной работы автора в Лаборатории радиационной физики твердого тела Ереванского Физического института в течение 20 лет. Автор принимал непосредственное участие в разработке и создании экспериментальных установок и методик измерений на канале СИ электронно кольцевого ускорителя "АРУС". Большая часть экспериментальных результатов представленных в работе, получено лично автором. Основные выводы диссертации, выносимые на защиту, получены при его определяющем личном участии.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована ее научная новизна, практическая значимость, цели и задачи исследований. Приведен краткий обзор результатов по изучению оптических свойств широкозонных оксидных монокристаллов. Интерес к данной проблеме и ее актуальность определяются применением широкозонных материалов в современных технологиях. В конце сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**Глава I** изложена на основе результатов работ [1-4]. В ней дан краткий обзор особенностей электронной структуры широкозонных оксидных монокристаллов, спектроскопических методов исследования, методике обработки результатов измерений, расчета и построения фундаментальных оптических функций.

Исследовались номинально "чистые" (нелегированные) монокристаллы корунда -  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , выращенные методом горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК), видоизменением методов Кирополоса (ГОИ), Вернейля, Чохральского и монокристаллы иттрий-алюминиевого граната -  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , беспримесные и легированные  $\text{Nd}^{3+}$ , выращенные методом Чохральского.

Поверхности граней всех образцов были тщательно обработаны и имели довольно хорошую зеркальную поверхность. Образцы корунда облучали электронами с энергией 50 МэВ, реакторными нейтронами с энергией 2 МэВ, тяжелыми ионами свинца с энергией 3,5 МэВ/а.е.м. и "белым" пучком СИ.

Показано, что уникальные свойства синхротронного излучения, существенно расширяют возможности спектрально-кинетических методов исследования твердых тел. Подробно описан канал СИ ускорителя "АРУС".

Установка для ВУФ спектроскопии ускорителя "АРУС" представляет собой оптический канал СИ с установлением в нем видоизмененным монохроматором нормального падения (угол падения около  $10^\circ$ ) ВМР - 2, позволяющая измерять спектры поглощения и отражения в спектральном диапазоне 4,5 - 10 эВ. Описаны также установки для исследования спектров отражения, спектров возбуждения люминесценции твердых тел, функционирующие на российских и зарубежных источниках СИ, на которых проводились измерения в различных областях спектра и температур, в том числе с временным разрешением в диапазоне  $\tau = 1 - 200$  нс.

Излагаются методы обработки результатов измерений спектров поглощения, спектров отражения, спектров возбуждения люминесценции и спектров свечения.

Рассмотрена методика расчета фундаментальных оптических функций из экспериментальных величин коэффициента отражения с использованием дисперсионного соотношения Крамерса-Кронига. Предложен более корректный метод построения диаграмм Арганда, в котором учитывается вклад только одного осциллятора.

Глава II написана на основе результатов работ [5-14]. В ней исследуются монокристаллы корунда, облученные высокоэнергетическими частицами и СИ-фотонами в ВУФ и видимой области.

Особый интерес представляет изучение оптических свойств корунда в УФ и ВУФ областях спектра с целью исследования возможности создания лазеров, генерирующих в этих диапазонах спектра. Этим объясняется заметный рост экспериментальных и теоретических работ по детальному изучению его электронной структуры.

Корунд в  $\alpha$ -фазе в виде искусственно выращенных монокристаллов являются прозрачным в ВУФ области спектра и сохраняет это свойство при облучении высокоэнергетическими частицами. Было обнаружено, что облучение быстрыми электронами с энергией 50 эВ приводит к увеличению коэффициента поглощения во всем спектре (рис.1).

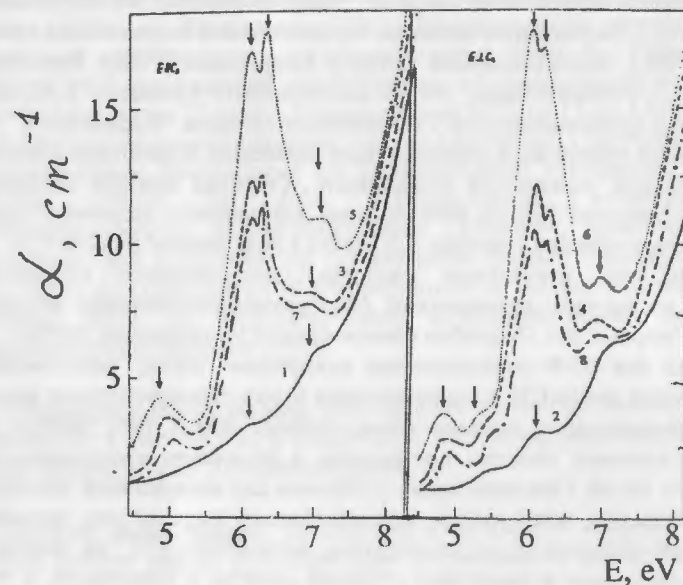


Рис.1. Спектры оптического поглощения корунда - ГНК: 1-2 - необлученный кристалл; 3-4 - облученный электронами с энергией 50МэВ, доза  $1.7 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>; 5-6 - доза  $6 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>; 7-8 - доза  $5.6 \cdot 10^{16}$  эл/см<sup>2</sup>.

Наибольшее возрастание поглощения наблюдается в коротковолновой УФ и ВУФ областях спектра. В спектре поглощения явно выделяются коротковолновые полосы в области 6,1эВ - F- центр (F- центр - анионная

вакансия с двумя локализованными электронами), 5,4эВ; 4,86эВ - F' - центры (F' - центр - анионная вакансия локализованная одним электроном).

F<sup>+</sup> - центры, образованные в результате облучения высокоэнергетическими частицами, имеют C<sub>2</sub> симметрию, вследствие чего возбужденное состояние, согласно теоретическим исследованиям, расщепляется на три уровня: 1В, 2А, 2В, обуславливая три оптически поляризованные полосы поглощения. После облучения быстрыми электронами, нейтронами и ионами в спектре оптического поглощения (ОП) появляются новые полосы 6,3эВ и 7эВ. Полоса поглощения 6,3 эВ сильно зависит от направления поляризации электрического вектора E СИ к оптической оси C<sub>3</sub>. При этом для полосы 6,1эВ  $A(\Delta\alpha_{\parallel}/\Delta\alpha_{\perp}) < 1$ , а для 6,3 эВ  $A > 1$ .

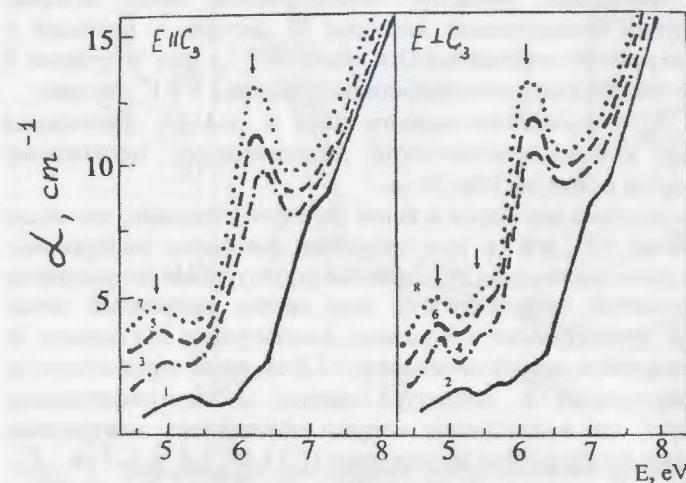


Рис.2. Спектры оптического поглощения корунда - Вернейля: 1-2 - необлученный кристалл; 3-4 - облученный дозой  $10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>; 5-6 - облученный  $2 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>; 7-8 -  $3 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>.

Возникновение приведенных выше полос поглощения объясняется тем, что при облучении упругие взаимодействия, например электронов, с узелными ионами приводят к их смещению и образованию анионных и катионных вакансий. Кроме того, происходят неупругие взаимодействия, которые изменяют зарядовое состояние дорациационных дефектов  $F^2 + e \rightarrow F^+$ ;  $F^2 + 2e \rightarrow F$ , что и приводит к образованию F<sup>+</sup> и F- центров, а также других центров окраски (ЦО).

Исследование спектров ОП Вернейловских кристаллов облученных электронами с энергией 50 МэВ, показало, что полосы поглощения 6,1 и 6,3эВ не разрешаются, как например, для кристаллов ГНК (рис.2).

Это есть результат большой концентрации неконтролируемых примесей и структурных дефектов, чьи энергии очень близко расположены и не позволяют проявлению тонких полос поглощения ЦО из-за образования полосы 6,05 эв ( $\text{Cr}^{4+}$ ).

Сильная интенсивность поглощения, а также спектральный анализ показали, что в кристаллах Вернейля содержание примеси хрома составляет  $\sim 10^{-3}$  мас. %. Тот факт, что при облучении в Вернейловских кристаллах образуются ЦО типа  $\text{Cr}^{2+}$  и  $\text{Cr}^{4+}$ , подтверждается световым отжигом. Однако это различие необъяснимо существенного различия в интенсивностях наведенного поглощения Вернейловского и ГНК кристаллов. При одной и той же дозе электронного облучения Вернейловские кристаллы окрашиваются в два раза интенсивней, чем образцы ГНК. Это связано наличием в Вернейловских кристаллах дефектов определенного типа, которые удерживают выбитый междоузельный кислород  $\text{O}_i$ , которая и приводит к уменьшению числа рекомбинированных  $\text{O}_i$  и вакансий  $\text{F}^{2+}$  в ходе облучения, а следовательно и к увеличению интенсивности поглощения в  $\text{F}$  и  $\text{F}^+$  центрах.

По теории  $X_\alpha$  - самосогласованного поля в  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , наибольшая величина кванта, которая соответствует определенному оптическому переходу, оценивается в области  $7 \leq h\nu \leq 8$  эв.

Изучение воздействия нейтронов и ионов на корунд показало, что после облучения в спектре ОП, как и при облучении быстрыми электронами, обнаруженные полосы поглощения обусловлены структурными нарушениями в анионной подрешетке, подтверждением чего явился изохронный отжиг образцов. Так как при облучении нейтронами, концентрация ЦО больше, то это позволило обнаружить полосу поглощения  $\sim 7,9$  эв, после термоотжига до  $700^\circ\text{C}$ . Из существующих в литературе данных и экспериментальных результатов следует, что в кристаллах корунда облученного электронами, нейтронами, ионами индуцируются аналогичные ЦО 4,86; 5,4; 6,3; 7 эв -  $\text{F}^+$  - центры, а 6,1 эв -  $\text{F}$  - центр. Полоса поглощения 7,9 эв по характеру поведения совпадает с поведением полос  $\text{F}^+$  - центра, что следовало из процессов фотостимулированных взаимопревращений. Уменьшение интенсивности полос  $\text{F}^+$  - центра (рис. 3) происходит из-за того, что при облучении жесткими СИ фотонами ( $\sim 12$  кэВ) в корунде возникают свободные электроны и дырки. Часть электронов и дырок захватываются одиночными и агрегатными ЦО, полосы которых лежат в близкой УФ, видимой областях спектра, а остальная часть -  $\text{F}$  и  $\text{F}^+$  - центрами.

При нейтронном и ионном облучении имеет место также образование кластера. Для моделирования этого радиационного процесса подбирался кластер в виде  $\text{Al}^{3+}[\text{O}^2]_6$ , что удобно для объяснения механизмов накопления и анизотропии ЦО в корунде. Исходя из этой модели подробно объяснена причина того, что при нейтронном облучении скорость образования дефектов больше чем при электронном облучении. В случае нейтронного облучения с энергией 2 МэВ, вследствие каскада упругих соударений

концентрация выбитых атомов больше, чем при электронном облучении, и будет еще больше, если учесть потери основной части энергии электронов при неупругом рассеянии вследствие кулоновского взаимодействия; поэтому и концентрации соответствующих ЦО не идентична.

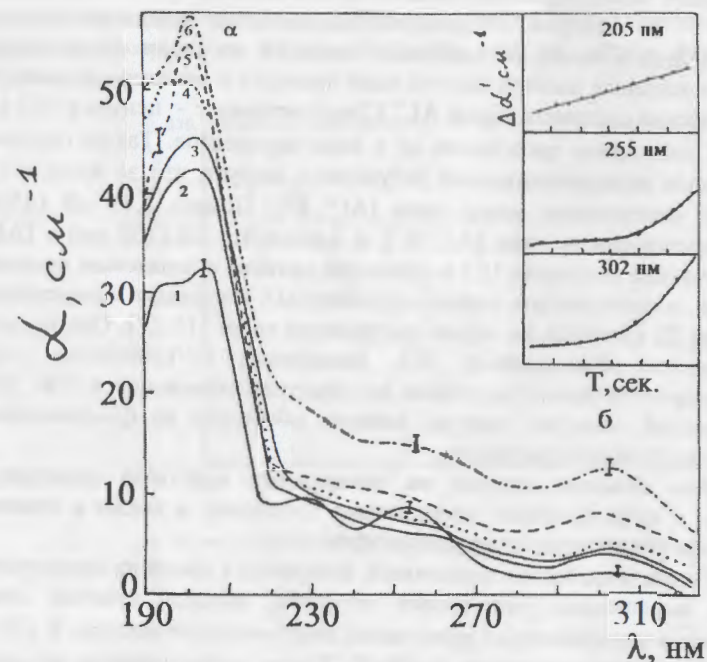


Рис. 3. Зависимость наведенного поглощения от времени СИ облучения корунда - ГНК облученного нейтронами дозой  $10^{17}$   $\text{см}^{-2}$ : а - 1-отожженный  $700^\circ\text{C}$ , 2-облученный СИ фотонами-90 сек., 4-300 сек., 5-450 сек., 6-600 сек.; б - увеличение интенсивности максимумов полос поглощения - 205 нм, 255 нм, 302 нм.

Бомбардирующие электроны до упругого соударения с атомами кластера значительную часть энергии теряют на ионизацию, вследствие чего число образованных вакансий, междоузельных ионов кислорода  $\text{O}_i$  и алюминия  $\text{Al}_i$  при электронном облучении значительно меньше, чем при нейтронном или ионном облучении.

Концентрация анионных центров при облучении 50 МэВ-ными и электронами и 2 МэВ-ными нейтронами при дозе облучения  $10^{17}$  частиц/ $\text{см}^2$  составляет  $1,4 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-3}$  -  $\text{F}$ ,  $10^{16}$   $\text{см}^{-3}$  -  $\text{F}^+$  - центров и  $5 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-3}$  -  $\text{F}$ ,  $3 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-3}$  -  $\text{F}^+$  - центров.

Были исследованы процессы фотовозбуждения после многократного СИ-облучения, в частности, было показано, что одновременно с увеличением интенсивности F и F<sup>+</sup>-центров, наблюдается и увеличение интенсивности полосы поглощения 4,1 эВ (302 нм) (рис. 3). Полосу 4,1 эВ в литературе приписывают междоузельным ионам Al<sub>i</sub> локализованных вблизи анионных вакансий - F-центров. Результаты исследований показали, что ионы алюминия локализованы от анионных вакансий на таком расстоянии, что влияние локального электрического поля приводит к некоторому изменению энергетических состояний ионов Al<sub>i</sub><sup>+</sup>. Существования F-центра и ЦО 4,1 эВ до 700°C дает право представить ее в виде комплексов. Таким образом, из приведенных экспериментальных результатов следует, что за полосу 3,5 эВ (358 нм), ответственен центр типа [Al<sub>i</sub><sup>0</sup> F<sup>+</sup>]. Полоса 2,75 эВ (450 нм) приписывается центру типа [Al<sub>i</sub><sup>+</sup> F<sup>+</sup>], а полоса 4,1 эВ (302 нм) - [Al<sub>i</sub><sup>+</sup> F]. Энергетические состояния ЦО в основном связаны с зарядовым состоянием алюминия, и могут входить только в комплексы с анионными вакансиями.

Глава III изложена на основе результатов работ [15-27]. Она посвящена исследованию радиационных ЦО, наведенных в кристаллах корунда высокоэнергетическими частицами по спектрам отражения в УФ, ВУФ и рентгеновской областях спектра; влияния облучения на фундаментальные оптические функции кристаллов.

Обрыв атомных цепочек на поверхности кристалла приводит, как известно, к формированию электронных состояний, а также к изменению периодичности решетки и зарядовым эффектам.

Изучение воздействия электронов, нейтронов и ионов на монокристаллы корунда выращенных различными методами, выявило отличие спектров отражения в зависимости от ориентации электрического вектора E СИ к оси C<sub>3</sub> в спектральном диапазоне 5-30 эВ. Такая анизотропность обусловлена спецификой энергетического состояния поверхности окружения, следовательно, и симметрией анионных вакансий F и F<sup>+</sup>-центров, локальная симметрия которых искажена по сравнению с объемной. Отсюда следует, что те полосы которые наблюдаются в спектрах поглощения в кристаллах корунда, могут не воспроизвестись в спектрах отражения. Так как поверхность и объем оказывают взаимное действие на формирования радиационных повреждений в оксидах, то основными последствиями воздействия на поверхность корунда являются нарушения стехиометрии в кислородной подрешетке.

Уровень радиационных нарушений зависит от вида излучения и это сказывается на положении полос ЦО.

Затянутость в длинноволновую сторону в спектрах отражения, в особенности облученных кристаллах, подтверждает правильность выбора параметра крутизны ( $\tau_0 < 1$ ) в правиле Урбаха для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В случае  $\tau_0 < 1$  в кристалле корунда имеет сильное экситон-фононное взаимодействие и автолокализация экситонов.

Максимумы в спектрах отражения вызваны разрешенными переходами в высокосимметричных точках зоны Бриллюэна, обусловленными 2p-орбиталями анионов кислорода O<sup>2-</sup> и 3s-состояниями алюминия.

Было наблюено, что после облучения, начиная с энергии  $h\nu > 25$  эВ увеличивается отражательная способность кристаллов. Результаты исследований отражательной способности в области 70-550 эВ показали, что коэффициент отражения облученных образцов на много выше, чем необлученных. (рис. 4)

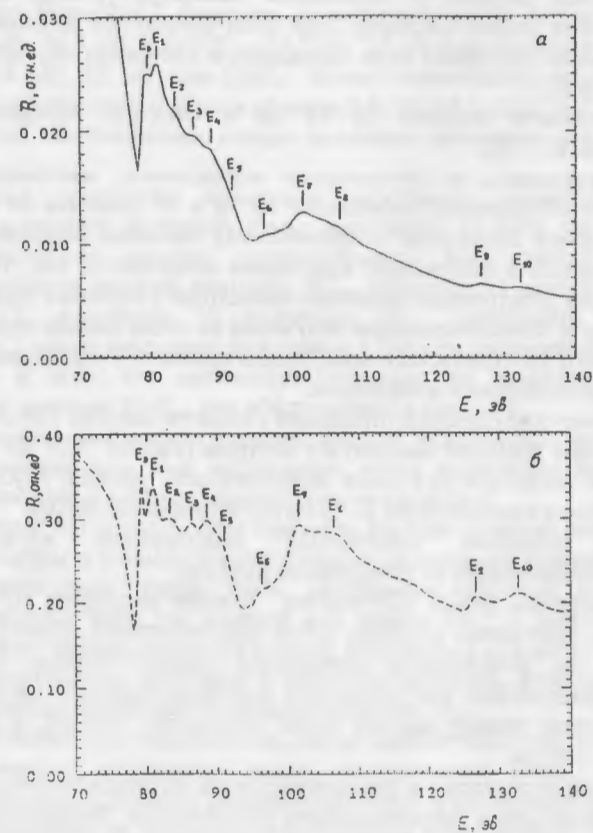


Рис. 4. Рентгеновские спектры отражения корунда: а) необлученный кристалл; б) облученный электронами 50 МэВ с дозой  $6 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>.

Это свидетельствует об "улучшении" поверхности кристалла после радиационного воздействия т.е. происходит сильное стехиометрическое нарушение по направлению к поверхности образца, из-за разупорядочения

кристаллической структуры приповерхностного слоя увеличивается концентрация вакансий и междоузельных ионов, что приводит к радиационно-стимулированной десорбции (РСД), в результате которого образуется восстановленная фаза Al.

Алюминий, возникший в результате "разрушения" поверхности, заполняет дислокационные петли, поры, микротрещины и тем самым создает "зеркальную" поверхность, благодаря чему наблюдается увеличение коэффициента отражения в широкой области спектра. Во-вторых, смещения максимумов связаны с ионизацией основных уровней катионов т.е. с поверхности уходит кислород. При этом катион-ион алюминия находится в нейтральном состоянии из-за заряженного состояния окружения (компенсация зарядов).

В области энергий 70-140 эВ в спектрах отражения появляется структура  $E_1 - E_{10}$ .

Основываясь на литературных вычислениях, максимумы  $E_1 - E_{10}$  в основном обусловлены переходами на 3d и 4f орбитали Al соответственно. Наблюдаемое совпадение энергетических значений максимумов отражения необлученных и облученных кристаллов объясняется тем, что разрешенные по энергии электронные переходы происходят с глубоких уровней. Агрегация дефектов и металлизация при облучении не столь сильно изменяют величину локального электрического поля, чтобы привести к структурным нарушениям после радиационного воздействия.

Измерение спектров отражения в области энергий 538-548 эВ позволили обнаружить широкий максимум с центром тяжести ~540 эВ, что находится в хорошем согласии со схемой энергетических уровней  $Al_2O_3$  приведенной в литературе и соответствует К- краю поглощения кислорода.

С помощью электронной микроскопии изучены процессы дефектообразования на поверхности корунда.

Оказалось, что в облученных ионами кислорода ( $O^{++}$ ), с энергией 200кэВ, кристаллах корунда, после многократного отжига в вакууме при 900°C, на поверхности появляются мелкие черные пятна, которые идентифицированы как комплексы точечных дефектов внедренного типа. - Al. Средний размер мелких пятен составляет ~15 нм, а дислокационных петель ~100 нм.

Были определены и проанализированы оптические константы и функции с использованием дисперсионного соотношения Крамерса-Кронига. Далее по известным формулам рассчитываются значения оптических констант  $n$  и  $k$ ,  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  монокристаллов корунда. Расчеты оптических функций - характеристические потери  $(-I_m(\epsilon)^{-1}, -I_m(\epsilon+1)^{-1})$ , объемные и поверхностные потери, подтвердили наблюдаемые проявления особенностей приповерхностной электронной структуры, позволяя тем самым правильно передавать основные тенденции в изменении атомарной структуры в процессе деструкции облученной поверхности кристаллов корунда. Величина  $I_m(\epsilon)^{-1}$

пропорциональна вероятности потери энергии "квазисвободного" электронного газа в  $Al_2O_3$ , что характеризует максимальное колебание энергии плазмона. Спектры для всех кристаллов имеют общую специфику: экстремумы находятся при 10-15 эВ и 22-25 эВ. Максимальная энергия объемного плазмона для кристалла ГНК равны соответственно  $I_m(\epsilon)^{-1} - 24,5$  эВ; 25 эВ, а максимумы поверхностного плазмона  $-I_m(\epsilon+1)^{-1} - 23,5$  эВ; 24 эВ,  $E \perp C_3$ . При  $E \parallel C_3$  в случае  $-I_m(\epsilon)^{-1}$  имеем максимумы при 23,5 эВ; 25 эВ, а для  $-I_m(\epsilon+1)^{-1} - 23$  эВ; 23,5 эВ.

В кристаллах Вернейля в функциях характеристических потерь имеем для  $I_m(\epsilon)^{-1} - 24$  эВ; 24,5 эВ;  $I_m(\epsilon+1)^{-1} - 24,5$  эВ; 25 эВ и соответственно 24,5 эВ; 25 эВ и 24 эВ; 25 эВ при  $E \parallel C_3$ . Кроме интенсивных плазменных колебаний наблюдается слабые пики в области 9,8; 13; 14,5; 15,5; 20; 21,5 эВ, которые являются комбинациями потерь плазмонов алюминия кристаллов корунда.

Эффективное количество валентных электронов, вовлеченных в фотопереходы выводится из правых сумм, выходящих из того, что общее количество электронов должно соответствовать всем эффективным электронам. В области энергии плазмона  $N_{эфф}$  достигает 14 электронов на "молекулу"  $Al_2O_3$ , имеющую 18 валентных 2p - электронов. Малое ("ненасыщенное") число валентных электронов в области плазменных частот свидетельствует о том, что оптические переходы из валентной зоны происходят и при энергиях  $E > E_{пл}$ , что обеспечивается при  $E_g > E_g$ .

С целью точного определения значения энергий междузонных переходов и учета всех осцилляторов был использован метод построения диаграмм Арганда из рассчитанных величин диэлектрических констант.

Предложенный метод построения диаграмм Арганда позволил разложить интегральные спектры фундаментальных функций на минимальный набор.

Согласно каскадной теории были рассчитаны точечные дефекты, созданных на единице пути, где каждый ион свинца  $Pb^{208}$  с энергией 3,5 МэВ/а.е.м инициирует каскад смещений атомов: 420 для Al и 233 для O.

Высокая подвижность точечных и сложных дефектов приводит к их стоку, с образованием локальных аморфных областей - зон.

Рост этом становится существенным, когда концентрация зон достигает большой величины и обусловлен зоной, рождающихся вновь, зонами существовавшими ранее. Процесс радиационного роста продолжается до тех пор, пока конфигурация не делается энергетически неустойчивой т.е. пока не станет возможным превращение ее в другой дефект (дислокационную петлю или пору). Сформулировали систему уравнений описывающие кинетику возникновения и скопления зон из ионов Al, происходящих в результате облучения.

Из результатов экспериментальных и расчетных данных сформулирован вклад двух эффектов на электронно-энергетическую структуру корунда: поляризационные явления связаны с расщеплением валентных 2p - состояний

кислорода в полях низкой симметрии решетки корунда и изменение плотности состояний электронов в междоузельных переходах из-за увеличения концентрации радиационных дефектов в приповерхностных слоях.

**Глава IV** изложена на основе результатов работ [28-36]. В ней представлены результаты исследований люминесцентных свойств монокристаллов корунда. Были исследованы спектры возбуждения синей и УФ люминесценции для необлученных и облученных высокоэнергетическими частицами кристаллов корунда в области фундаментального поглощения, с целью анализа их участия в формировании квантового выхода люминесценции.

В области УФ свечения интенсивности до и после облучения высокоэнергетическими частицами в полосе 5,4 эВ совпадают, так как возбуждаются в собственной полосе поглощения и принадлежит  $F^+$  - центру. Синее свечение проявляется в полосе возбуждения 6,3 эВ, которая также соответствует поглощению  $F^+$  - центра.

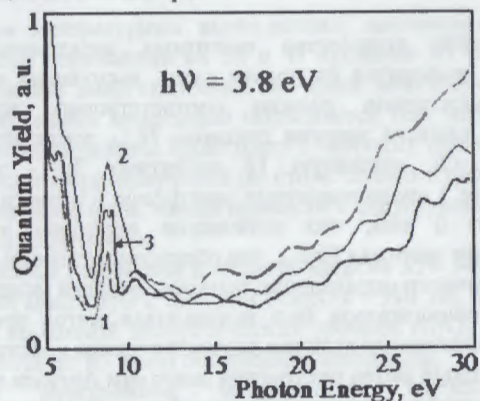


Рис. 5. Спектры возбуждения люминесценции корунда, облученных нейтронами с энергией 2 МэВ: 1 – необлученный кристалл – 300 К; 2- облученный с дозой  $1 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> – 300 К; 3 - облученный с дозой  $1 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> при – 90 К.

Исследования длинноволнового края фундаментального поглощения показали, что люминесценция полосы 7,5эВ эффективно возбуждается в области 8,9-9,2эВ. Спектр возбуждения 7,5эВ совпадает с Урбаховским краем.

В области края собственного поглощения в облученных нейтронами, ионами кристаллах, интенсивный раздвоенный пик при энергии ~9,2 эВ соответствует свободным экситонам. Второй экситонный пик при 8.6-8.7 эВ представляет из себя кислородную вакансию типа F – центра, находящаяся поблизости возбужденных ионов кислорода. (рис.5).

В кристаллах облученных нейтронами наблюдается очень слабое синее свечение люминесценции F – центра (3,0 эВ) и совпадает с литературными

данными. В электроно-облученных образцах, наоборот наблюдается сильная интенсивность данного F – центра. (рис. 6)

Оказалось, что слабая интенсивность возбуждения люминесценции F – центра связано с переносом энергии электронного возбуждения от F – центра к междоузельным  $Al_i^+$  - центрам. Такой вывод согласуется с предложенной моделью, где ионы  $Al_i^+$  располагаются около кислородной вакансии (F – центра) и образуют сложный центр  $[Al_i^+ F]$ .

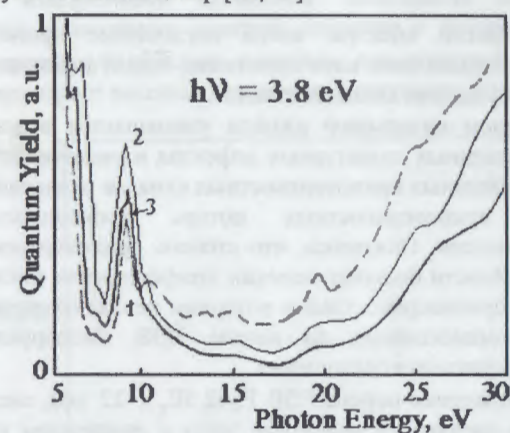


Рис. 6. Спектры возбуждения люминесценции корунда, облученных электронами с энергией 50 МэВ: 1 – необлученный кристалл – 300 К; 2- облученный с дозой  $6 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup> – 300 К; 3 - облученный с дозой  $6 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup> при – 90 К.

Для кристаллов корунда максимум в спектрах возбуждения и люминесценции в области 9.1±9.2 эВ, проявляется во всех образцах и их интенсивность в облученных кристаллах больше, из-за явлений переноса энергий электронных возбуждений к центрам как без переноса заряда, так и с переносом заряда. Наблюдаемое смещение в области ~9 эВ на ±0,2 эВ связано с изменением величины электростатического поля  $\bar{E}$  при облучении, влияющего на совокупность дефектов и экситонов.

Комбинируя все указанные процессы, а также процессы связанные с проникновением вглубь кристалла квантов в зависимости от энергии возбуждения, заключаем, что действительно это приводит к некоторым аномалиям по сравнению со спектрами отражения (поглощения). Причем структура спектров возбуждения сильнее проявляется в области интенсивных пиков поглощения, особенно при низкой температуре.

С целью изучения особенностей процессов РЭВ в области энергии фотонов 10-30 эВ были исследованы спектры возбуждения люминесценции в кристаллах корунда.

Оказалось, что в области  $h\nu \approx 9,5-22$  эВ наблюдается резкий спад эффективности свечения. Слабоструктурная часть квантового выхода оказывается зависящей от энергии следующим образом. На начальном этапе непосредственно после рождения, основным каналом релаксации первичных электронов является рассеяния на оптических фононах. За это время электрон и дырка разбегаются на некоторое расстояние, возрастающее с ростом их начальных энергий во время диффузии на тепловом этапе релаксации.

В ВУФ области спектра, когда поглощение происходит в тонком ( $\sim 10^{-6}$  см) приповерхностном слое кристалла, может наблюдаться значительное тушение возбуждения люминесценции.

С увеличением начального разлета уменьшается вероятность рекомбинации на собственных структурных дефектах и увеличивается вероятность других безызлучательных приповерхностных каналов релаксации.

Описание приповерхностных потерь проводилось в рамках диффузионной модели. Оказалось, что степень приповерхностного тушения максимальна в области больших величин коэффициента поглощения. Таким образом только приповерхностными потерями нельзя объяснить ход спектра возбуждения люминесценции до начала РЭВ, нескоррелированный со структурой коэффициента поглощения.

После прохождения порога РЭВ  $E_c \approx 2.5E_g$  ( $\sim 22$  эВ), электрон неупруго рассеивается на электронах валентной зоны с рождением новой электрон-дырочной пары. Вблизи порога  $E_c \approx 2E_g$  вероятность электрон-электронного рассеяния мала, поэтому электрон-фононное рассеяние является определяющим, что и приводит к сдвигу порога размножения (на  $1+2$  эВ) в сторону более высоких энергий. Область  $h\nu > 22$  эВ соответствует значению  $h\nu \approx E_g + E_v$  ( $E_g \approx 9.5$  эВ,  $E_v \approx 12$  эВ), при котором становятся энергетически возможны процессы РЭВ, из-за того, что энергия системы изменяется с ростом  $h\nu$  только за счет электронов. Средняя энергия дырки почти не меняется, поскольку дырки возникают во всей валентной зоне. Это приводит к тому, что средняя длина разлета уменьшается после прохождения порога РЭВ, но не скачком, а при изменении энергии фотона. Причина низкой интенсивности возбуждения люминесценции в облученных кристаллах явилось дефектность приповерхностных слоев – вероятность захвата вторичных электронов радиационными дефектами и сложными центрами окраски резко возрастает.

Зависимость вероятности высвобождения электронов из ловушки от температуры показало, что максимумы в спектрах возбуждения становятся более плоскими, вследствие длительного времени пребывания на ловушках электронов, из-за чего эффективность свечения уменьшается.

Таким образом, в широкозонных оксидных кристаллах наблюдается эффект увеличения квантового выхода люминесценции в результате РЭВ,

зависящих не столько от энергии рождающих фотонов, а сколько от потока фотонов на образец.

Были проведены исследования образования дефектов в кристаллах корунда при облучении СИ, на основе использования стробоскопического метода электронно-оптической хронографии. При возбуждении рентгенолюминесценции мощным потоком СИ, доза, поглощаемая образцом за время измерения спектра, составляла  $\sim 10^5$  рад (рис. 7).

Наряду с измерениями временной зависимости люминесценции, измерялась также и эволюция спектров свечения с интервалом задержки ( $\tau \sim 41$  нс). Измерения убедительно показали, что кинетика рентгенолюминесценции удовлетворяет законам разгорания и затухания люминесценции.

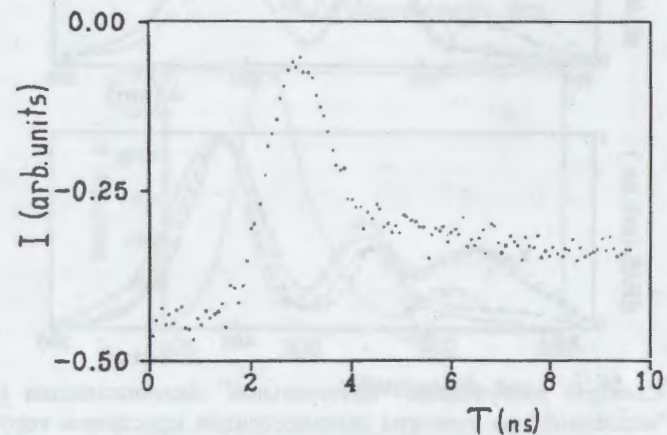


Рис. 7. Рентгенолюминесценция кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Результаты исследований показали, что "мгновенный" спектр люминесценции представляет из себя суперпозицию отдельных областей с различными длительностями излучения: сверхбыстрая компонента  $\tau \leq 1$  нс; быстрая компонента 1.2-1.5 нс и инерционные компоненты. К этому компоненту времени относятся полосы люминесценции 550 и 620 нм.

По результатам систематических исследований были сформулированы различные механизмы дефектообразования. Особый интерес представляет так называемый механизм "радиационной тряски", в соответствии с которым образование упругих волн происходит вследствие взаимодействия квантов с решеткой корунда, как например, при лазерном возбуждении. В результате отражения упругих волн от атомных узлов и их встречи с прямыми упругими волнами вблизи атомов решетки создается интерференция типа стоячих волн, которая приводит к смещению ионов решетки с рождением короткоживущих радиационных дефектов – френкелевских пар. Максимумы в синей и УФ люминесценции обусловлены образованием таких пар.

Проведенные исследования механизмов образования подпороговых дефектов в широкозонных кристаллах показали, что применение СИ в сочетании высокочувствительными методиками детектирования может стать очень полезным инструментом в исследовании механизмов дефектообразования в твердых телах.

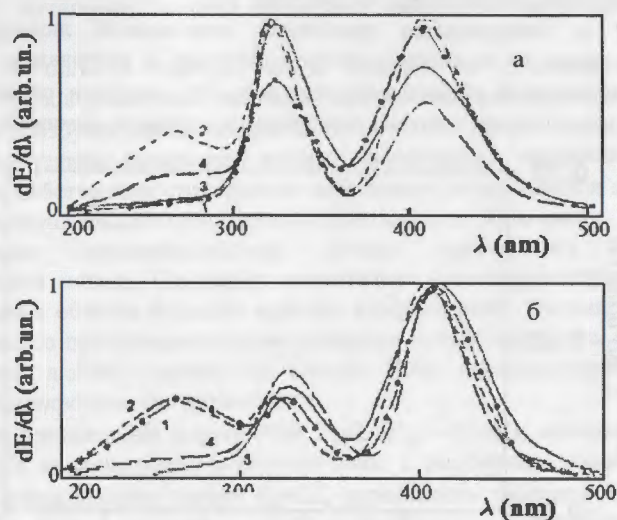


Рис. 8. Спектры возбуждения "интегральной" люминесценции (а) и (б) "медленной" компоненты люминесценции кристаллов корунда-ГНК при 300К и 90К: 1,2 – необлученные кристаллы, 3,4 – облученные электронами с дозой  $6 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>.

Исследования с временным разрешением ВУФ люминесценции при рентгеновском возбуждении ( $h\nu \sim 1 \text{кэВ}$ ), были выполнены для кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  необлученных и облученных электронами, ионами. Оказалось, что наблюдается два типа полос люминесценции в области 160–410 нм (рис. 8, 9). Была зарегистрирована наносекундная ВУФ люминесценция в области спектра 165–170 нм (7.5 эВ) в интервале температур до 90К и его резкое уменьшение при 300К, что указывает на проявление автолокализованного экситона (АЛЭ) с дырочной компонентой  $\text{O}^-$  в корунде. Рассмотрена гипотеза образования АЛЭ, как квазимолекулы  $\text{Al}_4\text{O}$  в элементарной ячейке. При создании экситона в квазимолекуле  $\text{Al}_4\text{O}$  электрон переходит от иона кислорода к одному из четырех ионов алюминия, и может вращаться вокруг кислорода. В ходе релаксации дырка может смещаться из равновесного положения в сторону одной из связей  $\text{Al-O}$ . Электрон же в свою очередь локализуется около смещенной из положения равновесия дырки. Экситон

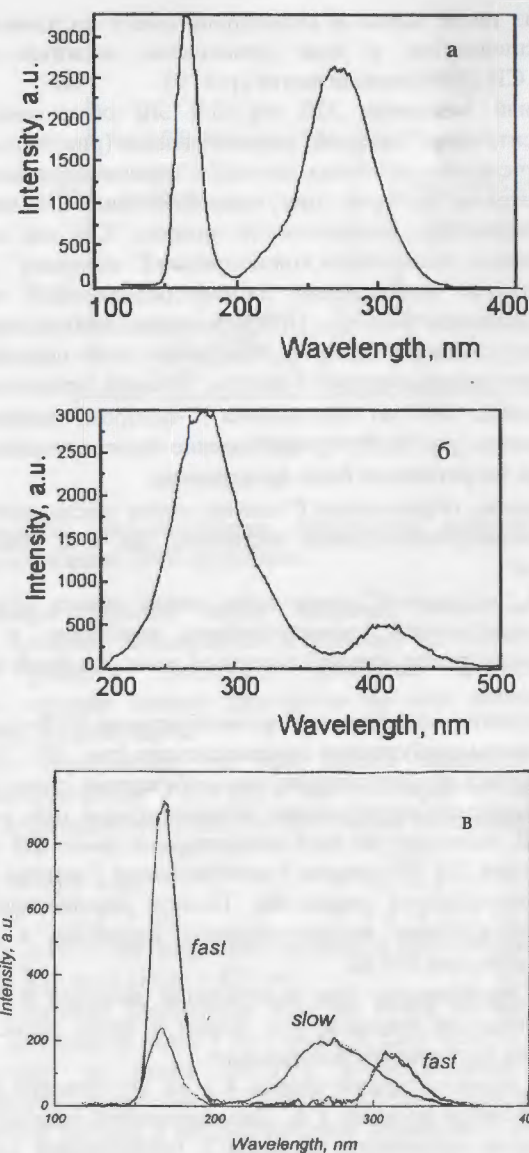


Рис. 9. Спектры возбуждения "интегральной" люминесценции кристаллов корунда-Вернейля (а,б) и "быстрой" и "медленной" компоненты люминесценции-ГОИ (в) при  $T=90\text{К}$ .

образованный из такой дырки и s-электрона имеет состояния с термами и полностью расщепляется в ходе релаксации экситона в АЛЭ при взаимодействии СИ с матрицей решетки (рис. 9).

Наблюдаемый максимум 326 нм (3.8 эВ) обусловлен  $F^+$ -центром. Появление  $F^+$ -центра как "быстрой" люминесценции (рис. 9) с длительностью 5-6 нс в необлученных кристаллах связана с дорадиационными дефектами, например  $F^2$ -центром, которые при взаимодействии СИ изменяют свою валентность. Увеличение интенсивности полосы 326 нм, в облученных кристаллах, связано с увеличением концентрации  $F^+$ -центров.

Однако, полоса возбуждения люминесценции 326 нм возможно обусловлена и экситоном типа  $S_{h+e}$ . Природа полосы возбуждения 410 нм (3.0 эВ), носила дискуссионный характер. Максимум этого спектра совпадает с максимумом фотолюминесценции F-центра. Однако, результаты измерений показали, что полоса 410 нм обусловлена  $F^-$ -центром, захвативший третий электрон из F-центра (рис. 8, 9). Существование гипотетического короткоживущего  $F^-$ -центра теоретически была предсказана.

Таким образом, образование  $F^-$ -центра имеет место, как в результате облучения высокоэнергетическими частицами, так и с помощью СИ по реакции  $F^2 + 3e \rightarrow F^-$ .

В спектрах "медленной" компоненты новая полоса 270 нм (4.6 эВ) соответствует собственной люминесценции кристалла и обусловлена рекомбинацией электронов верхней валентной зоны с дыркой основной зоны (рис. 8, 9).

С целью изучения особенностей при возбуждении ВУФ-фотонами, были исследованы спектры возбуждения люминесценции (рис. 10). Подробно была исследована кинетика люминесценции при возбуждении с энергиями 5.45 эВ и 6.9 эВ. Наблюдаемая интегральная люминесценция при возбуждении с энергией 5.45 эВ, включает до двух элементарных полос 2.9 эВ и 3.79 эВ. Люминесценция при 2.9 эВ связана с возбуждением F-центра с постоянной распада в микросекундном диапазоне. Полоса люминесценции 3.79 эВ обусловлена возбуждением внутрицентровых переходов в  $F^+$ -центрах с длительностью излучения  $\tau < 4$  нс.

Измерения, проведенные при возбуждении энергией 6.9 эВ, а также гауссовское разложение показали, что форма и число полос собственной люминесценции по интенсивности совпадают.

В спектрах люминесценции полоса 4.1 эВ обусловлена переходами с уровня  $\sim 1P$  в основной уровень  $1^1A$ . Люминесценция полосы при 3.67 эВ связана с распадом связанного экситона с последующей рекомбинацией дырок с  $F^+$ -центром. Широкополосный интенсивный максимум при 2.96 эВ обусловлен переходом с уровня  $1B$  в основной уровень  $1^1A$ . Такой вывод обоснован тем, что при температуре 10К оптические фононы почти заморожены и согласно энергетическому уровню ожидаемый переход с  $2B$  при 3.0 эВ не обнаруживается.

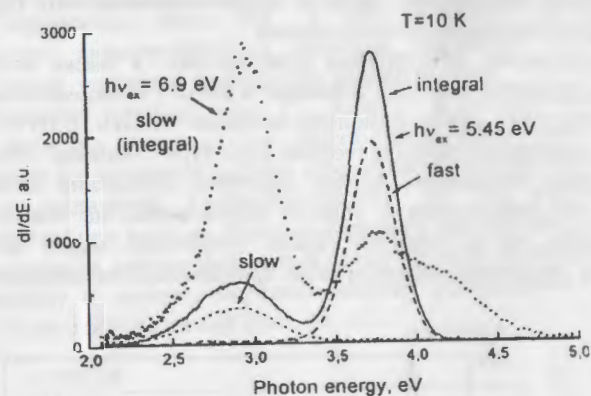


Рис. 10. Спектры люминесценции кристаллов корунда – ГНК при возбуждении ВУФ-фотонами.

Рекомбинация зарядов через анионные вакансии имеют свои особенности, которые обусловлены различным их избыточным зарядом относительно решетки. Поскольку анионные вакансии заряжены положительно, сечение захвата электронов на этих центрах существенно больше, сечения захвата дырок.

Результаты показывают, что при захвате электрона  $F^+$ -центром образуются возбужденные F-центры и они участвуют в рекомбинационном процессе по следующим реакциям, но с различной длительностью излучения:



В области 2-15 эВ наблюдаются свечения в двух спектральных областях: УФ-свечение – 330 нм и синее – 420 нм.

Так как спектры поглощения корунда почти симбатны спектру УФ возбуждения, то главный вклад в этой области дают центры с УФ свечением. Спектры состоят из полос быстрой люминесценции, обусловленные внутрицентровыми переходами в  $F^+$ -центрах и полос медленной люминесценции с постоянной распада в микросекундном диапазоне. Синяя люминесценция 420 нм имеет лишь медленное свечение.

Исследование люминесцентных свойств должно дать новую важную информацию о энергетической структуре широкозонных кристаллов.

**Глава V** написана на основе результатов работ [37-40] и посвящена исследованию оптических свойств иттрий-алюминиевого граната (ИАГ) в области фундаментального поглощения.

Исследованию электронных возбуждений, а также дефектов в ИАГ- $Y_3Al_5O_{12}$ , уделяется большое внимание в связи с исключительной важностью этого диэлектрика для современной лазерной техники. В ВУФ области исследовалась электронно-энергетическая структура "чистого" ИАГ и ИАГ: $Nd^{3+}$  по спектрам отражения. Анализ спектров отражения в области 5-30 эВ показал, что максимумы в области обусловлены не только собственным поглощением, но и содержат вклад примесных ионов неодима в виде "наплывов" на длинноволновом спаде края полосы поглощения.

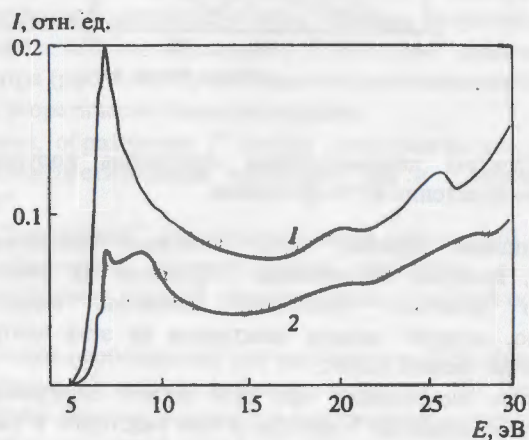


Рис. 11. Спектры возбуждения люминесценции кристаллов ИАГ.

Были исследованы спектры возбуждения люминесценции кристаллов ИАГ в области до 30 эВ с целью анализа процессов РЭВ и роль примеси в процессах РЭВ. Результаты исследований показали, для неактивированных ИАГ обнаруженные полосы 6.8 и 7.2 эВ в спектрах возбуждения люминесценции соответствуют свечениям 4.2 и 4.9 эВ, которые возбуждаются в области фундаментального поглощения  $E \geq 6.5$  эВ (рис. 11). Интенсивность полос возбуждения в номинально "чистом" кристалле уменьшается более чем в два раза при 90К, из-за того, что скорость распада экситона значительно меньше. Было показано, что релаксация электронных возбуждений, формирующих урбаховский край протекает по двум каналам, согласно теории Суми, с образованием АЛЭ для ИАГ. Максимум при  $\sim 7.2$  эВ соответствует АЛЭ типа  $S_{b+c}$  (4.9 эВ). Второй максимум – 6.8 эВ – возникает при рекомбина-

ции электронов освободившейся из ловушки с автолокализованными дырками кислорода, составляющая состояние типа  $S_{b+c}$  (4.2 эВ).

Введение примесных ионов  $Nd^{3+}$  в ИАГ позволяет варьировать в широких пределах люминесцентные свойства, например, видоизменять спектр возбуждения, улучшать физические характеристики. Редкоземельные ионы  $Nd^{3+}$  изоморфно замещая ионы  $Y^{3+}$ , приводят к локальному возмущению матрицы решетки и тем самым способствуют увеличению скорости распада экситонов  $S_{ex}$  сопровождающая эффективной излучательной рекомбинацией. При увеличении концентрации  $Nd^{3+}$  до 1%, эффективность люминесценции сильнее до края фундаментального поглощения, из-за того, что в поверхностных и приповерхностных слоях примеси значительно выше средней по объему и поэтому передача энергии возбуждения к центрам свечения будет более эффективной (рис. 11, 12).

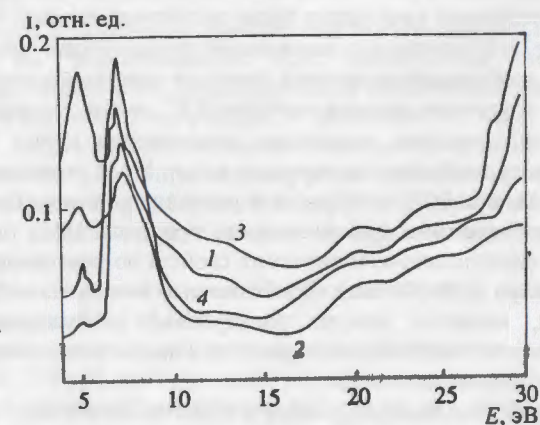


Рис. 12. Спектры возбуждения люминесценции кристаллов ИАГ:  $Nd^{3+}$ :

- 1, 2 - концентрация  $Nd^{3+}$  (1%) при 300 К и 90 К;
- 3, 4 - концентрация  $Nd^{3+}$  (0,5%) при 300 К и 90 К.

УФ люминесценция при  $h\nu \sim 5.2$  эВ связано с возбуждением 4f-5d переходов ионов  $Nd^{3+}$ , а также с возмущением решетки с созданием АЛЭ типа  $S_{b+c}$ . Именно посредством возбуждения рассмотренной люминесценции получили один из наиболее важных аргументов в пользу существования экситонов в кристаллах ИАГ со столь нехарактерным спектром экситонного поглощения.

С целью изучения особенностей процессов РЭВ были исследованы спектры возбуждения ИАГ, неактивированных и активированных  $Nd^{3+}$  с

различной концентрацией. Оказалось, что в области межзонных переходов свечения возбуждается с малой эффективностью. Как показал анализ аналогичных явлений в широкозонных кристаллах, это следует считать безызлучательные приповерхностные рекомбинации, вероятность которых резко возрастает при больших коэффициентах поглощения и малой глубине проникновения фотона в кристалл. Присутствие ионов  $Nd^{3+}$  увеличивает центры безызлучательного распада электронных возбуждений из-за деградации энергии возбуждения через примеси. При  $h\nu \geq 17$  эВ ( $E_c \geq 2,5E_g$ ), более высокая подвижность электронных возбуждений при повышении температуры означает увеличение среднего расстояния между ионами ( $Nd^{3+}$ )\* и вторичными электронными возбуждениями, что приводит к ослаблению тушения. Однако, при  $h\nu \geq 17$  эВ, наблюдается рост выхода свечения, в особенности в кристаллах с  $RE^{3+}$ -центрами. Поскольку концентрация примесного иона в исследуемых кристаллах была достаточно высока, то рост выхода свечения ( $h\nu > 28$  эВ) связана с механизмом размножения электронных возбуждений т.е. возбуждением центров свечения электрон-дырочными парами. Наблюдаемая пороговая энергия свечения  $RE^{3+}$ -ионов хорошо согласуется с "теоретическим" порогом механизма размножения  $E_g + h\nu$  ( $h\nu$  - энергия внутрицентрального возбуждения свечения иона). Из-за уменьшения диффузии носителей заряда при 90К, спектры возбуждения становятся более плоскими.

Учитывая практическую значимость кристалла ИАГ, были проведены исследования спектрально-кинетических свойств по рентгенолюминесценции в области спектра (200-520 нм). Особенностью такого способа возбуждения СИ-фотонами, является участие электронных возбуждений (экситонов, электронов, дырок), возбуждение примесных ионов и собственной структуры кристаллической решетки ИАГ.

Полосы рентгенолюминесценции в области 2.5-4.8 эВ – это множество перекрывающихся серий полос переходов между различными уровнями  $^2F(2)_{5/2}$  на основной уровень  $^4J_{j=11/2,13/2,15/2}$ . В отличие от несколько значительно более узких линий в области спектра 3.5-6.2 эВ при 90К, наблюдаемый широкополосный максимум возрастает и смещается до 4.8 эВ. Результаты измерений показали, что при облучении СИ-квантами образуются электронно-дырочные пары, которые могут локализоваться на атомных вакансиях решетки, причем такие дефекты могут находиться рядом с двумя близко расположенными ионами алюминия. СИ возбуждение может привести к делокализации захваченного электрона и рекомбинации его с дыркой, автолокализованной на ионе кислорода  $O^-$ . Переход  $O^-$  с возбужденного состояния в основное, сопровождается эффективной люминесценцией в широкой области спектра.

Увеличение свечения в спектрах ИАГ с примесью при 90К связано с тем, что свободные электроны рекомбинируют с дефектами основы, а энергия рекомбинации передается ионами неодима, возбуждая их

рентгенолюминесценцию, т.е. происходит передача энергии электронного возбуждения.

Из анализа спектров рентгенолюминесценции следует, что штарковские расщепления в мультиплетах неодима не очень велики, поэтому отдельные компоненты при излучательных переходах проявляются в виде уширенных суммарных полос свечения.

Проведенные исследования показали, что применение СИ позволяет выявить образование структурных дефектов в кристаллах ИАГ в УФ-ВУФ области.

**В Заключение** сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Благодаря применению уникальных экспериментальных установок, основанных на использовании СИ, обнаружены новые полосы оптического поглощения в монокристаллах номинально чистого корунда ( $Al_2O_3$ ), облученного электронами с энергией 50 МэВ, реакторными нейтронами с энергией 2 МэВ и ионами свинца с энергией 3.5 МэВ/а.е.м.

Показано, что в корунде индуцируются центры окраски с полосами оптического поглощения 4.86, 5.4, 6.3, 7 эВ  $F^+$  – центра, и 6.1 эВ  $F^-$  – центра, возникающие вследствие выбивания атомов из нормальных узлов в анионной подрешетке.

Впервые экспериментально обнаружена сильная анизотропия для полосы поглощения 6.3 эВ-  $F^+$  – центр.

В спектрах оптического поглощения обнаружена новая полоса в области 8 эВ (7.9 эВ), которая идентифицирована как принадлежащая  $F^+$  - центру в облученных нейтронами и ионами кристаллах корунда, она была предсказана теоретически.

Показано, что скорость введения дефектов в корунде, облученном быстрыми электронами с энергией 50 МэВ меньше, чем в нейтронно облученном кристалле. Число и интенсивность наблюдаемых полос поглощения сильно зависят от дозы и вида облучения.

2. Установлено, что в кристаллах корунда после облучения электронами, интенсивность поглощения  $F^-$  - центров уменьшается сильнее, чем в  $F^+$  - центрах.

Показано, что в нейтронно облученном кристалле при повторном облучении жесткими фотонами – СИ, интенсивность поглощения  $F^+$  - центров умеренно уменьшается, а  $F^-$  - центров – увеличивается.

На основании экспериментальных результатов и литературных данных показано, что при многократном СИ облучении в результате роста концентрации электрон-дырочных пар происходит перезарядка исходных дорадиационных дефектов. Установлено, что за полосы 302, 358 и 455 нм

ответственны центры окраски типа  $[Al_i^+F]$ ,  $[Al_i^0F^+]$  и  $[Al_i^+F^+]$ , соответственно.

3. По измерениям спектров отражения в широкой области энергии: 5-30 эВ; 70-200 эВ и 530-550 эВ, исследованы оптические свойства и электронная энергетическая структура кристаллов корунда, облученного высокоэнергетическими частицами. Обнаружены новые полосы (6.3, 7 и 8 эВ) на поверхности, которая подтверждает, что облучение приводит к образованию анионных вакансий типа  $F^-$ -центра, а также проявлению поляризационной анизотропии высокоэнергетических полос.

Установлено, что после облучения происходит сильное увеличение интенсивности полос отражения. Из-за нарушения поверхности кристаллов усиливается процесс разупорядочения кристаллической структуры приповерхностного слоя вследствие образования точечных, сложных  $[Al_iF]$ , кластерных дефектов, аморфных зон, т.е. имеет место процесс радиационно-стимулированной десорбции (РСД), которая связана с ионизацией основных уровней катионов, в результате которого на поверхности образуется восстановленная фаза Al. РСД приводит к изменению (увеличению) отражательной способности облученных кристаллов и проявлению эффекта "зеркального" отражения в ВУФ, и в особенности, рентгеновской областях спектра.

4. Расчитан полный комплекс фундаментальных оптических функций для необлученных и облученных (электронами, нейтронами) кристаллов корунда на основе измерения спектров отражения в ВУФ области. Вычислены резонансные частоты междузонных переходов и построены диаграммы Арганда.

Установлено, что величины функций характеристических потерь  $-Im(\epsilon)^{-1}$ ,  $Im(+1)^{-1}$  объемных и поверхностных плазмонов сильно зависят не только от ориентации СИ к  $C_3$ , но и от вида радиационного воздействия, которое приводит к изменениям плотности электронных состояний из-за увеличения концентрации дефектов в приповерхностных слоях кристалла.

Поляризационные явления связаны с расщеплением валентных  $2p$ -состояний кислорода в полях низких симметрий решетки корунда.

5. Установлены закономерности формирования спектров возбуждения люминесценции в области края фундаментального поглощения для кристаллов корунда.

а) исследована корреляция спектров свечения и поглощения (отражения) в необлученных и облученных (электронами, нейтронами, ионами) кристаллах корунда, в синей и УФ областях, которые обуславливают возбуждение люминесценции  $F^-$ -центра (3.0 эВ) и  $F^+$ -центра (3.8 эВ).

б) показано, что свечение синей люминесценции  $F^-$ -центра очень слабое в нейтронно-облученных кристаллах, в то же время сильная интенсивность  $F^-$ -центра проявляется в случае электронного облучения, что связано с переносом энергии электронного возбуждения от  $F^-$ -центра

к междузельным  $Al_i^+$ -центрам с образованием сложного центра  $[Al_i^+F]$ . Вывод согласуется с кластерной моделью  $Al^{3+}:[O^2]_6$ .

6. Изучены особенности процессов размножения электронных возбуждений в широкозонных кристаллах и влияние облучения на эти процессы.

Установлено, что энергетический выход в высокоэнергетической области за краем фундаментального поглощения связан с безызлучательной приповерхностной рекомбинацией зарядов, вероятность которых резко возрастает при больших коэффициентах поглощения и при увеличении концентрации радиационных дефектов в кристаллах. В частности, впервые для монокристаллов корунда показано, что при энергии возбуждающих квантов  $E \geq 2E_g$  эффективность свечений резко возрастает за счет механизма размножения электронных возбуждений, а также участия объемных возбуждений, которые увеличивают эффективность рекомбинационного свечения.

7. Впервые с использованием синхротронного излучения исследовано подпороговое дефектообразование в кристаллах корунда. Показано, что в номинально чистых монокристаллах корунда при возбуждении СИ-квантами высокой плотности, в матрице кристалла индуцируются свободные носители заряда, в результате чего в кинетике люминесценции наблюдаются различные по длительности излучения полосы свечения. Рентгеновские СИ-кванты, приводят к смещению ионов решетки с образованием короткоживущих генетических френкелевских пар и других ЦО типа  $[Al_iF]$ .

8. Изучена разрешенная по времени рентгенолюминесценция кристаллов корунда с использованием импульсной временной структуры СИ.

Установлено, что при возбуждении рентгеновскими квантами в спектрах люминесценции в УФ и ВУФ областях, обнаруживаются «быстрые» и «медленные» компоненты свечения. Быстрая люминесценция (3.8 эВ) приписана к  $F^+$ -центру, либо к экситонам  $S_n^+e$  с длительностью излучения в диапазоне  $\sim 5-6$  нс.

Полоса свечения при 3.0 эВ (410 нм) обусловлена короткоживущим центром - типа  $F^-$ -центр. В облученных кристаллах образование  $F^-$ -центра связано с захватом трех электронов с анионных вакансий.

В ВУФ области люминесценция 7.5 эВ является АЛЭ с дырочной компонентой  $O^-$ .

9. При возбуждении ВУФ-фотонами в спектрах ВУФ люминесценции кристаллов корунда, обнаружено сосуществование полос быстрого и медленного свечения, природа которых интерпретирована на основании структуры энергетических уровней излучающих анионных центров.

10. На основе измерений спектров отражения кристаллов ИАГ и ИАГ:  $RE^{3+}$  установлено, что в области фундаментального поглощения максимумы в спектрах отражения обусловлены собственным и примесным поглощением.

11. При исследовании эффективности возбуждения люминесценции кристаллов ИАГ (неактивированных и активированных  $RE^{3+}$ ) обнаружен ряд особенностей:

а) изменение интенсивности и смещение максимумов полос возбуждения люминесценции.

б) релаксация электронных возбуждений протекает по двум каналам: экситонному –  $S_{ex}$  и рекомбинационному –  $S_r + e$ , на интенсивность свечения которых влияет концентрация примесных ионов неодима, которая сопровождается эффективной излучательной рекомбинацией.

в) проявление в спектрах возбуждения люминесценции безызлучательных приповерхностных каналов релаксации. Высокая концентрация примесных ионов увеличивает центры безызлучательного распада электронных возбуждений из-за деградации энергии возбуждения через  $Nd^{3+}$ .

г) возрастание в высокоэнергетической области эффективности свечения люминесценции обусловлено проявлением размножения электронных возбуждений и рекомбинацией примесных ионов.

12. Исследована рентгенолюминесценция кристаллов ИАГ при возбуждении СИ. В неактивированных кристаллах ИАГ, обнаружена полоса экситонной люминесценции в ультрафиолетовой области при 4.6 эВ.

Установлено, что в кристаллах ИАГ:  $RE^{3+}$  при изменении температуры происходит передача энергии электронного возбуждения, т.е. перераспределение интенсивностей электронной системы – электронных линии примеси иона и электрон-колебательной системы матрицы кристаллической решетки.

#### Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Арутюнян В.В., Ерицян Г.Н., Мелконян Р.А., Назарян Ю.Р., Саакян А.А. "Канал синхротронного излучения для спектроскопии твердого тела".- Тезисы докладов Всесоюзного совещания по использованию синхротронного излучения, СИ-82, Новосибирск, 1982, с.397-399.

2. Арутюнян В.В., Ерицян Г.Н., Мелконян Р.А., Назарян Ю.Р., Хачатрян Г.Х. "Возможности и перспективы применения синхротронного излучения в радиационной физике твердого тела"- Тезисы докладов "Новые экспериментальные методы в радиационной физике полупроводников"- Ереван, 1985, с.76-79.

3. Арутюнян В.В., Григорян Н.Е., Ерицян Г.Н., Мартиросян У.М., Мелконян Р.А., Назарян Ю.Р. "Модернизация монохроматора ВМР-2 и его использование на канале синхротронного излучения"- Ереван, 1987, Препринт ЕФИ-988(38)-87, с.10- Ереван, Изд-во ЕРФИ, с.10.

4. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Grigoryan N.E., Eritsyan G.N. "Study of optical absorption of corundum in the vacuum ultraviolet region of synchrotron radiation"- Nuclear Instruments and Methods in Physics Res. 1989, v A282, p.622-624.

5. Арутюнян В.В., Геворкян В.А., Григорян Н.Е., Ерицян Г.Н., Мартиросян У.М. "Исследование оптического поглощения  $F^+$ - центра в корунде с использованием синхротронного излучения"- ФТТ, 1988, т.30, вып.8, с.2307-2309.

6. Harutunyan V.V., Eritsyan G.N., Ezoyan R.K., Gevorkyan V.A. "On the mechanism of radiation induced change in the transparency corundum single crystals"- Phys. Stat. Sol.(b), 1988, v 149, N1, p.k 77-100.

7. Арутюнян В.В., Геворкян В.А., Григорян Н.Е., Ерицян Г.Н. "Исследование оптических свойств кристаллов корунда в ВУФ области спектра с использованием синхротронного излучения"- Препринт ЕФИ-1200(77)-89, Ереван, Изд-во ЕРФИ, 1989, с.9.

8. Арутюнян В.В., Геворкян В.А., Езоян Р.К., Ерицян Г.Н. "Исследование природы центров окраски  $-Al_2O_3$  фотостимулированными процессами и эффектом "радиационной памяти"- Тезисы докладов седьмой Всесоюзной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов, Рига, 1989, с. 403-404.

9. Арутюнян В.В., Геворкян В.А., Езоян Р.К., Ерицян Г.Н., Саркисов В.Х. "Обнаружение полосы поглощения 285нм при облучении быстрыми электронами"- Изв. АН Арм.ССР, физика, 1989, т.24, в.3, с.132-135.

10. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Grigoryan N.E., Eritsyan G.N. "Study of optical properties of  $-Al_2O_3$  in the vacuum ultraviolet region of synchrotron radiation"- Phys. Stat. Sol.(b), 1990, v.160, p.k 71-74.

11. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Babayan A.K., Eritsyan G.N. Study of radiation stimulated processing in corundum crystals using synchrotron radiation excitation- Proc. 9<sup>th</sup> International Conference "Meeting radiation processing" ed by Guven (Istanbul, University Press. 1994) p. 117-118.

12. Арутюнян В.В., Бабаян А.К., Геворкян В.А., Мартиросян У.М. "Кинетика образования V-центров в  $-Al_2O_3$  при облучении высокоэнергетичными электронами"- ФТТ, 1995, т. 37, N 4, с. 953-959.

13. Арутюнян В.В., Геворкян В.А., Езоян Р.К., Ерицян Г.Н., Саркисов В.Х. "Лазерное излучение центров окраски  $-Al_2O_3$  наведенных быстрыми электронами, в видимой области спектра"- Препринт ЕФИ-1042(5)-88, Ереван, изд.ЕФИ, 1988, с.9.

14. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Nakhverdyan E.A., "Electron-phonon interactions in irradiated corundum single crystals in near-infrared region"-Proc. Conference on Laser Physics-97, ed by Movsesyan M.E.(IPR NAS RA, 1997), p.139-142.

15. Арутюнян В.В., Геворкян В.А., Григорян Н.Е. "Влияние электронного облучения на зонную структуру монокристалла  $-Al_2O_3$ "- Препринт ЕФИ-1183(60)-89, Ереван, изд.ЕФИ, 1989, с.20.

16. Арутюнян В.В., Бабаян А.К., Геворкян В.А., Григорян Н.Е. "Междузонные переходы монокристаллах корунда"- Препринт ЕФИ-1309(41)-91, Ереван, изд.ЕФИ, 1991, с.16.

17. Harutunyan V.V., Belsky A.N., Gevorkyan V.A., Grigoryan N.E., Eritsyan H.N. "The study of corundum single crystal reflection spectra in the corundum fundamental absorption region"- Nuclear Instruments and Methods in Physics Res. 1991, v A308, p.197-199.

18. Арутюнян В.В., Геворкян В.А., Григорян Н.Е. "Радиационно-стимулированное изменение поверхности монокристаллов корунда и оптические функции в вакуумной ультрафиолетовой области"- Поверхность, Физика, химия, механика, 1992, вып. 12, с. 108-111.

19. Арутюнян В.В., Бабаян А.К., Геворкян В.А., Махов В.Н. "Влияние облучения на дефектообразование поверхности монокристаллов  $-Al_2O_3$ "- Поверхность, Физика, химия, механика, 1994, вып. 10-11, с. 128-133.

20. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Eritsyan G.N. "Parameters of interband transitions in corundum crystals"- Phys. Stat. Sol.(b), 1994, v. 183, p.k 23-27.

21. Harutunyan V.V., Babayan A.K., Gevorkyan V.A., Makhov V.N. "Radiation processes in the surface of irradiated corundum monocrystals"- Radiation effects and defects in solids, 1995, v.136, p. 257-260.

22. Арутюнян В.В., Бабаян А.К., Геворкян В.А. Исследование природы образования центров окраски в корунде по спектрам отражения с применением синхротронного излучения- ФТТ, 1995, т. 37, N 2, с. 443-447.

23. Арутюнян В.В., Бабаян А.К., Геворкян В.А., Григорян Н.Е. "Радиационные процессы на поверхности  $-Al_2O_3$  в рентгеновской области"- Поверхность, Физика, химия, механика, 1995, N 11, с.41-45.

24. Babayan A.K., Gevorkyan V.A., Grigoryan N.E., Harutunyan V.V., Martirosian. У.М. "Influence of electron irradiation of the optical properties of  $-Al_2O_3$  in the X-ray region"- Preprint, Trieste, Italy, 1995, N 27, 11p.

25. Harutunyan V.V., Hakobyan T.S., Hovannesyanyan A.S., Gevorkyan V.A., Grigoryan N.E., Avakyan A.K. "Optical constants and functions of corundum single crystals in the vacuum ultraviolet region"- Preprint Yerphl 1512(12)-98, Yerevan, 1998, p.27.

26. Арутюнян В.В., Бабаян А.К., Геворкян В.А., Саркисян Г.К., Махов В.Н. "Исследование поверхностного состояния при облучении ионами свинца с помощью синхротронного излучения" - Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 1999, N11, с.15-18.

27. Арутюнян В.В. Радиационный рост на поверхности монокристаллов корунда облученных высокоэнергетичными частицами- Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2000, (принята к печати).

28. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Grigoryan N.E. "Vacuum ultraviolet luminescence excitation spectra of  $-Al_2O_3$  single crystals"- Nuclear Instruments and Methods in Physics Res. 1991, A308, p.200-202.

29. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Babayan A.K., Martirosian H.M. Luminescence in the fundamental region of absorption of corundum single crystals using synchrotron radiation- Phys.Stst.Sol.(b), 1995, v.191, N 1, p. k9-k11.

30. Арутюнян В.В., Бабаян А.К., Бельский А.Н., Геворкян В.А., Махов В.Н., Мартirosian У.М. "Люминесценция центров окраски в монокристаллах  $-Al_2O_3$ " - ЖПС, 1995, т.62, N 3, с. 218-221.

31. Harutunyan V.V., Belski A.N., Gevorkyan V.A., Eritsyan G.N., Mikhailin V.V. "The short life-time defect formation in  $-Al_2O_3$  under synchrotron radiation"- Radiation effects and defects in solids, 1995, v.136, p. 243-245.

32. Арутюнян В.В., Ахвердян У.А., Геворкян В.А. "Влияние ионного облучения на электронные возбуждения в монокристаллах корунда в ВУФ области"- Труды конференции "Лазерная физика - 97" под ред. Мовсесян М.Е. (ИФИ НАН, РА ), с.135-138.

33. Harutunyan V.V., Hakobyan T.S., Gevorkyan V.A., Hakhverdyan E.A., Makhov V.N. "Influence of radiation on the stimulated processes in corundum crystals in VUV region"-The 12-th, International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics, San.Francisco, 1998, p.97.

34. Harutunyan V.V., Hakobyan T.S., Hakhverdyan E.A., Gevorkyan V.A., Grigoryan V.A., Makhov V.N. "Luminescence excitation and influence of radiation on the stimulated processes in corundum crystals"- Phys.Stat.Sol.(a), 1999, v.171, N 2, p. 623-629.

35. Harutunyan V.V., Hakobyan T.S. Gevorkyan V.A., Makhov V.N. "Luminescence quantum yield and multiplication of electronic excitations in the corundum crystals" - The European Physical Journal, B, 1999, v.12, p.31-33.

36. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Makhov V.N. "Luminescence property studies of  $-Al_2O_3$  by means of nanosecond time-resolved VUV spectroscopy" - The European Physical Journal B, 1999, v.12, p. 35-38.

37. Harutunyan V.V., Babayan A.K., Gevorkyan V.A., Makhov V.N., Mikhailin V.V. «Induced emission in the  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG) monocrystals under the synchrotron radiation"- In: Abstracts. Fourteenth International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, Texas, 1996, p.32.

38. Арутюнян В.В., Геворкян В.А., Бабаян А.К., Ерицян Г.Н., Саркисян Г.К., "Электронные возбуждения монокристаллов граната в области фундаментального поглощения"- Труды первой национальной конференции, Дилижан, Армения, Изд.ЕГУ, 1997, с. 191-194.

39. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Hakhverdyan E.A., Babayan A.K., Makhov V.N. "Luminescence excitation and influence of  $Y_3Al_5O_{12}$  monocrystals in the vacuum ultraviolet region"- Phys.Stat.Sol.(a), 1998, v.167, N 1, p. 237-241.

40. Арутюнян В.В., Ахвердян Э.А., Бабаян А.К., Геворкян В.А., Махов В.Н. "Исследование оптических спектров монокристаллов граната с использованием синхротронного излучения"- Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 1999, N 11, с. 19-22.

## ՄՄՓՈՒՍԱԿԻՐ

Արհեստագիտությունը նվիրված է «մաքուր» և ճառագայթափափված (արագ էլեկտրոն, մեկտրոն, իոն) շափյուրի ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), ինչպես նաև չակփրկված և  $\text{Nd}^{3+}$ -ով ակփրկված նոնաբարի ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  – FUL) միաբյուրեղների հիմնարար փրոյեկտներում երանգանիների ուսումնասիրությանը՝ օգտագործելով սինթետիկ մեթոդները և ճառագայթային լուծիչ ու ռենցյուր փրոյեկտները:

ՄՃ-ի փնջի բարձր ապփրկանքի բերանացման շնորհիվ փրոյեկտային ճառագայթային ճառագայթափափված շափյուրի միաբյուրեղներում դիտվել են կլանման նոր շերտեր, որոնք վերաբրվել են միաբյուրեղային թթվածնի թափուր գրեղերին՝  $\text{F}^+$  կենտրոնների:

Ճառագայթափափված շափյուրի միաբյուրեղների երանգանների վՄՄՄ և Ռենցյուրային փրոյեկտներում դիտվել է անորոշարձման գործակցի մեծացում, որը բացատրվել է սրիպրոյեկտային ապակաճման պրոյեկտներով: Դրա շնորհիվ ճառագայթափափված շափյուրի միաբյուրեղների մակերևույթներին գոյանում է մեքարային ապակաճման շերտ: Արագ մանրիկներով ճառագայթափափված և չճառագայթափափված շափյուրի միաբյուրեղների վՄՄՄ փրոյեկտում անորոշարձման երանգանիներին հաշվարկվել է օպտիկական հիմնարար անորոշարձման կոմպլեքս ֆունկցիոնները, ինչպես նաև ներգործիների ռեզոնանսային անցումները, և կառույցվել է Արգանի դիագնոստիկաները:

Շափյուրի և նոնաբարի միաբյուրեղների հիմնարար կլանումից հետո, 10-30 էՎ փրոյեկտում ենթադրելիական եղբը կախված է ինչպես ոչ ճառագայթային մեքարային փրոյեկտային լիցքակիրների վերամիափրոյեկտից, այնպես էլ ֆրոյեկտային բազմապարկման պրոյեկտներով: Առաջին դեպքը բերում է բվանդային եղբի փրոյեկտման, իսկ երկրորդ դեպքը մեծացմանը: Յուր է փրկել, որ ՄՃ-կեՎ-մանց բվանդների դեպքում շափյուրի «մաքուր» միաբյուրեղների լուծիչային կիմերիկայում դիտվել են փարթեր փրոյեկտային առաքման շերտեր:

Շափյուրի միաբյուրեղների ՄՄՄ-վՄՄՄ լուծիչային երանգաններում հայտնաբերվել են «արագ» և «դանդաղ» բարդարձներ, որոնց բնույթը մեկնաբանվել է ելմերով ամփոնային թափուր գրեղերի կենտրոնների առաքումից:

Նոնաբարի միաբյուրեղում 77Կ ջերմասպրիճմանում դիտվել է սեփական ցանցի ճառագայթում, որն ունի էքսիտրոնային բնույթ: Նկատվել է, որ  $\text{Nd}^{3+}$ -ի առկայության դեպքում այդ առաքման ինդեքսիփրոյեկտները փրոյեկտում է, իսկ  $\text{Nd}^{3+}$  իոնի 1%, ըստ մասայի, դեպքում առաքման ինդեքսիփրոյեկտները գործնականում դառնում է գրո: Վերոհիշյալ երևույթը բացատրվել է գրոնման էլեկտրոնային ենթափայի փարթաճման ցանցից  $\text{Nd}^{3+}$ -ին ենթափայի փրոյեկտմանը: Վերջինս բերում է  $\text{Nd}^{3+}$ -իոնների առաքման գծերի ինդեքսիփրոյեկտային աճմանը: