

Հ Հ Գ Ա Ա Ֆ Ի Զ Ի Կ Ա Յ Ի Կ Ի Բ Ա Ռ Ա Կ Ա Ն
Պ Բ Ո Ր Լ Ե Մ Ն Ե Բ Ի Ի Ն Ս Տ Ի Տ ՈՒ Տ

ՎՈԼՈՂՅԱ ԱՐՍԵՆԻ ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

ՃԱՌԱԳԱՑՔԱՀԱՐՄԱՄԲ ԽՔԱՆՎԱԾ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԸ ԵՎ
ԷԼԵԿՏՐՈՆ-ՖՈՆՈՆ ՓՈՆԱԶԳԻՑՈՒԹՅՈՒՆԸ
ՇԱՓՑՈՒՂԻ ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ

Ա.04.07 - "Պինդ մարմնի ֆիզիկա" մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների
դոկտորի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսությամբ

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Բ

Ե Բ Ե Վ Ա Ն - 1998

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ
ФИЗИКИ НАН РА

ВОЛОДЯ АРСЕНОВИЧ ГЕВОРКЯН

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ
ПРОЦЕССЫ И ЭЛЕКТРОН-ФОНОННЫЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛАХ КОРУНДА

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности
01.04.07 "Физика твердого тела"

ЕРЕВАН - 1998

Մարտի 2017 թ. 20/03/17

Ատենախոսության բեման հաստատվել է Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում
 Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր,
 պրոֆեսոր Կ.Գ.Թրումի (ԵՊՀ)
 ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր,
 Է.Գ.Շառոյան (ՀՀ ԳԱԱ ՖՀԻ)
 ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր,
 Ռ.Բ.Կոստանյան (ՀՀ ԳԱԱ ՖՀԻ)
 Առաջատար կազմակերպություն՝ ՌԱԱ Միկրոէլեկտրոնիկայի ինստիտուտ:

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա
 1998 թ. դեկտեմբերի "24" ժամը "14" -ին
 ՀՀ ԳԱԱ ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների ինստիտուտի
 021 մասնագիտական խորհրդի նիստում:
 Հասցեն՝ 375014, Երևան, Հր.Ներսիսյանի, 25:
 Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ ֆիզիկայի կիրառական
 պրոբլեմների ինստիտուտի գրադարանում:
 Սեղմագիրը առաքված է 1998թ. նոյեմբերի "23" -ին:
 Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,
 ֆիզ.-մաթ. գիտությունների բեկնածու *Մկերչյան* Մ.Ա. Սարգսյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском Физическом институте

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор К.Г. Труни (ЕГУ)
 доктор физ.-мат. наук, Э.Г. Шароян (ИФИ НАН РА)
 доктор физ.-мат. наук, Р.Б. Костанян (ИФИ НАН РА)

Ведущая организация: Институт микроэлектроники РАН

Защита состоится "24" декабря 1998г. в "14" час. на заседании
 специализированного совета 021 при Институте прикладных проблем физики
 НАН РА по адресу: 375014, г. Ереван-14, ул. Гр. Нерсисяна, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладных
 проблем физики НАН РА.

Автореферат разослан "23" _ ноября 1998г.

Ученый секретарь специализированного совета,
 кандидат физ.-мат. наук *Մկերչյան* М.А. Саркисян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы заключается в решении проблемы, связанной с изучением процессов воздействия частиц больших энергий или жесткого электромагнитного излучения (рентгеновские лучи, γ -кванты) на твердые тела, в частности, на "чистый" корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) и рубин ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$), представляет как научный, так и прикладной интерес. Это объясняется тем, что, во-первых, в последнее время значительно расширяется диапазон применения монокристаллов корунда в различных приборах, в частности, оптоэлектронике, например в качестве активного элемента лазеров, светопроводов, оптических окон, защитных покрытий солнечных элементов, подложек и т.д.. Кроме того, корунд рассматривается в качестве потенциального материала первой стенки термоядерных реакторов и контейнеров для содержания водорода благодаря его высокой радиационной стойкости и отработанности технологии выращивания крупногабаритных монокристаллов. Повышение радиационной стойкости кристаллов корунда обеспечивает высокую надежность и долговечность приборов, использующих элементы из корунда и применяемых в условиях космоса, а также в зонах с повышенным уровнем радиации. Приведенные выше аргументы диктуют необходимость комплексного и целенаправленного изучения процессов зарождения и накопления стабильных радиационных дефектов в зависимости от вида облучения. Несмотря на накопленные многочисленные литературные данные как теоретического, так и экспериментального характера по действию радиации на монокристаллы корунда, однозначная интерпретация изменений физических свойств кристалла, связанных с радиационными дефектами, представляет определенные трудности. Общепринятый подход к радиационному воздействию как к некоторому деградирующему твердое тело фактору создает представление о повреждающем, "ухудшающем" действии радиации, оставляя в тени ее "улучшающую" роль. Тем не менее тенденция развития по радиационной физике твердого тела позволяет относиться к этой проблеме более внимательно, на данном этапе развития радиационного воздействия на корунд.

Цель работы: К началу выполнения настоящих работ в области радиационной физики корунда и рубина автор обратил внимание на то, что при изучении воздействия облучения на корунд исследователи в основном изучали влияние нейтронов, γ -квантов и

рентгеновских лучей. Изучение воздействия электронного облучения на корунд имело эпизодический характер. Кроме того, экспериментальные и теоретические работы не систематизированы для однозначного объяснения этих процессов, связанных со сложной структурой радиационных дефектов.

Необходимо подчеркнуть, что еще в конце 50-х и начале 60-х годов значительно повысился интерес к радиационным явлениям, происходящим в кристаллах корунда. В первые годы шло накопление информации относительно изменения оптических, механических, электромагнитных и других характеристик корунда в процессе облучения. При исследовании радиационного образования дефектов кристаллов, создавалось впечатление что ионизирующие лучи, γ -кванты, рентгеновские лучи, быстрые электроны не способны образовывать дефекты смещения, как это происходит в щелочно-галлоидных кристаллах, а могут лишь изменить зарядовое состояние различных дорадиационных дефектов и примесей.

Концентрация дефектов, возникающих при реакторном (нейтронном) облучении, также оказалась значительно ниже той, которую можно ожидать, исходя из теории атомных столкновений. Кроме того, имелись противоречивые результаты в интерпретации данных, полученных при облучении быстрыми электронами. Так например, если авторы работ [1-3] экспериментально показали, что электроны с энергией 2 МэВ способны смещать ионы решетки монокристаллов корунда подобно нейтронному облучению, то группа исследователей также экспериментально показала, что электроны с энергией 0,24, 8 и 26 МэВ "не образуют в решетке Al_2O_3 устойчивых дефектов смещения" [4-6]. Исходя из вышеизложенного была сформулирована постановка задачи по данной диссертации и поставлены следующие научные проблемы:

1. Роль энергии дефектообразующих частиц-электронов в изменении свойств кристаллов корунда, выращенных различными методами, при энергии облучения электронов 2-50 МэВ.

На основе экспериментальных результатов с помощью феноменологических теорий выяснение характера накопления точечных F и F^+ центров (анионные вакансии с двумя и одним локализованными электронами). Определение силы осцилляторов F и F^+ центров.

2. Изучение процессов перезарядки F и F^+ центров при их фотовозбуждении. При этом экспериментально определить возможности образования фототока при возбуждении в F и F^+

центрах. И в рамках квантовомеханических теорий объяснить механизм стимулированной фотопроводимости.

3. Определение величины интенсивности поглощения F и F^+ центров в зависимости от метода выращивания кристаллов, энергии активации и порядка химической реакции F центров.

4. Выяснение природы центров окраски (ЦО), наведенных в корунде быстрыми электронами, изучение при этом кинетики их накопления, термо-отжига, а также их фотолуминесценции.

5. Исследование взаимосвязанных полос поглощения и люминесценции сложных ЦО, исследование характера электрон-фононного взаимодействия и получение информации о силе и типе взаимодействия, происходящего между радиационным центром и окружающей его фононной системой решетки. ЦО сложного типа являются наиболее подходящим средством для этой цели исследований, так как связь между центром и решеткой намного слабее, чем связь собственных ионов решетки.

6. Изучение энергетической структуры оптического поглощения F^+ центров, наведенных быстрыми электронами и нейтронами в корунде, в области УФ и ВУФ спектра с использованием синхротронного излучения (СИ).

7. Исследование влияния электронного облучения на энергетическую структуру спектров отражения корунда в ВУФ области; определение оптических констант и характеристических потери "чистых" и облученных быстрыми электронами кристаллов корунда.

8. Выяснение характер и природы центров свечения монокристаллов корунда по спектрам возбуждения люминесценции в области спектра 5-30 эВ.

9. Исследование влияния облучения быстрыми электронами на фотолуминесценцию рубина, а также на свойства и природу ЦО, наводимых в рубине быстрыми электронами умеренных и больших доз.

10. Изучение влияния γ -облучения на генерационные свойства рубиновых лазеров с примесями галлия и титана, и электронного облучения на генерационные свойства без этих примесей.

Научная новизна и практическая значимость работы:

Наиболее существенные элементы новизны работы можно сформулировать следующим образом:

1. Установлено, что в процессе облучения рентгеновскими лучами, γ -квантами и быстрыми электронами обнаруживается эффект

"малых доз", заключающийся в увеличении пропускания "чистого" корунда в широкой УФ области (иногда до видимой области) спектра при облучении малыми дозами ($10^{10}+10^{12}$ эл.см⁻²) электронов. Установлено, что при "эффекте малых доз" в корунде действуют два конкурирующих механизма--"залечивание" кристаллической решетки, и изменение зарядового состояния дорадиационных центров.

2. Показано, что быстрые электроны образуют такие же точечные F и F⁺ центры, как это установлено при нейтронном облучении. Определено отношение сил осцилляторов F и F⁺ центров $f_F:f_{F^+}=3,9:1$.

3. Установлено и теоретически обосновано, что накопление F и F⁺ центров состоит из трех этапов:

а) Заполнение электронами дорадиационных пустых анионных вакансий; б) участок насыщения, соответствующий полному заполнению исходных анионных вакансий; в) накопление "новых" F и F⁺ центров, обусловленных возникновением анионных вакансий в результате смещения узловых атомов решетки. На первых двух этапах концентрации находятся в состоянии $N_{F^+} > N_F$. На последнем этапе скорость образования F центров превышает скорость образования F⁺ центров, вследствие чего при дозах $\geq 10^{17}$ эл.см⁻² соотношение концентраций изменяется $N_F > N_{F^+}$.

4. Экспериментально зарегистрирован фототок при фотовозбуждении облученного электронами с энергией 50 МэВ корунда в F⁺ полосе поглощения 4,86 эВ. Для объяснения наблюдаемой F⁺ проводимости была привлечена теория прыжковой диффузии, стимулированной светом.

5. Экспериментально наблюдалась перезарядка F и F⁺ центров, т.е. фотовозбуждение в полосе приводит к уменьшению концентрации F центра и к увеличению концентрации F⁺ центров и, наоборот. В рамках феноменологического описания процессов перезарядки обсуждается механизм взаимного превращения F и F⁺ центров.

6. Впервые четко были обнаружены полосы оптического поглощения 6,3; 7 и 8 эВ в облученном электронами и нейтронами корунде при использовании СИ. Наблюдена сильная анизотропия для полосы поглощения 6,3 эВ в зависимости от ориентации электрического вектора \vec{E} СИ к оптической оси С₃.

7. Наблюдена анизотропия полос отражения в зависимости от ориентации электрического вектора \vec{E} СИ к С₃ в широкой области спектра облученного электронами корунда. Установлено увеличение коэффициента отражения в монокристаллах корунда, облученных электронами в областях спектра $h\nu < 9,5$ эВ и $h\nu > 25$ эВ. Исследованы спектры возбуждения люминесценции и механизмы фотонного размножения, возбужденного в необлученных и облученных кристаллах корунда.

8. Установлено, что в процессе облучения реакторными нейтронами и электронами с энергией 25 и 50 МэВ, в корунде генерируются, в основном одинакового типа ЦО. Однако концентрация наведенных ЦО при электронном облучении на два порядка меньше, чем концентрация при нейтронном облучении, при одинаковых дозах облучения. Выяснено, что электроны с энергиями 25 и 50 МэВ способны индуцировать, кроме F и F⁺ центров, также комплексные центры типа $[Al_i^+ F]$, $[Al_i^0 F^+]$ и $[Al_i^+ F^+]$.

Экспериментально обнаружено, что полосы поглощения точечных F, F⁺ и V центров не имеют бесфононных линий (БФЛ) с фононными крыльями (ФК). Установлено, что такое строение имеют лишь сложные центры комплексы типа $[Al_i F]$ и F_n (n-число анионных вакансий). Показано, что положение максимума, ширина и интенсивность БФЛ 915 нм полосы поглощения 850 нм $[Al_i^+ F^+]$ центра зависят от температуры, что хорошо удовлетворяет формуле Дебая-Валлера множителем $\exp[-M(T)]$, и при повышении температуры от 77 до 160 К наблюдается перекачка энергии от БФЛ и ФК с увеличением ее интенсивности.

10. Экспериментально установлено явление переноса энергии электронного возбуждения от радиационных центров к ионам Cr³⁺ в рубине, в результате чего увеличивается интенсивность фотолюминесценции R-линий, увеличивается также интенсивность поглощения R-линий при облучении быстрыми электронами. Этот эффект объяснен частным снятием запрета интеркомбинационных переходов $4A_2g \rightarrow 2E$ иона Cr³⁺ вследствие изменения внутрикристаллического поля около этих ионов из-за образования заряженных центров окраски.

Научная значимость работы заключается в углубленном, более последовательном, корректном и комплексном подходе к описанию процесса радиационного воздействия на широкозонные кристаллы, благодаря которому обнаружены новые явления, связанные с

радиационным упорядочением кристаллов, кинетикой накопления, превращения и коагуляции точечных ЦО. Полученные результаты играют существенную роль в развитии физики структуры широкозонных кристаллов.

Практическая ценность работы заключается в том, что всестороннее изучение ЦО в корунде и в рубине создало условия для разрешения противоречивого вопроса о возможности увеличения выходной энергии рубинового лазера под действием радиации, осуществления перестраиваемых по частоте стимулированных излучений на ЦО, использования в разработке детекторов для регистрации частиц и электромагнитных волн. Кроме того, при облучении корунда электронами с энергией 8 МэВ методом радиационной стимуляции и сопровождающих его термостимулированных процессов (в течение облучения температура кристаллов поднималась до 1200-1500°C) появилась возможность очистить корунд от неконтролируемых примесей ионов группы железа, что дало возможность для выполнения хозяйственных работ.

Основными защищаемыми положениями являются:

1. Описание и физическое обоснование ЦО наведенных быстрыми электронами в решетке корунда. Идентификаций некоторых сложных ЦО. Изучение полос оптического поглощения F⁺ центра с помощью СИ.

2. Увеличение пропускания "чистого" корунда в УФ, а в частности, в видимой области спектра, при облучении "малыми дозами" электронов, а также γ -квантов и рентгеновскими лучами. Выяснение механизма оптического эффекта "малых доз" корунда.

3. Установление отношения силы осцилляторов F и F⁺ центров $f_F:f_{F^+}=3,9:1$. Определение порядка квазихимической реакции ($\gamma=3$) и энергии активации F центра.

4. Вывод о том, что облучение корунда не приводит к появлению новых эффективных ловушек электронов, кроме анионных вакансий, в результате чего скорость образования новых F центров превышает скорость образования новых F⁺ центров, а величина $\ln F/F^+$ меняет свой знак.

5. Определение величины эффективной частоты фононов для ряда сложных ЦО, равной 216 см^{-1} . Она оказалась одинаковой для всех ЦО. Это указывает на то, что сила и тип взаимодействия между ЦО и окружающей его фононной системой в матрице имеют один и тот же характер.

6. Обнаружение фотопроводимости при возбуждении F⁺ центра. Теоретически рассчитанная удельная проводимость σ удовлетворительно коррелируется с экспериментальными значениями.

7. Проявление эффекта "радиационной памяти", суть которого заключается в том, что ЦО, наведенные быстрыми электронами в кристалле корунда, при отжиге при 1000°C и минутном облучении СИ квантами с максимальной энергией 12 кэВ восстанавливаются, при этом концентрация ЦО не достигает ее величины до отжига.

8. Обнаружение V центров в облученных электронами кристаллах корунда.

9. Изучение влияния электронного облучения на энергетическую структуру монокристаллов корунда по спектрам отражения в широком УФ и ВУФ областях. Определение функции энергетических потерь и оптических констант, интерпретация спектров возбуждения люминесценции монокристаллов корунда в области 5-30 эВ.

10. Увеличение интенсивности поглощения и фотолуминесценции резонансных R-линий рубина и рубинового лазера, облученного быстрыми электронами больших доз, отожженного в области температур 300-350°C.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы доложены на:

- Всесоюзной конференции "Радиационная физика полупроводников и родственных материалов" (Ташкент, 1984г.);
- Всесоюзном семинаре "Новые экспериментальные методы в радиационной физике полупроводников" (Ереван, 1985г.);
- "Шестой всесоюзной конференции по радиационной физике и химии ионных кристаллов" (Рига, 1986г.);
- "Седьмой всесоюзной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов" (Рига, 1989г.);
- Международной конференции "Дефекты в диэлектрических кристаллах" (Рига, 1981г.);
- Международной конференции СИ-88 (Новосибирск, 1988г.);
- Международной конференции "Влияние на свойства материалов энергетических импульсов и пучков заряженных частиц" (Дрезден, 1989г.);
- 9-ой международной конференции по радиационным процессам (Стамбул, 1994г.);
- 7-ой Еврофизической конференции по дефектам в изолированных материалах (Лион, 1994г.);

- 1-ой Европейской конференции по синхротронному излучению в изучении материалов (Англия, 1994г.);
- Международной конференции "Применение ускорителей в исследовании и промышленности" (Техас, 1994г.);
- Международной конференции СИ-90 (Москва, 1990г.);
- 2-ой семинар по использованию СИ (Прага, 1989г.);
- Конференции по люминесценции и ее использованию в народном хозяйстве (Москва, 1994г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографии из 164 наименований. Диссертация содержит 251 страницу машинописного текста, в том числе таблиц и 80 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность выполненной работы, цель и задачи исследований. В работе сформулированы результаты по изучению радиационных свойств монокристалла корунда α - Al_2O_3 . Приведены основные положения, вынесенные на защиту.

По каждой главе в отдельности дается краткий анализ основных литературных данных, касающихся непосредственно выполненной задачи, и проблемы диссертационной работы.

Первая глава работы посвящена объектам исследованным, экспериментальной аппаратуре, методике обработки экспериментальных результатов и их измерения.

Исследовались номинально "чистые" (нелегированные) монокристаллы корунда α - Al_2O_3 , выращенные методом горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК), видоизменением методов Кирополоса (ГОИ) и Вернейля а также беспримесный, легированные Cr^{3+} (рубин) и титаном (Ti^{3+}) и галлием (Ga^{3+}) монокристаллы рубина. Образцы корунда, предназначенные для измерений оптического поглощения (ОП), отражения, люминесценции и фотопроводимости, были изготовлены из специально выбранных совершенных слитков в виде плоскопараллельных пластинок $\sim 10 \times 15 \text{ мм}^2$ и кубов со стороной 10 мм^3 . Оптические оси C_3 образцов были параллельны длине большой грани с точностью $\pm 3^\circ$. Поверхности граней всех образцов были тщательно обработаны и имели довольно хорошую зеркальную поверхность. Образцы облучались электронами с энергией $2+50 \text{ МэВ}$,

γ -квантами Co^{60} , рентгеновскими лучами, реакторными нейтронами с энергией 2 МэВ и "белым" пучком СИ.

Поскольку часть экспериментальных результатов получена с применением СИ, приведены основные свойства СИ ускорителя ЕФИ "АРУС" и аппаратуры для ВУФ спектроскопии для снятых спектров поглощения. Измерения отражения возбуждения люминесценции кристаллов корунда для ВУФ диапазона в области спектра $5-30 \text{ эВ}$ проведены на установке "СИБИРЬ-1" российского научного центра "Курчатовский институт".

Приводится блок схема установки для получения спектров фотолюминесценции в области спектра $3-1 \text{ эВ}$, фототока; стандартные приборы для получения спектров ОП в области спектра $6,1-1 \text{ эВ}$ и методика как фотообесцвечивания, так и термоотжига облученных кристаллов.

Значения оптических констант рассчитаны из соотношения Крамера-Кронига на основании экспериментальных данных, полученных при измерении в области $5-30 \text{ ЭВ}$ как необлученных, так и облученных в образцов.

Во второй главе приведены результаты исследований корунда, облученного высокоэнергетичными электронами $2-50 \text{ МэВ}$. Было наблюдается, что высокоэнергетичные электроны приводят к увеличению коэффициента поглощения во всем спектре, причем возрастание поглощения наблюдается в коротковольновой УФ и ВУФ частях спектра. Спектры представляют собой сложную кривую, подобную нейтронно облученным спектрам ОП, которая является суммарной кривой всех составляющих полосы наведенного поглощения (НП). В спектре явно выделяется коротковолновая полоса в области $6,05$ (F-центр, анионная вакансия с двумя локализованными электронами) при дозах облучения $\sim 10^{17} \text{ эл. см}^{-2}$, $5,4$; $4,86$ - F^+ центра анионная вакансия локализованная одним электроном. Кроме того, при применении СИ в спектре ОП в ВУФ области обнаружены полосы ОП $6,3$; 7 ; 8 ЭВ (рис. 1а и б), которые приписаны также F^+ центрам, так как при возбуждении фотолюминесценции этих полос наблюдается свечение $3,8 \text{ эВ}$, а при возбуждения $6,05 \text{ эВ}$ - 3 эВ что подобно нейтронно облученным кристаллам. Обнаружены полосы $5,4$; $4,86$; $6,3$; 7 и 8 эВ , которые хорошо коррелируются с расчетными переходами F^+ центра (методом χ_d самосогласованного поля).

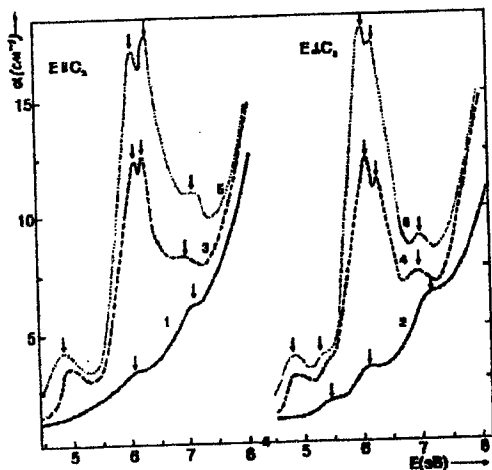


Рис.1а. Спектры ОП корунда ГНК: 1-2 необлученный; 3-4 облученный электронами дозой $1,7 \cdot 10^{17}$ эл.см⁻²; 5-6 дозой $6 \cdot 10^{17}$ эл.см⁻².

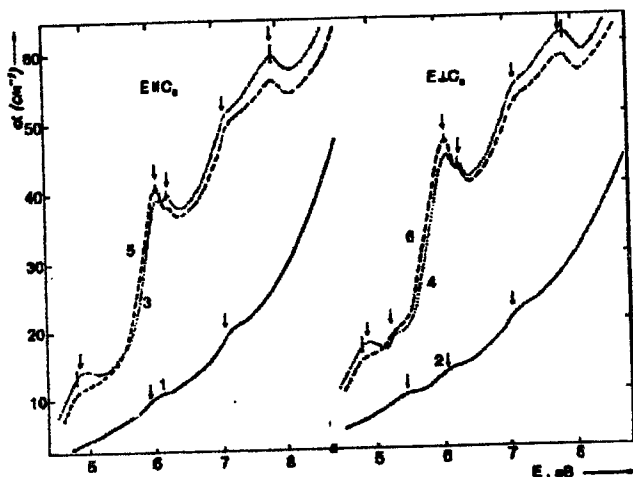


Рис.1б. Спектры ОП корунда, облученного нейтронами дозой $\sim 10^{17}$ н.см⁻²: 1-2 необлученный образец ГНК; 3-4 необлученный образец после термообработки 700 К; 5-6 облученный образец после СИ облучения с экспозицией 310 сек.

Теоретически и экспериментально исследована кинетика накопления F и F⁺ центров в корунде ГНК, облученного электронами с энергией 50 МэВ (рис.2). Кинетика накопления этих центров в корунде, облученном нейтронами, исследована в [7]. В этой работе принято условие равенства сил осцилляторов F и F⁺ центров, что не дает реального представления о происходящих физических процессах при воздействии радиации. По результатам наших экспериментов определена сила осцилляторов для фотопереходов электронов в полосах поглощения F центров (6,05 эВ) и F⁺ центров (4,86), равная $f_{6,05}/f_{4,86} = 3,9:1$. Это позволяет определить отношение концентраций F и F⁺ центров при различных дозах облучения и установить некоторые количественные соотношения между характерными параметрами окрашивания корунда под воздействием быстрых электронов. На основе такого рассмотрения предложена модель процесса накопления.

При облучении быстрыми электронами в корунде образуются свободные от электронов анионные вакансии F²⁺ и центра иного типа, ловушки электронов e и дырок h, междоузельные ионы Al_i, кислорода O_i и связанные с этими возможные ловушки для электронов R с различными зарядовыми состояниями этих образований. Построена феноменологическая теория и вычислены концентрации приведенных величин.

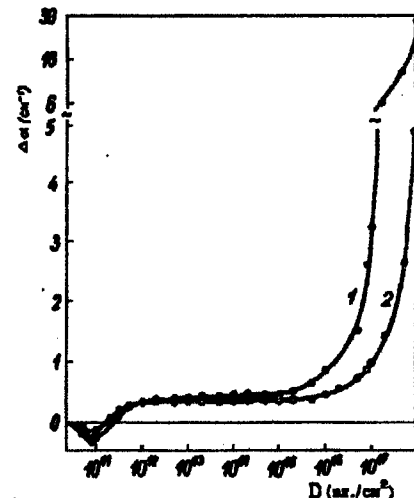


Рис.2. Дозовая зависимость коэффициента поглощения полос F и F⁺ центров: 1- полоса 6,05 эВ; 2- полоса 4,86 эВ.

В приведенных теориях было показано, что кинетика накопления F и F⁺ центров в корунде при облучении быстрыми электронами состоит из трех этапов. На первом этапе, характеризующимся квазилинейным ростом концентрацией ЦО, окрашивание кристаллов обусловлено заполнением электронами дорадиационных анионных вакансий. На втором этапе вследствие рекомбинации устанавливается квазистационарное состояние. На первых двух этапах доминирующей является концентрация F⁺ центров. Выход свободных электронов и дырок определяется значением $\lambda_e = 10^{14} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ при потоке электронов $J_1 = 10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, тогда $\eta_e^{\text{экс.}} = \lambda_e / J_1 = 10^4 \text{ см}^{-1}$ сильно отличается от $\eta_e = 3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ для электронов E=50 МэВ. Вероятно это различие обусловлено сильной рекомбинацией генетических e-h пар, что свойственно кристаллам с малой подвижностью носителей тока. Последний этап окрашивания, характеризуется быстрым линейным ростом концентраций ЦО, связанных с повышением кислородных вакансий при упругих соударениях атомов кристалла быстрыми электронами. Вследствие этого процесса при температуре облучения ~300 К определяется $\eta_1 = \lambda_1 / J_2 = 7 \cdot 6 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ при $J_2 = 10^{12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. При температуре облучения 77 К $\eta_2 = 21 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Это различие естественно связать с уменьшением радиусов области неустойчивости при понижении температуры. Столь высокая радиационная стойкость связана, вероятно, с большими радиационными областями неустойчивости генетических пар Френкеля. Рекомбинации области неустойчивости компонентов анионных пар Френкеля в исследуемых условиях не происходит, что приводит к линейному накоплению ЦО с дозой.

Экспериментальное и теоретическое изучение кинетики перераспределения (фотоконверсия) электронов между анионными вакансиями в облученных кристаллах при фотовозбуждении F и F⁺ центров позволило определить отношение сил осцилляторов для перехода электронов между основным и возбужденным состояниями этих центров на частотах максимумов поглощения соответственно 6,05 и 4,86 эВ, равное $f_{6,5} : f_{4,86} = 3,9 : 1$. Исследования также позволили установить существование свободных анионных вакансий (F²⁺ центр) в корунде после облучения большими дозами высокоэнергетичных электронов.

Для объяснения наблюдаемых процессов фотоконверсии при фотовозбуждении F и F⁺ центров предложен механизм, основанный на перескоках возбужденного электрона между анионными вакансиями.

Для процесса перезарядки феноменологически получены теоретические выражения для временных зависимостей концентраций центров, хорошо согласующихся с экспериментальными кривыми. Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей позволило определить параметры, входящие в теорию, и значения отношений вероятностей перескоков электронов.

Исследовалась фотопроводимость при фотоконверсии между F и F⁺ центрами. Измерение фототока проводилось при комнатной температуре в областях 6,5; 5,2 и 4,86 наблюдалась максимум фототока. Наибольшего значения фототок достигает при возбуждении полосы 4,86 эВ интенсивностью $10^{13} \text{ ф} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ составляла $8,7 \cdot 10^{-13} \text{ А/см}^2$; при концентрации F⁺ центров $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, напряженности E=3·10⁹ В/см, а значение удельной проводимости $\sigma = 2,9 \cdot 10^{-16} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Наличие фотопроводимости в исследованной области спектра, включающей полосы F и F⁺ невозможно объяснить тепловым возбуждением с каждого из возбужденных уровней. В то же время упомянутая выше модель, объясняющая оптическую перезарядку F и F⁺ центров в отсутствие электрического поля, способна в принципе объяснить возникновение фотопроводимости при включении поля. Для вычисления вероятности появления фототока при фотоконверсии рассматривается вероятность прыжка электрона, находящегося в возбужденном состоянии F центра на ближайший по энергии уровень соседней вакансии (F²⁺ центра), учитывая как взаимодействие этих центров между собой, так и взаимодействие каждого из них с ближайшим окружением, что приводит к уничтожению или рождению фононов при элементарном акте перескока. При этом более эффективными становятся прыжки через виртуальные состояния электрона в зоне проводимости с участием двух фононов. Такой прыжок рассматривается как совокупность двух процессов: в одном из них электрон с возбужденного состояния F⁺ центра, находящегося в точке Γ_1 с энергией E₁, переходит в зону проводимости, оставляя вакансию свободной, в другом - электрон из зоны проводимости переходит на F²⁺ центр, находящийся в точке Γ_2 , локализуясь на уровне другого F⁺ центра с энергией E₂, причем, в обоих процессах изменяется состояние фононной подсистемы. Вероятность прыжка электрона через промежуточное состояние определяется во втором порядке теории возмущений. Волновая функция, описывающая F⁺ центр, - гауссовой, при этом температура достаточно высокая (300 К). Исходя из такой модели вычислена удельная проводимость

$$\sigma = \frac{e^2 \langle R_{12} \rangle^2 P_{12} n}{\theta}$$

где, n - концентрация электронов, $\langle R_{12} \rangle$ среднее расстояние между центрами $\sim 0,5 \cdot 10^{-5}$ см, θ - энергия фонона считалась равной $4 \cdot 10^{-15}$ эрг. Коэффициент α F^+ центра $\sim 3,33$ см $^{-1}$, интенсивность падающего света $I = 10^{13}$ ф/см 2 , время жизни $\tau = 7 \cdot 10^{-7}$ с, $F^{2+} = 0,25 \times V_1 = 5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$; $V_1 = 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $n = 3,2 \cdot 10^6$ см $^{-3}$; $m_{\text{эфф}}/M = 3 \cdot 10^{-7}$ (M - масса молекулы корунда) V_1 - концентрация F^+ центра, $m_{\text{эфф}}$ - эффективная масса электрона, $V/N = 10^{-23}$ см 3 , $S = 10^6$ см/сек, $T = 300$ К (N - число элементарных ячеек, V - объем кристалла, S - скорость звука в кристалле). С помощью этих величин была оценена вероятность P_{12} прыжка электрона через промежуточное состояние. На основании этих результатов проведенное рассмотрение позволили добиться количественного совпадения теории с экспериментом.

Наведенные в корунде быстрыми частицами полосы HI отличаются теоретической стабильностью. Отжиг полос 6,05; 5,4 и 4,86 эВ можно подразделить на две большие стадии: 400-750 К и 750-1000 К. Основной отжиг происходит при температуре выше 750 К с максимумом 850-900 К.

Показано, что количество стадий отжига зависит от метода выращивания кристаллов. Если при одних и тех же условиях и одинаковой толщине одновременно облученные кристаллы Вернейля и ГНК термоотжигаются, то выясняется, что вернейловские образцы содержат на одну стадию больше (400-520 К) между тем наблюдается разногласия и в интенсивностях HI в зависимости от метода выращивания кристаллов. Как обычно при одной и той же дозе электронного облучения вернейловские кристаллы окрашиваются в 2 раза интенсивней, чем образцы ГНК:

В работе дается объяснение этого явления. Предлагается, и это достоверно, что вернейловские кристаллы содержат значительно больше нарушений а также неконтролируемых примесей, обусловленных процессом выращивания, чем кристаллы ГНК. При облучении быстрыми электронами (50 МэВ) наличие в вернейловских кристаллах дефектов определенного типа, которые удерживают выбитый междоузельный кислород O_i , приводит к уменьшению числа рекомбинированных O_i и вакансий F^{2+} в ходе облучения, а следовательно и к увеличению интенсивности поглощения в F и F^+ центрах. Причина наблюдаемого различия в интенсивности и нали-

чия резкого температурного стадий изохронного отжига F центра, по видимому, одна и та же - возникновение определенного типа метастабильных, менее термоустойчивых дефектов в вернейловских кристаллах.

Исходя из сохранения количества вакансий и междоузельных O_i , вычислено количество метастабильных дефектов из уравнения кинетики квазихимической реакции, после изотермического отжига при 475, 500 и 525 К; определен порядок реакции $\gamma = 3$ и энергия активации $E = 1,1$ эВ, причем, для трех изотермических отжигов логарифм концентрации Δn_f линейно зависит от времени нагревания, а эти линии параллельны друг другу. Определенная таким образом величина γ одновременно разрешает те проблемы, которые выявились в связи с разницей в значении $\Delta \alpha$ и количества стадии термоотжига вернейловских и ГНК кристаллов при облучении высокоэнергетичными электронами.

Изучение воздействия быстрых электронов на корунд выращенный методом ГНК, показало, что при малых дозах (10^{10} - $5 \cdot 10^{11}$ эл-см $^{-2}$) облучения увеличивается пропускание кристаллов в широкой УФ, иногда и в видимой области спектра. Степень просветления возрастает в сторону коротких длин волн. Максимальное значение уменьшения коэффициента поглощения достигает $\sim 30\%$ (см рис.2). Обнаруженное явление не зависит от температуры, при которой облучаются образцы (~ 300 и 77 К). Обнаруженное явление носит название оптического эффекта "малых доз". Аналогичный эффект наблюдается на кристаллах, выращенных методами ГНК и ГОИ, под воздействием рентгеновских лучей в течение 35 часов, γ -квантами дозой $\sim 10^3$ рад, причем в случае кристалла ГОИ просветление наблюдается также при облучении высокоэнергетичными электронами. Следует отметить, что встречаются образцы корунда ГНК, в которых эффект просветления наблюдается в пределах 10^{10} - 10^{15} эл-см $^{-2}$. В этом случае происходит более быстрый спад поглощения, после чего оно остается неизменным вплоть до доз $\sim 10^{15}$ эл-см $^{-2}$ и затем начинает резко возрастать. Экспериментальные результаты дают нам возможность качественно объяснить механизм эффекта "малых доз": При малых дозах облучения в кристаллах происходит радиационно-стимулированное упорядочение метастабильных атомных дефектов решетки кристалла, которые превалируют над дефектообразованием. При дозах, когда процесс "упорядочения" близок к насыщению, доминирующей оказывается деградация кристалла, обус-

хорошо видна полоса в области поглощения V центров. Она несколько сдвинута в область больших энергий благодаря наличию очень интенсивной полосы коротковолновой стороны. Из рис. 46 видно, что после 18 часов обесцвечивания интенсивность V центров не уменьшается, оставаясь постоянной. При этом также не изменяется и остается постоянной интенсивность полосы ОП 4,86 эВ, несмотря на ее явное присутствие. Это означает, что все ловушки электронов заполнены и освобождены под действием света с F⁺ центров электроны, которые захватываются самими же пустыми анионными вакансиями, в результате чего интенсивность F⁺ не изменяется. Следовательно, при обесцвечивании большая часть V центров разрушается. После облучения СИ корунда, облученного электронами и отожженного при 425 С, наблюдается сильное увеличение по всей области ОП. В частности наблюдается сильное увеличение полосы 3,1 эВ V центра. Из приведенных процессов с помощью реакции между носителями заряда и V центрами приходим к заключению, что после электронного облучения наиболее вероятным является образование V⁰, V⁻ и V²⁻.

Для моделирования катионной вакансии подбирался кластер в виде Al³⁺[O²⁻]₆. Такая модель удобна для объяснения механизмов накопления и анизотропии V центров в электронно облученном корунде. Исходя из этой модели подробно объяснена как кинетика накопления, так и анизотропия, а также причина того, что при нейтронном облучении концентрация V центров не увеличивается. Дана количественная оценка образования V центров при электронном и нейтронном облучении кристалла корунда.

В спектре ОП электронно облученного кристалла была обнаружена полоса 4,35, анизотропность которой A<1. В спектре ФЛ обнаружены также полосы 2,61 и 2,82 эВ, обусловленные полосами поглощения 4,51 и 4,35, соответственно. Исследование кинетики распада полос ФЛ 2,64 и 2,82 эВ показано, что время затухания τ первой полосы ФЛ 57±3 мс при 77 К и 47±2 мс при 300 К и τ второй полосы 100±10 мс при 77 К и 75±5 мс при 300 К.

Изохронный отжиг показал, что с ростом температуры до 570 К интенсивность полосы 4,35 эВ увеличивается. Дальнейшее повышение температуры приводит к уменьшению ее интенсивности, однако даже при 1200 К полоса 4,35 эВ не исчезает. Приведенные исследования показывают, что полоса ОП 4,35 эВ обусловлено радиационными нарушениями решетки кристалла. Это самостоя-

тельный ЦО, и не принадлежит полосе возбуждения F⁺ центра, деформированного относительно полосы 4,86 эВ в следствие самопоглощения. Изучено электрон-фононное взаимодействие в облученных электронами и нейтронами монокристаллах корунда. Наблюдено, что при температуре 77 К все спектры ОП и ФЛ сложных ЦО, кроме F, F⁺ и V центров, имеют бесфононные линии (БФЛ) с широкими фононными крыльями (ФК). Для всех сложных ЦО ФК имеют основной пик поглощения и излучения с частотой $\omega_0 = 216 \pm 1 \text{ см}^{-1}$, который является основной модой кристалла. Изучены ширина, интенсивности и смещения БФЛ (915 нм) полосы ОП 850 нм (1,46 эВ) в зависимости от температуры в области 77-160 К. Экспериментально найдено, что при температуре 77 К полоса ОП 850 нм состоит из интенсивной БФЛ и широкой ФК. В спектре эта структура проявляется в том случае, когда облученный кристалл корунда отжигается при температуре 720 К. Эта температура отжига является оптимальной для данного ЦО, при которой интенсивность БФЛ достигает максимального значения, при этом ФК охватывает область 760-910 нм, а главный максимум $\omega_0 = 216 \pm 1 \text{ см}^{-1} - 50-400 \text{ см}^{-1}$. Было найдено, что, во первых, в ФК проявляется нечетное число обертонов и, во-вторых, есть обертоны, являющиеся суммой других частот с относительно низкой интенсивностью.

Из экспериментальных и теоретических результатов вычислена величина фактора Дебая-Валлера вклад вероятности многофононных процессов в интенсивность спектра поглощения ФК. Из полученных результатов сделан вывод о том, что электрон-фононное взаимодействие удовлетворяет условию Франка-Кондона, а сила связи является слабой из-за малой величины фактора Дебая-Валлера $\alpha(T) = 0,046$ при 77 К.

В четвертой главе представлены результаты исследований ЦО, наведенных в кристаллах корунда, по спектрам отражения и возбуждения люминесценции в области 5-30 эВ; влияния облучения быстрыми электронами на оптические функции корунда.

Изучение воздействия быстрых электронов на кристаллы корунда выявило отличие спектров отражения в зависимости от ориентации электрического вектора E СИ к оси C₃. Такая анизотропность обусловлена спецификой энергетического состояния поверхности окружения а, следовательно и симметрией анионных вакансий F и F⁺ центров, локальная симметрия которых сравнительно отличается от объемной.

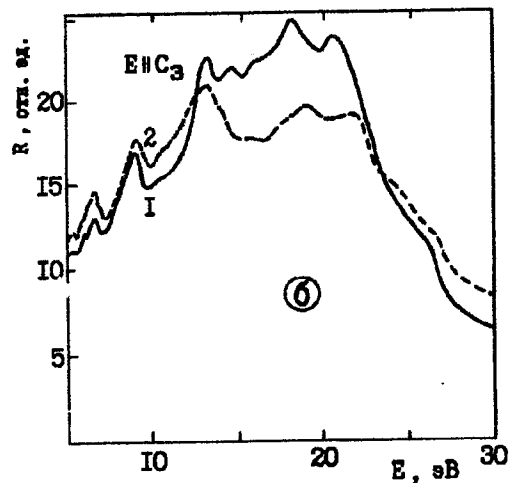
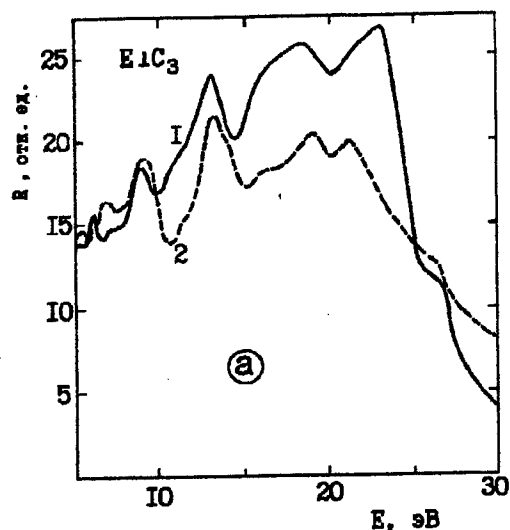


Рис. 4а, б. Спектры отражения корунда ГНК:

1-необлученный; 2-облученный дозой $6 \cdot 10^{17}$ эВ·см⁻².

Экспериментальное изучение спектров отражения корунда показало симбатность полос отражения с полосами поглощения до края фундаментального поглощения. Высокоэнергетичные полосы в спектрах отражения проявляются более четко в необлученных кристаллах. Это различие естественно связать с нарушением стехиометрии приповерхностных слоев в результате радиационного воздействия, что приводит к смещению экситонного максимума в сторону меньших энергий (9,1 эВ, и вместе 9,25 эВ, рис. 4).

Полосы F^+ центра также присутствуют в спектре отражения корунда. В области спектра 13-23 эВ максимумы обусловлены разрешенными переходами из Γ -точки Бриллюэна, которая образована $2p$ -орбиталями анионов кислорода.

По экспериментально полученным величинам и спектров отражения определяется величина фазового сдвига с использованием дисперсионного состояния Крамерса-Кронига. Далее по известным формулам определяли значения оптических констант n и k , ϵ_1 и ϵ_2 необлученных и облученных электронами кристаллов корунда, которые также претерпевают соответствующие изменения.

Эффективное количество валентных электронов, вовлеченных в фотопереходы, выводится из правил сумм и достигает 14 электронов в области плазмона на "молекулу" Al_2O_3 , имеющую 18 валентных $2p$ электронов. Это свидетельствует о том, что силы осцилляторов не истощены, и оптическое поглощение при любой энергии вызывает сдвиг плазмонной энергии от ее свободного значения.

Функции характеристических потерь $-\text{Im}(\epsilon)^{-1}$ и $-\text{Im}(\epsilon+1)^{-1}$ обуславливают объемные и поверхностные потери кристалла. Величина $\text{Im}(\epsilon)^{-1}$ пропорциональна вероятности потери энергии "квази-свободного" электронного газа в Al_2O_3 , что характеризует максимальное колебание энергии плазмона.

Максимальная энергия объемного плазмона равна 26 эВ ($E \parallel C_3$) и 26,5 эВ ($E \perp C_3$). Функция $-\text{Im}(\epsilon+1)^{-1}$ соответственно, равна 22 и 22,5 эВ ($E \parallel C_3$) и 24-25 эВ ($E \perp C_3$). Пики 10,3; 10,5; 14,5 и 15,6 эВ обусловлены комбинациями потерь поверхностных и объемных плазмонов алюминия. В результате облучения кристаллов корунда происходит смещение пиков плазмона из-за "разрушения" поверхности и увеличения концентрации дефектов в приповерхностных слоях (точечные, агрегатные комплексы, кластеры и т.д.). При этом происходит десорбция кислорода с поверхности кристалла.

Алюминий, возникший в результате "разложения" поверхности, заполняет дислокационные петли и поры, микротрещины и тем самым создает "зеркальную поверхность", благодаря чему наблюдается увеличение коэффициента отражения (см. рис.4). Смещение пиков плазмонов связано также и с ионизацией глубоких электронных оболочек катионов.

Исследование спектров возбуждения люминесценции корунда, облученного быстрыми электронами больших доз ($6 \cdot 10^{17}$ эл.см⁻²), выявило наличие полос возбуждения свечения 5,4; 6,3; 7 и 8 эВ, аналогичных полосам поглощения и отражения, наводимых в корунде электронами и нейтронами, обусловленных F⁺ центрами и полосами 6,05 эВ- F центра.

Слабые аксионные возбуждения в синей УФ области свечения, но сильные в области 9 эВ красной (1,76 эВ) люминесценции, объясняются распадом экситонов на свободные электроны и дырки. Так как при облучении часть ионов Cr³⁺ (концентрация ионов Cr³⁺ составляет $\sim 10^{16}$ см⁻³) изменяют свою валентность и становятся ионами Cr²⁺ и Cr⁴⁺, то последними захватываются освобожденные электроны и дырки, и ионы Cr²⁺ и Cr⁴⁺ переходят в трехвалентные возбужденные состояния с последующим квантом R люминесценции (R линий $\sim 1,76$ эВ).

В области 9,5-22 эВ эффективность передачи энергии центрам свечения падает из-за безызлучательных каналов релаксации путем передачи энергии электронного экситонного и плазмонного возбуждения.

При энергии возбуждающего излучения 22 эВ эффективность синего и УФ свечения возрастает за счет фотонного умножения и участия объемных возбужденных кристаллов.

В пятой главе представлены результаты исследований ЦО, наводимых в кристаллах рубина высокоэнергетичными электронами и γ -квантами; влияния облучения быстрыми электронами на фотолуминесценцию R-линий рубина.

Изучение взаимодействия быстрых электронов умеренных доз ($\leq 10^{16}$ эл.см⁻²) и γ -квантов на кристаллы рубина выявило полную аналогию спектра ДП, процессов окрашивания и отжига. Спектры ДП рубина состоят из хорошо известных полос 5,23; 4,43; 3,35 и 2,64 эВ, а также в них наблюдается еще одна полоса в области $\sim 6,05$ эВ. Часто наблюдаемая в спектрах рубина полоса 5,75 эВ является результатом перекрывания полос $\sim 6,05$ и 5,23 эВ. Полосы

ОП $\sim 6,05$ и 5,23 эВ хорошо проявляются в спектрах кристаллов, обесцвечиванных квантами 2,64 эВ.

Фотообесцвечивание в полосах 5,23; 4,43; 3,35 и 2,64 эВ приводит к равномерному убыванию их интенсивностей. Это позволило предположить принадлежность этих полос одному и тому же центру Cr²⁺. Фотообесцвечивание квантами 6,05 и 4,86 эВ верхней-ловских и ГНК кристаллов корунда, облученных быстрыми электронами, оказало равномерное изменение интенсивности поглощения на частотах 6,05 и 6,3 эВ, а в области меньших энергии- неравномерное. Обесцвечивание квантами 2,64 эВ не вызывает ни каких изменений в спектрах ДП ГНК кристаллов, тогда как для верхней-ловских образцов наблюдается картина, аналогичная для рубина, т.е. в области 6,05 эВ происходит уменьшение интенсивности поглощения. Эти исследования позволяют заключить, что в спектрах наблюдаемых в ДП рубина, облученного умеренными дозами быстрых электронов, происходит уменьшение интенсивности поглощения полосы в области $\sim 6,05$ эВ, обусловленное Cr⁴⁺ центром.

Исследования показали, что в спектрах ДП рубина, облученного быстрыми электронами больших доз ($\geq 10^{16}$ эл.см⁻²), снова наблюдается увеличение интенсивности поглощения полос от 5,27; 4,43; 3,35 и 2,64 эВ. После отжига при температуре ~ 573 К, выявилось наличие полос 6,05; 5,4 и 4,86 эВ, аналогичных полосам, наведенным в корунде электронами и нейтронами. С ростом дозы облучения интенсивность этих полос увеличивается. На присутствие в спектре ДП остальных 5 полос, обусловленных радиационными структурными дефектами, указывают возрастание (после насыщения) интенсивности при окрашивании и наличие высокотемпературной стадии отжига 3,35 и 2,64 эВ. Исследование фотолуминесценции R-линий рубина, концентрация ионов хрома в образцах была $\sim 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³, облученного электронами с энергией 50 МэВ, дозой $\sim 3 \cdot 10^{17}$ эл.см⁻² и отожженного при температуре 570-620 К, показало, что интенсивность люминесценции R-линий обработанных кристаллов значительно увеличивается по сравнению необлученными образцами. Наблюдаемый эффект объясняется излучательной и безызлучательной передачей энергии от радиационных центров электронного возбуждения ионам Cr³⁺.

Облучение высокоэнергетичными электронами в матрице корунда приводит образованию ряда полос ОП ЦО, как показано выше, часть которых являются "активными", а часть "паразитного" цен-

тра, например ОП 3,94 эВ которые приводят к уменьшению интегральной интенсивности R-линий люминесценции. Температурный отжиг приводит не только к восстановлению ионов Cr^{3+} и отжигу ряда полос, в том числе и "паразитных центров", но и вследствие чего сильно люминесцирующих термостабильных центрах, происходит передача энергии электронного возбуждения ионами Cr^{3+} .

Шестая глава диссертационной работы посвящена генерационным свойствам рубиновых лазеров. Многочисленные данные воздействия радиации на генерационные характеристики рубиновых лазеров крайне противоречивы, и по данному вопросу нет единой точки зрения. Известно, что введение в рубин изовалентной примеси способствует повышению оптической однородности кристалла по распределению хрома. Это может привести к улучшению оптических и генерационных свойств кристаллов рубина. Для выяснения влияния радиации и изовалентной примеси на оптические и генерационные характеристики рубина были использованы образцы рубина, активированные галлием и титаном, термообработанные в окислительных и восстановительных условиях, а также облученные γ -квантами разных доз. Условия термообработки влияют только на УФ часть спектра: при отжиге в среде кислорода интенсивность поглощения в этой области спектра увеличивается. Интенсивность спектра так-же возрастает с увеличением концентрации вторичных примесей. Облучение γ -квантами рубина, термообработанного в кислороде, приводит к увеличению интенсивности поглощения во всем спектре, за исключением 550 нм и более. В спектре ОП рубина с добавкой Ti была наблюдаема полоса ОП 5,6 эВ, приписываемая Ti^{3+} полоса 6,9 эВ Ti^{4+} .

Энергетический выход $E_{\text{д}}$ стимулированного излучения кристаллов рубина до и после γ облучения и после обесцвечивания лазерных элементов пятью вспышками для рубина с примесью Ga увеличивается по сравнению с чистым рубином и рубином с Ti.

Уменьшение генерационных потерь в активной среде ОКГ, связанное с повышением оптической однородности по распределению Cr^{3+} , приводит к увеличению $E_{\text{д}}$. Хотя примесь Ti также улучшает оптическую однородность кристаллов рубина увеличение $E_{\text{д}}$ не наблюдается. Это означает, что в кристаллах рубина, легированных Ti, возникают каналы потери энергии, которые успешно конкурируют с улучшающими факторами. Увеличение интенсивности поглоще-

ния способствует уменьшению выхода излучения и повышению порога генерации.

Как было показано выше, передача энергии электронного возбуждения от радиационных ЦО к ионам Cr^{2+} может привести к повышению выходной энергии рубиновых лазеров. До температурного отжига после облучения АЭ лазера до доз $5 \cdot 10^{17}$ эл.см⁻² ухудшались порог генерации $E_{\text{д}}$ и выход $E_{\text{д}}$. После температурного отжига АЭ при 600 К в течение 15 мин $E_{\text{д}}$ увеличивался на 40%, на столько же уменьшался порог генерации. Наблюдалось также, что при нагревании АЭ рубина с ростом температуры до 700 К генерационные характеристики лазера ухудшались, а при температурах выше 700 К генерационные параметры больше не изменялись и почти совпадали с параметрами исходных необлученных кристаллов.

Исследования показали, что световой отжиг (ламповая накачка) облученных электронами АЭ рубина, так же приводит к увеличению энергии генерации $E_{\text{д}}$, как и термический отжиг. Однако, световой отжиг даже после 20-25 вспышек накачки различными энергиями не приводит к полному восстановлению энергии $E_{\text{д}}$.

Увеличение энергии генерации лазера $E_{\text{д}}$ с ростом числа вспышек объясняется тем, что действие возбуждающего света на облученные кристаллы АЭ рубина сводится, в основном, к фотостимулированному разрушению ионов Cr^{2+} и Cr^{4+} и частичному восстановлению концентрации ионов Cr^{3+} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. Экспериментально показано, что электроны с энергиями 2-50 МэВ создают в решетке корунда устойчивые структурные дефекты, возникающие вследствие выбивания бомбардирующими электронами атомов из нормальных узлов в анионной подрешетке им соответствуют F и F⁺ центры с полосами оптического поглощения соответственно 6,05 эВ (F центр) и 5,4; 4,86; 6,3; 7 и 8 эВ (F⁺ центр). Последние три полосы в спектре НП выявлены с помощью СИ, в катионной подрешетке-центры V типа с полосой поглощения в области 3,1 эВ.

Установлено, что при облучении высокоэнергетичными электронами в корунде индуцируются полосы 285, 302, 325, 380, 410-455, 530, 570, 690 нм. На основе наших экспериментальных результатов и литературных данных показано, что за полосы 302, 358 и 455 нм ответственны центры окраски типа $[\text{Al}_1^+ \text{F}]$; $[\text{Al}_1^0 \text{F}^+]$ и $[\text{Al}_1^+ \text{F}^+]$ соответственно.

2. Установлено различие в процессах окрашивания и отжига при облучении "чистого" корунда быстрыми электронами в зависимости от метода выращивания кристаллов. Вернейловские образцы окрашиваются 1,5-2 раза сильнее кристаллов ГНК. Изучение процесса изохронного отжига F полос показало, что отжиг вернейловских кристаллов имеет одну стадию больше, чем кристаллы ГНК. С помощью теоретических расчетов и экспериментальных результатов определены порядок квазихимической реакции ($\gamma=3$) и энергия активации ($\xi=1,1$ эВ) F центров. Сделан вывод, что наблюдаемое различие является следствием содержания дорадиационных дефектов в кристаллах Вернейля.

3. Экспериментально и теоретически показано, что процесс накопления F и F⁺ центров в корунде при облучении быстрыми электронами в широкой интервале доз 10^{10} - 10^{18} эл.см⁻² подразделяется на три этапа. Первоначальные стадии окрашивания кристаллов обусловлены заполнением дорадиационных анионных вакансий электронами. Сначала происходит однократное заполнение, соответствующее образованию F⁺ центров, затем образуются F центры. На втором этапе вследствие рекомбинации устанавливается квазистационарное состояние, в котором доминирующей является концентрация F⁺ центров. Последний этап окрашивания связан с появлением кислородных вакансий (F и F⁺ центры) при упругих ударах атомов кристалла.

Установлено, что при температуре 77 К скорость накопления (F+F⁺) центров в корунде почти в три раза превосходит скорость накопления при температуре ~300 К, что естественно связать с уменьшением радиусов области неустойчивости при понижении температуры.

4. Экспериментально определено соотношение сил осцилляторов для переходов электронов между основным и возбужденным состоянием F и F⁺ центров на частотах максимумов поглощения соответственно 6,05 и 4,86 эВ, которое равно $f_{6,05}:f_{4,86}=3,9:1$. Установлено наличие пустых анионных вакансий V⁽⁰⁾ в кристаллах корунда, облученных большими дозами быстрых электронов.

Предложена модель процессов перезарядки анионных вакансий в различных зарядовых состояниях фотовозбуждения на частотах поглощения F и F⁺ центров. Получено теоретическое выражение, которое хорошо согласуется с экспериментальными кривыми, т.е. после возбуждения в F⁺(F) полосе, а затем в F(F⁺) полосе, от-

ношение изменения коэффициентов ПП становится одинаковым при 300 К в обоих случаях.

5. Экспериментально наблюдается фотопроводимость в облученном электронами корунда при возбуждении в F⁺ полосе поглощения 4,86 эВ. Предложен механизм фотопроводимости, обусловленный прыжками электронов по возбужденным состояниям F и F⁺ центров. При разумных значениях параметров достигнуто удовлетворительное количественное согласие теоретического и экспериментального значений фототока.

6. Обнаружена полоса оптического поглощения 285 нм в спектрах электронно и нейтронно облученных кристаллов корунда. При возбуждении в полосе 285 нм наблюдается люминесценция в полосе 440 нм с временем затухания $\tau=53\pm3$ мс при 77 К и $\tau=47\pm2$ мс при 300 К. Экспериментально установлено, что время затухания люминесценции в полосе 275 нм равно $\tau=110\pm10$ мс при 77 К и $\tau=75\pm5$ мс при 300 К.

7. Исследована кинетика накопления V центров в монокристаллах корунда, наблюдается, что с ростом дозы в интервале $5\cdot 10^{16}$ - 10^{18} эл.см⁻² при облучении электронами с энергией 50 МэВ концентрация V центров линейно увеличивается. С помощью реакции между V центрами и носителями заряда, учитывая также кластерную модель типа $Al^{3+}:[O^{2-}]_6$, объясняется как механизм уменьшения, так и увеличение интенсивности полосы 3 эВ. Приводится модель V центров, которая удовлетворительно объясняет кинетику накопления и анизотропию V центров при электронном облучении.

8. Обнаружен оптический эффект малых доз. После облучения рентгеновскими лучами, γ -квантами и электронами малых доз (10^{10} - $5\cdot 10^{11}$ эл.см⁻², в некоторых случаях 10^{10} - 10^{16} эл.см⁻²) происходит изменение оптических свойств кристаллов корунда, в частности, в УФ области спектра пропускание всех кристаллов независимо от метода их выращивания, улучшается, т.е. кристалл "просветляется". Степень "просветления" возрастает с сторону коротких длин волн. Показано, что в процессе облучения в корунде действуют два конкурирующих механизма: "залечивание" (упорядочение) кристаллической решетки и перезарядка дорадиационных дефектов, которые зависят от предистории кристалла.

9. Все полосы поглощения фотолюминесценции сложных ЦО имеют БФЛ, сопровождающиеся ФК. Величина основной частоты $\omega_0=216$ см⁻¹

для всех полос одинакова, и является нижним пределом оптических фононов.

Детально изучена ОП 850 нм и ФЛ 1075 нм. Фононные крылья ФК являются комбинацией ω_0 и других частот, а также повторением $n\omega_0$, где $n=2,3,5,7,9$. Так как при температуре 160 К в спектрах ОП и ФЛ наблюдается электронно-колебательная структура, и величина фактора Дебая-Валлера равна 0,046 при 77 К, то это свидетельствует о слабой электрон-фононной связи.

Ю. Экспериментально получено значительное увеличение интенсивности фотолуминесценции R-линий рубина, облученного большими дозами быстрых электронов и отожженного при температуре 575+625 К. Обнаруженный эффект объясняется излучательной и безызлучательной передачей энергии электронного возбуждения от термостабильных радиационно-структурных ЦО к ионам Cr^{3+} .

Полученные результаты позволяют повысить к.п.д. рубинового лазера на 40% и понизить порог генерации лазерного излучения.

II. Исследована спектральная зависимость коэффициента отражения (необлученного и облученного) корунда в области энергии 5+30 эВ в зависимости от ориентации электрического вектора \vec{E} СИ к C_3 . Обнаружена новая структура (6,3 и 7 эВ) в спектрах отражения около края фундаментального поглощения, которая подтверждает, что электронное облучение приводит к образованию F^+ центра и смещению экситонного пика, а также проявлению поляризационной анизотропии высокоэнергетичных полос. Группа максимумов в спектрах отражения в области 13+21,5 эВ обусловлена разрешенными переходами в зонах Бриллюэна, которые образованы 2p-орбиталями анионов кислорода.

12. На основе измерений спектров отражения вычислены спектры оптических констант и диэлектрической функции облученного и необлученного корунда. Анализируя формы соответствующих спектров, установлено, что величины $-I_m(\epsilon)-I$, $-I_m(\epsilon+1)-I$ сильно зависят не только от ориентации \vec{E} СИ к C_3 , но и от электронного воздействия, которое приводит к изменениям в переходах с верхнего интенсивного максимума в плотности состояний 2p-зоны из за увеличения концентрации дефектов в приповерхностных слоях кристалла.

13. Исследована структура полос свечения по спектрам возбуждения люминесценции в широкой области спектра. Установлена идентичность свечения (3 и 3,8 эВ) в спектрах возбуждения

люминесценции с полосами оптического поглощения до края фундаментального поглощения и идентифицированы как полосы поглощения F^+ центра (5,4; 6,3; 7 и 8 эВ), так и F центра (6,05 эВ). Экситонные возбуждения в синей (3 эВ) и УФ (3,8 эВ) люминесценции интерпретируется, как безызлучательный перенос энергии, так и распад экситона на свободные дырки и электроны с последующим захватом центрами свечения.

Обнаружено проявление в спектрах возбуждения люминесценции безызлучательной приповерхностной рекомбинации зарядов, вероятность возникновения которых резко возрастает при больших коэффициентах поглощения и малой глубине проникновения света в кристалл. При энергии возбуждающих квантов $h\nu > 22$ эВ эффективность синего и УФ свечения возрастает за счет механизма фотонного умножения и участия объемных возбуждений, которые также увеличивают эффективность рекомбинационного свечения.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Атабекян Р.Р., Восканян Р.Е., Геворкян В.А., Ерицян Г.Н., Езоян Р.К., Саркисов В.Х. Исследование спектров дополнительного поглощения лейкосапфира и рубина, облученных быстрыми электронами и γ -квантами. - Изв. АН Арм. ССР, Физика, 1981, т. 16, в. 1, с. 64-71.
2. Атабекян Р.Р., Геворкян В.А., Езоян Р.К., Ерицян Г.Н., Саркисов В.Х. Дефекты и центры окраски, наведенные в корунде и рубине высокоэнергетичными электронами. III. Оптические свойства корунда, облученного высокоэнергетичными электронами. - Препринт ЕФИ-774(I)-85, Ереван, 1985, с. 17.
3. Atabekyan R.R., Ezoian R.K., Gevorgyan V.A., Vinetskii V.L. Photostimulated electron redistribution between F and F^+ centres in corundum. - Phys. Stat. Sol. (b), 1985, v. 129, #1, pp. 321-329.
4. 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, в. 8, с. 2307-2309.
5. Harutunyan V.V., Eritsyan G.N., Ezoian R.K., Gevorgyan V.A. On the mechanism of radiation induced change in the transparency corundum single crystals. - Phys. Stat. Sol. (b), 1988, v. 149, #77, pp. k77-k100.
6. Harutunyan V.V., Grigoryan N.E., Gevorgyan V.A., Eritsyan G.N.

- Study of optical absorption of corundum in the vacuum ultraviolet region of synchrotron radiation.-Nucl.Instr.Meth. Phys.Res.,1989,A 282,pp.622-624.
7. Harutunian V.V.,Gevorkian V.A.,Grigorian N.E.,Eritsian G.N. Study of optical properties of α -Al₂O₃ in the vacuum ultraviolet region of synchrotron radiation.-Phys.Stat.Sol.(b), 1990,v.160,pp.k71-k74.
 8. Harutunyan V.V.,Gevorkyan V.A.,Grigoryan N.E. Vacuum ultraviolet luminescence excitation spectra of α -Al₂O₃ single crystals.-Nucl.Instr.Meth.Phys.Res.,1991,A 308,pp.200-202.
 9. Атабекия П.Р.,Геворкян В.В. Кинетика накопления F и F⁺ центров в корунде при облучении быстрыми электронами и перенос заряда между ними при их обесцвечивании.-Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Радиационная физика полупроводников и родственных материалов".Ташкент,1984,с.78.
 10. Atabekyan R.R.,Esayan R.K.,Gevorkyan V.A.,Vinetskii V.L. Accumulation kinetics of F and F⁺ centres in electron-irradiation corundum. - Cryst.Latt.Def.Amorf.Mat.,1987,v.14, №2, pp.155-163.
 11. Геворкян В.А.,Езоян Р.К. Дефекты и центры окраски наведенные в корунде и рубине высокоэнергетичными электронами. IV. Световое обесцвечивание центров окраски корунда, выращенного различными методами.-Препринт,ЕФМ-833(60)-85, Ереван,1985,с.19.
 12. Atabekyan R.R.,Vinetskii V.L.,Gevorkyan V.A.,Godenko L.P.,Esayan R.K., Photoconductivity of corundum irradiated with high energy electrons at excitation of F and F⁺ centres.-Phys.Stat.Sol.(b),1985,v.132,pp.635-638.
 13. Атабекия П.Р.,Винецкий В.Л.,Геворкян В.А.,Езоян Р.К.,Ерицян Г.Н. Оптический эффект малых доз в радиационной физике твердого тела.-Письма в ЖТФ,1983,т.9,в.23,с.1446-1451.
 14. Атабекия П.Р.,Винецкий В.Л.,Геворкян В.А.,Езоян Р.К.,Ерицян Г.Н. Способ обработки монокристаллов корунда.-Авт.свид. III515.Официальный блл.Открытия.Изобретения,1985,№16,с. 203.
 15. Арутюнян В.В.,Геворкян В.А.,Езоян Р.К.,Ерицян Г.Н. Исследование природы центров окраски α -Al₂O₃ фотостимулированными процессами и эффектом "радиационной памяти".-Тезисы докладов седьмой Всесоюзной конференции по радиа-

- ционной физике и химии неорганических материалов. Рига, 1989,с.403-404.
16. Атабекия П.Р.,Геворкян В.А.,Езоян Р.К.,Ерицян Г.Н.,Саркисов В.Х. Дефекты и центры окраски наводимые в корунде и рубине быстрыми электронами. I. Оптические свойства рубина, облученного быстрыми электронами и γ -квантами. -Препринт ЕФМ-742(57)-84,Ереван,1984,с.14.
 17. Арутюнян В.В.,Бабаян А.К.,Геворкян В.А.,Мартirosян У.М., Генерация V центров в корунде при облучении высокоэнергетичными электронами.-ФТТ,1995,т.3,№4,с.953-959.
 18. Арутюнян В.В.,Геворкян В.А.,Езоян Р.К.,Ерицян Г.Н.,Саркисов В.Х. Обнаружение полосы поглощения 285 нм при облучении корунда быстрыми электронами.-Изв.АН.Арм.ССР,Физика,1989,т.24,в.3,с.132-135.
 19. Арутюнян В.В.,Геворкян В.А.,Григорян Г.Н. Влияние электронного облучения на зонную структуру монокристалла α -Al₂O₃.-Препринт ЕФМ-1183(60)-89,Ереван,1989,с.20.
 20. Harutunyan V.V.,Gevorkyan V.A.,Grigoryan N.E. The study of corundum fundamental absorption region.-Nucl.Instr.Meth. Phys.Res.,1991,v.A 308,pp.197-199.
 21. 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,№2,с.443-447.
 22. Арутюнян В.В.,Геворкян В.А.,Григорян Н.Е. Влияние облучения на мезонные переходы в монокристаллах корунда.-Препринт ЕФМ,Ереван,1991,с.16.
 23. Harutunyan V.V.,Gevorkyan V.A.,Eritsyan G.N. Parameters of interband transitions corundum crystals.-Phys.Stat.Sol.(b), 1994,v.183,pp.k23-k27.
 24. 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,№12,с.108-111.
 25. Арутюнян В.В.,Бабаян А.К.,Геворкян В.А.,Махов В.Н. Влияние облучения на дефектообразование поверхности монокристаллов α -Al₂O₃. ПОВЕРХНОСТЬ,Физика,химия,механика.,1994,№10-11,с. 128-133.

26. Арутюнян В.В., Бабалян А.К., Геворкян В.А., Григорян Н.Е., Мартиросян У.М. Радиационные процессы на поверхности $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в рентгеновской области спектра. ПОВЕРХНОСТЬ, Физика, химия, механика., 1995, VII, с. 41-45.
27. 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. Stat. Sol. (b), 1995, XI, pp. k9-k11.
28. Harutunyan V.V., Gevorkyan V.A., Babayan A.K., Yeritsian G.N., Machov V.N., Mikhailin V.V. Luminescence excitation in $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ single crystals using synchrotron radiation. - I-st European conference on synchrotron radiation in materials science. - Conference handbook, England, 1994, p. 7. 20.
29. Арутюнян В.В., Бабалян А.К., Бельский А.Н., Геворкян В.А., Махов В.Н., Мартиросян У.М. Люминесценция центров окраски в монокристаллах $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. - ЖПС, 1995, т. 62, № 8, с. 218-221.
30. Атабекян Р.Р., Геворкян В.А., Езоян Р.К., Ерицян Г.Н., Саркисов В.Х. Дефекты и центры окраски, наведенные в корунде и рубине высокоэнергетичными электронами. II. О центрах окраски рубина, облученного электронами малых доз. - Препринт ЕФИ-770(85)-84, Ереван, 1984, с. 16.
31. Атабекян Р.Р., Геворкян В.А., Езоян Р.К. Метод увеличения энергии генерации рубинового лазера, облученного высокоэнергетичными электронами. - В кн.: Новые экспериментальные методы в радиационной физике полупроводников. Изд. Ереван, 1985, с. 14.
32. Геворкян В.А., Езоян Р.К., Ерицян Г.Н., Саркисов В.Х. Улучшение генерационных свойств рубинового лазера под действием высокоэнергетичных электронов. - ЖПС, 1987, т. 47, № 5, с. 862. (Статья депонирована в ВИНТИ, рег. № 114-В87).
33. Атабекян Р.Р., Геворкян В.А., Езоян Р.К., Ерицян Г.Н., Саркисов В.Х. Передача энергии возбуждения ионами Cr^{3+} от радиационных центров окраски в рубине. - Изв. АН Арм. ССР, физика, 1985, т. 20, в. 2, с. 110-113.
34. Атабекян Р.Р., Геворкян В.А., Езоян Р.К., Ерицян Г.Н., Саркисов В.Х. Способ обработки кристаллов рубина. - Официальный бюл. Открытия. Изобретения. Москва, 1988, № 34, с. 265-266.
35. Атабекян Р.Р., Восканян Р.Е., Геворкян В.А., Ерицян Г.Н., Езоян Р.К., Саркисов В.Х., Саканян А.Г. Влияние γ -облучения

на оптические характеристики рубина и рубиновые ОКГ с примесями Ga и Ti. - Изв. АН Арм. ССР, физика, 1982, т. 17, в. 2, с. 91-96.

Цитируемая литература

1. Arnold W.G., Compton W.D. Threshold energy for lattice displacement in $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. - Phys. Rev. Lett., 1960, v. 4, № 2, pp. 66-68.
2. Compton W.D., Arnold W.G. Radiation effects in fused silica and $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. - Disc. Farad. Soc., 1961, v. 31, № 5, pp. 130-139.
3. Mitchel E.W.J., Rigden J.D., Townsend P.D. The anisotropy of optical absorption. - Phil. Mag., 1960, v. 5, № 58, pp. 1015-1037.
4. Бессонова Т.С., Станиславский М.П., Туманов В.И., Хаимов-Мальков В.Я. - Оптический эффекты в рубине и лейкосапфире при электронном облучении. - Изв. АН СССР, серия физическая, 1974, т. 38, № 6, с. 1201-1204.
5. Бессонова Т.С., Станиславский М.П., Туманов В.И., Хаимов-Мальков В.Я. - Наведенное поглощение и термолюминесценция лейко сапфира и рубина после электронного облучения. - Опт. и спектр., 1974, т. 37, в. 4, с. 701-705.
6. Бессонова Т.С., Радиационные процессы в кристаллах корунда. - В кн. Проблемы ядерной физики и космических лучей. Респуб. межвед. науч. тех. Сб. Харьков, в. 16, с. 3-16.
7. Levy P.W. Color centers and radiation-induced defects in Al_2O_3 . - Phys. Rev., 1961, v. 123, № 4, pp. 1226-1233.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ատենայտուությունը նվիրված է շափյուղի ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) և սուտակի ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}^{+3}$) միարյուրեղներում 2 + 50 ՄԷՎ էլեկտրոններով, γ -բխանուցներով, ռենտգենյան և սինքրոտրոնային ճառագայթներով (ՄՃ) առաջա-
ած մի շարք ֆիզիկական պրոցեսների և երևույթների հետազոտմանը:

Աշխատանքում ստացվել են հետևյալ արդյունքները:

Նկատվել է, որ արագ էլեկտրոններով և կոշտ էլեկտրամագնիսա-
կան բխանուցներով շափյուղի բյուրեղը ճառագայթահարելիս նրանում
առաջանում է «փոքր դոզայի» էֆֆեկտը, իսկ երբ արագ էլեկտրոնների
դոզան (սկսած 10^{16} էլ/սմ²) մեծանում է, ապա առաջանում են մույնպիսի
կեսային E , F^+ և բարդ կառուցվածք ունեցող գունավորման կենտրոններ
(Q_4), ինչպես նաև յուրոններով ճառագայթահարման դեպքում: Փորձի և
տեսության միջոցներով հիմնավորվել է E և F^+ Q_4 -ի կուտակման կինետի-
կան և այդ Q_4 -ի փոխակերպումը միմյանց՝ համապատասխանաբեր
զրգռելով այդ Q_4 -ի կլանման երանգանիների շերտերով:

F^+ կենտրոնի 4,86 էՎ կլանման շերտին համապատասխան լույսի
բխանուցներով զրգռելիս փորձնականորեն ստացվել է էլեկտրահաղորդա-
կանություն, այն հիմնավորվել է տեսության միջոցով:

Շափյուղի միարյուրեղն արագ մասնիկներով ճառագայթահարելիս
կլանման երանգանիներում դիտվել են 6,3; 7 և 8 էՎ շերտեր, որոնք վերա-
գրվել են F^+ կենտրոնին:

5-30 էՎ երանգանու տիրույթում մանրամասն ուսումնասիրվել են շա-
փյուղի անդրադարձման երանգանիները՝ օգտագործելով ՍՃ և անդրա-
դարձման երևցանիները հաշվարկվել են ճառագայթահարված և չճառա-
գայթահարված բյուրեղների n , k և ϵ օպտիկական հաստատունները:
Վերոհիշյալ էներգիայի զրգռման տիրույթում ուսումնասիրվել են «մաքուր»
և ճառագայթահարված շափյուղի լյումինեսցենցիան և ֆոտոնային բազմա-
պատկման երևույթը:

Մանրամասնորեն ուսումնասիրվել են բարդ Q_4 -ի էլեկտրոն-ֆոնոն
փոխազդեցությունը, V կենտրոնների (A_1 -ի բախուր տեղերը) կուտակման
կինետիկան և այդ կենտրոնների մոդելավորման միջոցով տրվել է կուտակ-
ման և բևեռացման հիմնարար բացատրությունները:

Հետազոտվել են սուտակի միարյուրեղի γ -բխանուցներով և 50 ՄԷՎ
էլեկտրոններով ճառագայթահարման հետևանքով առաջացված մի շարք
երևույթները և պրոցեսները՝ մասնավորապես, զրգռման էլեկտրոնային
էներգիայի փոխանցումը Q_4 -ից Cr^{+3} -ին: Այդ երևույթի շնորհիվ դիտվել է
սուտակի բխանույին զեներատորի ճառագայթման ելքի մեծացումը և
չեմային էներգիայի փոքրացումը: