

УДК 535.372

В.М. ЛИСИЦЫН

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Исследования в области радиационной физики твердого тела являются традиционными для ТПУ. Появление импульсных сильноточных ускорителей привело в последние двадцать пять лет к значительному повышению объема и уровня проводимых в университете исследований стимулированных радиацией процессов в материалах, разработке новых радиационных технологий модификации свойств материалов. В статье представлена информация о некоторых направлениях исследований в области радиационной физики твердого тела и радиационных технологий, выполняемых в ТПУ в настоящее время.

Введение

Радиационная физика твердого тела является одним из основных научных направлений Томского политехнического университета. Основоположником работ в области радиационной физики диэлектриков в ТПУ является профессор А.А.Воробьев. Одним из первых А.А.Воробьев осознал, что человечество обречено жить в условиях активного использования радиации для обеспечения высокого уровня жизни. Стало понятным, что использование радиации потребует создания радиационно-стойких и радиационно-чувствительных материалов (радиационное материаловедение), приведет к использованию излучений в контроле структуры материалов, качества изделий, появлению технологий радиационной обработки материалов и приборов с целью достижения нужных параметров. С присущим А.А.Воробьеву размахом и темпами во второй половине 50-х годов в Томском политехническом начинаются фундаментальные исследования в области радиационной физики и химии твердого тела, которые продолжаются в настоящее время его учениками на кафедрах университета и в лабораториях НИИ.

Существенное влияние на развитие фундаментальных и прикладных исследований влияния воздействия радиации на вещество оказали работы акад. Г.А. Месяца по созданию импульсных сильноточных ускорителей заряженных частиц в ТПУ, затем в ИСЭ СО РАН. С появлением таких ускорителей появилась возможность прямого изучения элементарных процессов создания и преобразования дефектов, исследования новых эффектов, характерных для мощных радиационных воздействий, разработки эффективных технологий радиационной модификации свойств материалов.

К настоящему времени политехнический университет имеет уникальную материальную и интеллектуальную базу для фундаментальных исследований в области радиационного материаловедения, новых радиационных технологий. Проводимые в ТПУ исследования направлены на:

- изучение элементарных процессов, стимулируемых радиацией в материалах;
- изучение нелинейных процессов в материалах при мощных воздействиях;
- установление основных закономерностей изменения структуры и свойств материалов при радиационных воздействиях;
- разработку радиационных технологий модификации свойств материалов;
- проведение испытаний материалов, изделий на радиационную стойкость;
- разработку методов контроля качества материалов с использованием радиационных воздействий.

В настоящей статье представлена информация о выполненных в последние годы работах в ТПУ в перечисленных направлениях, составленная на основании материалов, представленных проф. Д.И.Вайсбурдом, Г.И.Ремневым, В.П.Кривобоковым, В.В.Лопатиным, М.М.Михайловым, доц. Ю.М.Анненковым, В.М.Зыковым.

1. Элементарные, стимулированные радиацией процессы в материалах

Установление природы процессов создания и преобразования дефектной структуры материалов, стимулированных радиацией новых эффектов в конденсированных средах, связи радиационно-индуцированной дефектности с изменением свойств материалов является фундаментальными задачами радиационной физики твердого тела. Создание дефекта или преобразование существовавшего является результатом совокупности элементарных процессов. Прогресс в развитии представлений о механизмах создания, преобразования дефектности был достигнут в последние 30 лет благодаря появлению техники импульсной абсорбционной спектроскопии с наносекундным, а теперь уже с фемтосекундным временным разрешением. Первый импульсный абсорбционный спектрометр с наносекундным временным разрешением в СССР был создан в ТПУ в 1975 г. под началом Ю.А.Захарова и В.М.Лисицына.

Имеющиеся в настоящее время в лабораториях каф. ЛИСТ (зав. каф. проф. В.М.Лисицын) импульсные оптические спектрометры предназначены для измерения спектрально-кинетических параметров нестационарного поглощения, люминесценции, а также диэлектрических, упругих характеристик оптических материалов после возбуждения импульсами высокоэнергетических электронных пучков, лазерного излучения или каскадного возбуждения импульсами электронов и лазерного излучения. Действующие 4 спектрометра имеют следующие обобщенные характеристики. В качестве источников возбуждения в спектрометрах используются:

- высокоэнергетический ускоритель электронов с энергией импульса до 1 Дж, энергией электронов до 450 кэВ, регулируемой длительностью импульса потока электронов от 0,5 до 20 нс;
- импульсные лазеры с энергией импульса до 0,2 Дж, длительностью импульса 20 нс, с длинами волн излучения 1064, 694, 532, 247 нм.

Измерения спектров поглощения и свечения проводятся:

- в спектральной области 200 – 1100 нм;
- в температурном диапазоне 15 – 700 К;
- в диапазоне времен 10^{-9} – 10^3 с;
- с временным разрешением до 10^{-9} с.

Проведенные с использованием техники импульсной абсорбционной спектроскопии исследования, выполненные Р.Т.Вильямсом с сотрудниками в США, К.Танимурой с сотрудниками в Японии и В.М.Лисицыным с сотрудниками, позволили выявить основные закономерности процессов создания и эволюции первичной дефектности в кристаллах щелочных и щелочно-земельных металлов. В.М.Лисицыным показано, что:

- созданные при распаде электронных возбуждений пары дефектов со временем большей частью исчезают, сохраняются стабильными, то есть существующими в секундном – часовом интервале времени, лишь незначительная доля из созданных;
- кинетика разрушения созданных импульсом радиации первичных дефектов имеет многостадийный характер;
- кинетика разрушения созданных импульсом радиации первичных дефектов различается для разных кристаллов, имеет сложную зависимость от температуры образца при облучении, зависит от плотности возбуждения;
- распад электронных возбуждений на пары дефектов имеет высокий выход не только в щелочногалоидных кристаллах, но и в кристаллах фторидов Mg, Ca, Sr, Ba и, возможно, в кристаллах оксидов металлов;
- первичными дефектами являются не только нейтральные F -, H -, но и заряженные α -, I -центры.

Доказательство высокой эффективности распада электронных возбуждений на пары структурных дефектов в кристаллах CaF_2 , SrF_2 , BaF_2 и, особенно, в MgF_2 , а также проведенный теоретический анализ возможных механизмов разделения коррелированных пар дефектов привели автора статьи к выводу о том, что пространственное разделение компонентов первичных пар дефектов, образующихся при распаде электронных возбуждений, происходит посредством термоактивированного движения подвижного компонента пары.

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования позволили составить общую картину эволюции первичной дефектности, которая заключается в следующем [1 – 3]: накопление пары стабильных радиационных дефектов есть результат последовательных во времени независимых событий:

- образования первичной пары коррелированных дефектов,
- пространственного разделения компонентов пары,
- преобразования компонентов пары в устойчивые в условиях эксперимента.

Вероятность P наступления события «накоплена одна пара дефектов» составляет

$$P = P_o P_p P_n,$$

где P_o , P_p , P_n – условные вероятности независимых событий образования, разделения и преобразования компонентов первичной пары. Такой подход позволяет построить достаточно полное связанное представление о сложной совокупности процессов создания и эволюции первичной дефектности, дает возможность математического описания и анализа этой совокупности, позволяет провести границу между процессами создания и эволюции первичных дефектов. Под первичной парой радиационных дефектов понимается генетически связанная френкелевская пара, компоненты которой различимы и проявляются экспериментально совокупностью свойств, характерных для стабильных состояний этих дефектов.

Образование первичной пары есть совокупность следующих процессов:

- релаксации зонных электрона и дырки (или экситона) до энергетического состояния экситона, способного распадаться на пару дефектов (преддиссационное состояние);
- перехода из преддиссационного состояния в состояние, представляющее собою уже структурный дефект, но еще с неразличимыми экспериментально компонентами пары (преддефектное состояние);
- возникновения из преддефектного состояния первичной пары в результате перескока подвижного компонента в удаленный от неподвижного дефекта узел решетки за счет энергии, выделяющейся в месте рождения пары при релаксации электронного возбуждения.

Образованные пары генетически связанных первичных дефектов, взаимно распределенных в узкой области кристалла (ФНР), являются коррелированными и находятся в поле взаимного притяжения, которое является следствием взаимодействия полей деформации вокруг дефектов. Со временем коррелированные, генетически связанные компоненты пары Френкеля либо разделяются пространственно, либо аннигилируют в результате термоактивированного движения подвижного компонента пары. Разделенные пространственно компоненты пары преобразуются в устойчивые при условиях эксперимента дефекты. Проведены теоретические исследования возможного вида функций начального взаимного распределения компонентов пар (ФНР) в кристаллах. Показано, что возрастающая ветвь температурной зависимости накопления радиационных дефектов определяется параметрами потенциала взаимодействия компонентов пары и не зависит от энергии активации движения подвижного компонента [4].

Методами импульсной спектроскопии в спектрах оптического поглощения щелочногалоидных кристаллов, содержащих тяжелые ионы примеси аниона, обнаружены полосы с максимумами, сдвинутыми в длинноволновую область относительно известных для STE . Например, в спектре поглощения, наведенном импульсом электронного облучения в кристалле $KCl:I$ при 80К и измеренном через 10 нс после начала импульса, доминирующей является полоса на 1.65 эВ, в то время как в чистом кристалле KCl – полоса на 1.87 эВ, обусловленная поглощением электронного компонента STE . Полоса поглощения на 1.65 эВ спадает при 80К с характерным временем, равным 130 мкс. С таким же характерным временем спадает и наведенная полоса на 3.70 эВ, расположенная в области дырочного компонента STE . Показано, что наведенное короткоживущее поглощение обусловлено околопримесными экситонами, представляющими собою V_k -центры, расположенные рядом с примесным анионом [5].

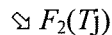
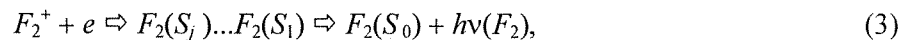
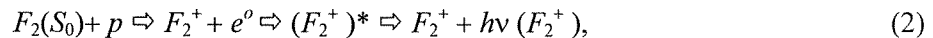
Таким образом, в щелочногалоидных кристаллах с тяжелыми анионными гомологическими примесями импульсом радиации создаются экситоны, локализованные в непосредственной близости от аниона примеси. Эффективность создания околопримесных экситонов является очень вы-

сокой. В спектре короткоживущего наведенного поглощения полосы околопримесных экситонов являются доминирующими при концентрации введенной примеси выше 0.03 мол.%. Это означает, что гомологические ионы примеси являются эффективными центрами локализации электронных возбуждений. Ионы примеси имеют тот же заряд, что и ионы основы. Поэтому причиной высокой эффективности локализации электронных возбуждений может быть только локальная деформация решетки кристалла в области примесного иона.

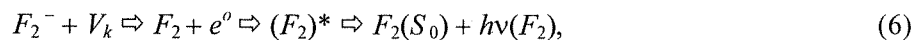
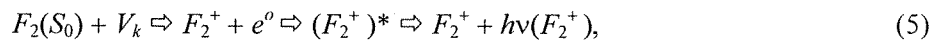
Описанные результаты свидетельствуют о том, что присутствие дефектов, электрически нейтральных по отношению к кристаллической решетке, влияет на топографию распределения наведенных радиацией электронных возбуждений в ней. Электронные возбуждения эффективно преобразуются в локализованные околодефектные двухгалоидные экситоны, которые отличаются от создающихся в идеальной решетке. Проведенные методами компьютерного моделирования исследования показали, что даже слабые искажения потенциального рельефа вокруг дефекта решетки сильно сказываются на миграции, захвате подвижных дефектов или носителей заряда.

В проблемной лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДИП) под руководством Ю.М.Анненкова при исследовании специфики радиационных процессов в ионных кристаллах при мощных воздействиях показано следующее: в щелочногалоидных кристаллах обнаружено и всесторонне изучено методами оптической спектрометрии, позитронной аннигиляции, измерениями электропроводности и диэлектрических потерь фундаментальное явление распада электронных возбуждений с рождением катионных френкелевских пар [6]. Экспериментальные результаты и машинные расчеты методом молекулярной статики позволили конкретизировать механизмы создания и стабилизации в кристаллической решетке радиационных дефектов в виде шоттковских и антишоттковских пар. Впервые для кристаллов MgO показана возможность образования анионных френкелевских дефектов при распаде околопримесных электронных возбуждений [7].

С использованием техники импульсной абсорбционной спектрометрии проф. Л.А.Лисицыной [8,9] были выполнены исследования процессов радиационного создания, разрушения и накопления F_2 центров в кристалле LiF при различных параметрах импульсного облучения. Кристалл LiF с предварительно накопленными электронными радиационными дефектами различных типов и концентраций при различных температурах в диапазоне 80...300К подвергался воздействию единичного импульса электронов (ИЭ), после чего исследовались кинетики релаксации поглощения (КРП) в максимумах полос F_1 , F_2^+ , F_2 , F_2^- центров во временном интервале 10^{-8} ... 10^4 с после окончания действия ИЭ. Сопоставление инициированных радиацией изменений концентрации F_2 -центров с изменением концентрации других центров окраски в тех же временных интервалах после окончания действия ИЭ в одном кристалле позволило определить механизмы создания и разрушения F_2 -центров в шести очевидно различающихся временных диапазонах, установить параметры, определяющие соотношение между различными механизмами преобразования исследованных центров. Проведенные исследования позволили прийти к заключению о существовании следующих реакций образования и разрушения F_2 -центров под действием ИЭ в кристаллах LiF при 300К: во временном интервале $\Delta t \leq 10^{-8}$ с:



в интервале $10^{-2} \geq \Delta t > 10^{-8}$ с:



в интервале $10^2 \geq \Delta t > 10^{-2}$ с:

$$F_1^- + \alpha \Leftrightarrow F_2(S_0), \quad (8)$$

$$F_2(S_0) + \alpha \Leftrightarrow F_3^+, \quad (9)$$

в интервале $10^5 \geq \Delta t > 10^2$ с:

$$F_2^+ + F_2^- \Leftrightarrow F_2(S_0), \quad (10)$$

где e^o – околodefектный экситон; p и V_k – зонная и автолокализованная дырки соответственно; $S_j, S_1, S_0, T_i, T_j, T_1$ – термы синглетного и триплетного состояний F_2 -центра соответственно; $H, \alpha, F_1, F_2^+, F_2, F_2^-, F_3^+$ – обозначения соответствующих центров.

Установлено, что число накопленных F_2 -центров в кристалле является функцией по крайней мере трех параметров поля импульсной радиации: интегральной поглощенной дозы облучения, пиковой мощности и частоты следования импульсов. Результат накопления F_2 -центров при равных значениях средней мощности и дозы облучения существенно различается для режимов облучения с различными пиковыми значениями мощности. Изменение типа частиц потока жесткой радиации при одинаковом значении их энергии по механизму воздействия на материал эквивалентно изменению пиковой мощности излучения. Следовательно, различным должен быть результат накопления F_2 -центров при воздействии на материал потоков различных частиц при равенстве двух других параметров: величин поглощенной интегральной дозы и средней мощности излучения.

2. Нелинейные процессы в диэлектриках при мощном радиационном воздействии

В 60-х годах в технике генерации радиационных потоков произошла революция: были созданы два новых типа сверхмощных импульсных источников радиации – лазеры и сильноточные ускорители, – конкурирующие по интенсивности с ядерным взрывом. Достигнутые токи пучков ускоренных электронов возросли сразу в $10^3 - 10^4$ раз. В ТПУ проф. Д.И.Вайсбурд с сотрудниками выполнили первые в мире экспериментальные исследования процессов в диэлектриках при воздействии сильноточных электронных пучков [10 – 18], используя созданные в Томске Г.А.Месяцем и Б.М.Ковальчуком сильноточные ускорители. Они опубликовали и первые приоритетные статьи [11, 17] и первую монографию на эту тему. Возникло новое научное направление в радиационной физике твердого тела, истоки которого проанализированы в статье [10]. Все начиналось с исследования процессов в треках протонов и альфа-частиц в диэлектрических кристаллах. На первых порах были достигнуты явные успехи. По зависимостям накопления F_1 - и F_2 -центров от дозы и интенсивности пучка удалось определить радиальное распределение плотности энергии возбуждений в треке и основные времена релаксации в интервале $10^{-3} - 10^{-2}$ с. Однако попытки достигнуть более высокого временного и пространственного разрешений натолкнулись на естественные непреодолимые трудности, возникающие на пути косвенных методов. На математическом языке это означает, что задача оказалась некорректной. Невозможно «разглядеть» трек путем измерения средних концентраций дефектов. Необходимо прямо наблюдать процессы в отдельном треке.

Экспериментальной техники, позволяющей прямо наблюдать за быстрой релаксацией единичного трека, не было. Нет ее и сейчас. Ситуация изменится, когда появится возможность использовать для этих целей рентгеновские лазеры. А тогда, в 1969 г. Д.И.Вайсбурд предложил промоделировать ситуацию, возникающую в отдельном треке тяжелой заряженной частицы в диэлектрике, с помощью натурального эксперимента следующим образом. Накачать в макроскопический, достаточно большой объем диэлектрика высокую плотность электронных возбуждений: электронов, дырок, экситонов, плазмонов – и проследить за их релаксацией с высоким временным разрешением с помощью доступной в то время аппаратуры. Кроме треков высокие плотности электронов и дырок генерируются внутри диэлектрика в следующих ситуациях: 1) в каналах электрического пробоя; 2) путем инжекции электронов и дырок через барьеры типа $p - n$ -переходов и контактов металл – диэлектрик; 3) в результате двухфотонной ионизации среды импульсным пучком интенсивного лазерного излучения УФ-диапазона; 4) электронным пучком высокой плотности. Последний особенно перспективен. Он позволяет однородно накачивать объем диэлектрика элек-

тронными возбуждениями с энергетической эффективностью, близкой к 1, недоступной всем остальным способам возбуждения.

Поначалу эксперименты велись с использованием лазера. Подходящих электронных ускорителей поблизости не было. Когда Г.А. Месяц с сотрудниками в ТПУ создали первые сильноточные электронные ускорители со взрывоэмиссионными катодами, вся программа была переориентирована на их использование в качестве источников возбуждения диэлектриков. Особенно удачным оказался ускоритель конструкции Б.М. Ковальчука. По его чертежам образец такого ускорителя был изготовлен в лаборатории нелинейной физики ТПУ и назван ГИН-600, так как его основой является генератор импульсных напряжений (ГИН) на 600 кВ, собранный по схеме Аркадьева–Маркса. Первые эксперименты по наблюдению неравновесных процессов в диэлектриках, индуцированных электронными пучками высокой плотности тока и наносекундной длительности, выполнены в ТПУ. Они начаты в 1970 г. и продолжаются по сей день.

Измерение оптических, электрических, акустических и механических свойств диэлектриков, возбужденных мощными импульсами облучения электронными пучками высокой плотности и наносекундной длительности, принесло новую информацию. Были обнаружены новые оптические, электрические, акустические, и механические явления, которые можно разделить на две группы.

Первая группа явлений связана с тем, что мощный и короткий импульс ионизирующего излучения создает в диэлектрике высокую плотность сильно неравновесных электронов и дырок, которые за время 10^{-16} – 10^{-14} с теряют способность ионизировать среду и продолжают релаксировать, генерируя фононы всех видов. Их называют ионизационно–пассивными [12]. Электроны, потерявшие способность к ударной ионизации, заселяют интервал зоны проводимости шириной $E_{\Delta} = 0,1 - 25$ эВ. Соответственно дырки, потерявшие способность к оже–ионизации, заселяют такой же широкий интервал валентных зон. Чем короче и мощнее импульс облучения, тем больше вклад этих сильно неравновесных квазичастиц во все электронные кинетические процессы, в частности, люминесценции и проводимость [12].

Д.И.Вайсбурд с сотрудниками обнаружили внутризонную электронную радиолуминесценцию (ВЗЛ), элементарными источниками которой являются прямые излучательные переходы ионизационно–пассивных электронов внутри зоны проводимости [11, 12]. Этот вид свечения диэлектриков отличается рядом экстремальных «рекордных» свойств относительно других видов люминесценции. Он имеет: а) самый широкий непрерывный спектр шириной 10 – 25 эВ, который начинается в глубокой ИК-области и заканчивается в области вакуумного УФ; б) самое короткое время релаксации $10^{-13} - 10^{-12}$ с; в) практически независимость от температуры до точки плавления и выше (расплав светит так же ярко, как и кристалл); г) независимость от статического беспорядка (собственных и примесных дефектов), оптически активные дефекты (центры окраски) косвенно влияют на выход ВЗЛ путем реабсорбции уже излученного света; д) квантовый выход порядка 10^{-3} фотонов на одну ионизационно–пассивную электронно–дырочную пару; е) энергетический выход (отношение излученной энергии к поглощенной энергии пучка электронов) в 3 – 5 раз меньше, т.е. $10^{-4} - 10^{-3}$; ж) интенсивность пропорциональна мощности дозы. Благодаря своим уникальным свойствам, ВЗЛ применяется для определения некоторых важных параметров энергетических зон как метрологический источник пикосекундных импульсов света и особенно для визуализации мощных импульсных пучков.

Продолжая исследования, Д.И.Вайсбурд с сотрудниками обнаружили новый тип фундаментальной проводимости диэлектриков, наведенной облучением, – проводимость высокоэнергетических ионизационно–пассивных электронов и дырок [13]. По своим свойствам она сильно отличается от изученных на полупроводниках видов проводимости низкоэнергетических и горячих носителей. Ее отличает: а) пикосекундная инерционность; б) слабая зависимость от статического беспорядка; в) пропорциональность мощности дозы; г) квазиметаллическая (падающая) температурная зависимость, которая никогда ранее не наблюдалась на диэлектриках. Разработанная теоретическая модель внутризонной люминесценции и проводимости ионизационно–пассивных электронов и дырок оказалась адекватной эксперименту, и это позволило авторам [4] впервые определить важнейшие характеристики таких квазичастиц: а) подвижность; б) частоту столкновений с фоно-

нами; в) эффективную энергию коротковолновых фононов, которые вносят основной вклад в рассеяние высокоэнергетических носителей; г) мощность, отдаваемую такими носителями решетке.

Вторая группа обнаруженных явлений связана с тем, что плотный электронный пучок генерирует в диэлектрике сильные и даже сверхсильные электрические и механические поля (электрические – в результате поглощения части пучка и заряжения диэлектрика, механические – в результате быстрого и неоднородного нагрева образца). Взаимодействие этих полей с электронами, дырками и дефектами (центрами окраски, трещинами, дислокациями, границами образца и др.) является основной причиной следующих обнаруженных явлений: критической взрывной электронной эмиссии, хрупкого разрушения, сильного пластического изгиба, генерации продольных и изгибных акустических волн.

Критическая (взрывная) электронная эмиссия из диэлектрика в вакуум, индуцированная инжекцией в образец электронного пучка высокой плотности тока и наносекундной длительности [14, 15]. Главная причина эмиссии – высокое электрическое поле, которое выталкивает электроны зоны проводимости из диэлектрика в вакуум. Критические поля лежат в интервале $10^5 - 10^6$ В/см. Критическая эмиссия при определенных условиях индуцирует вакуумный разряд между поверхностью диэлектрика и металлическим коллектором, а также объемный сквозной пробой диэлектрика. Детальное экспериментальное исследование этого сложного явления и компьютерное моделирование показали, что обнаруженная эмиссия диэлектриков – своеобразный аналог «взрывной» автоэмиссии из металлов, которую обнаружили и подробно исследовали Г.А.Месяц с сотрудниками в Томске (ТПУ) и Фурсей с сотрудниками в Ленинграде.

Генерация интенсивных изгибных акустических колебаний и волн [16]. В 1963–1971 гг. американские ученые обнаружили, что электронные пучки генерируют в твердых телах интенсивные продольные акустические волны, которые распространяются в виде биполярных импульсов растяжения и сжатия. В работах Д.И.Вайсбурда с сотрудниками обнаружена и исследована экспериментально (методом лазерной интерферометрии) и теоретически вторая, не менее интенсивная составляющая акустического поля – изгибные термоупругие волны, которые вносят большой вклад в кинетические процессы, взаимодействуя с трещинами и дислокациями. Одновременное измерение продольных и изгибных волн позволяет определить важнейшие динамические упругие константы и коэффициент Грюнайзена твердых материалов: монокристаллов, сплавов и, что особенно ценно, композитов [16].

Хрупкое разрушение твердых диэлектриков: монокристаллов, поликристаллов, нитевидных кристаллов и стекол [17]. При достижении некоторой критической мощности дозы, характерной для каждого материала и условий облучения, механическая устойчивость твердых тел, измеряемая дозой разрушения $D_{\text{разр}}$, падает в $10^6 - 10^9$ раз. Это связано с тем, что радикально изменяется механизм радиационного повреждения материала. При низких интенсивностях радиационных потоков основной механизм повреждения – накопление и эволюция точечных дефектов, которая приводит к появлению кластеров, дислокационных петель, пор и, в конечном счете, к потере механической прочности. При высоких интенсивностях радиационных потоков амплитуды акустических и квазистатических механических полей достигают критических значений, достаточных для движения трещин. Происходит хрупкий раскол материала. Д.И.Вайсбурд с сотрудниками разработали ряд новых экспериментальных методов и подробно исследовали это интересное и опасное явление. Основные результаты экспериментального и теоретического исследования изложены в обзорных статьях и монографии [12, 17].

Сильный пластический изгиб нитевидных кристаллов под действием наносекундного импульса облучения обнаружен в работе [18]. Очевидно, что взаимодействие механических полей, генерируемых мощным электронным облучением, с дислокациями должно приводить к пластической деформации твердого тела. Однако детальный механизм этого сложного процесса не изучен. Идеальным объектом для исследования дислокационных процессов являются нитевидные кристаллы (НК). Можно выращивать образцы, которые не содержат ни одной краевой дислокации, а только одну винтовую дислокацию роста. Обнаружено, что в результате одного импульса облучения плотным электронным пучком наносекундной длительности НК испытывает сильную пластиче-

скую деформацию – необратимо изгибается. Исследование дислокационной структуры НК до и после облучения показало, что основная причина изгиба – преимущественная генерация краевых дислокаций одного знака, под действием термоупругих механических полей, создаваемых в результате неоднородного нагрева образца пучком. Подробное исследование этого эффекта показало, что он лежит в основе так называемого эффекта «дальнодействия» радиации в твердом теле – сильным структурным изменениям далеко от зоны облучения.

Для исследования взаимодействия сильных электрических и акустических полей с электронно-дырочной плазмой и дефектами Д.И.Вайсбурд с сотрудниками разработали и создали новый тип физической аппаратуры, основанный на синхронизации трех базовых модулей: мощных импульсных источников радиации и регистрирующей аппаратуры высокого временного разрешения. Было создано несколько аппаратурных комплексов, не имеющих аналогов в мировом научном приборостроении. *Первый* «синхроджин» содержит два сильноточных малогабаритных ускорителя, синхронизованных с 1,5 нс-джиттером, и два оптических тракта субнаносекундного временного разрешения. *Второй* содержит сильноточный ускоритель и пикосекундный YAG: Nd³⁺-лазер с генератором высоких гармоник, синхронизированные с наносекундным джиттером. *Третий* содержит сильноточный ускоритель и генератор высокого напряжения, синхронизированные с наносекундным джиттером. Эта аппаратура позволила выполнить ряд принципиальных экспериментов, например, дать прямое доказательство явления внутризонной люминесценции, измерить проводимость диэлектрика при импульсном облучении в сверхсильных полях, превышающих порог электрического пробоя и др.

3. Стимулированные радиацией процессы изменения свойств материалов

Известно, что высокая концентрация накопленных дефектов приводит к изменению электронной структуры, создавая в запрещенной зоне дополнительные энергетические уровни и даже подзоны, которые могут не только окрашивать материал, но и радикально менять механизм электропереноса (например, с активационного на прыжковый по сформированной подзоне), оптические, диэлектрические и др. свойства. Если плотность воздействия высока (флюенс ионов и нейтронов $\Phi > 10^{14} \text{ см}^{-2}$, поток электронов $f > 10^{18} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), то выделяемая даже в термостойких диэлектриках энергия способна вызывать структурно-фазовые изменения. Ионные и нейтронные потоки могут также приводить к фазовым изменениям за счет стимулирования химических реакций и трансмутационных превращений [19]. Структурно-фазовая перестройка наряду с дефектообразованием ухудшают (детериорируют) свойства диэлектриков.

С целью поиска новых перспективных материалов для работы в мощных радиационных, тепловых и плазменных потоках, например в термоядерных установках, в НИИ высоких напряжений под началом проф. В.В.Лопатина был выполнен сопоставительный анализ физико-механических, химических, теплофизических и диэлектрических свойств. Анализ исследованных характеристик показал, что жестким требованиям, предъявляемым к конструкционным и рабочим диэлектрическим материалам, в наибольшей мере удовлетворяют соединения на основе Al_2O_3 , BeO , AlN , Si_3N_4 , BN , изготовленные в виде высокодисперсных поликристаллов методами порошковой металлургии, газофазным осаждением [20]. Причем замечательным качеством нитридов по сравнению с оксидами является меньшая деградация их свойств с ростом температуры (энерговыведения). Это хорошо видно по температурным зависимостям электропроводности, диэлектрических потерь и электрической прочности.

Для исследования пострадиационных изменений структуры и свойств образцы материалов облучались в специально оборудованном канале реактора НИИЯФ нейтронами реакторного спектра (Φ_p до $4 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$) и быстрыми «подкадмиевыми» нейтронами с $\epsilon > 1 \text{ эВ}$ (Φ_6 до $1,5 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$). Проведенные исследования радиационного дефектообразования в керамических материалах на основе перечисленных оксидов и нитридов показали, что облучение (e : Φ до 10^{22} см^{-2} и f до $10^{23} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; γ -кванты: экспозиционная доза до 200 Мрад; протоны: Φ до 10^{19} см^{-2} ; нейтроны: Φ_p до 10^{19} см^{-2} и Φ_6 до $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$) хотя и создает в них высокую концентрацию радиационных дефектов, которые окрашивают материал, ухудшают диэлектрические свойства [21], но не вносят и заметных измене-

ний в параметры решетки (x-гау анализ), энергию связи (ИК-спектры) и механические свойства. Наведенные дефекты отжигаются, что сопровождается восстановлением спектров поглощения и диэлектрических свойств. Составлены энергетические схемы локальных уровней [22], а в некоторых наиболее изученных материалах идентифицированы соответствующие им дефекты.

Дальнейшее увеличение Φ вызывает необратимые структурно-фазовые превращения и дегериорацию свойств. При этом обнаружены и изучены интересные явления: измельчение кристаллитов вплоть до формирования нанокристаллических фаз [23] и одновременная рекристаллизация структурных фрагментов, образование квазикристаллов с запрещенной 5-й группой симметрии [24], образование упорядоченной пористости, блистеринг (формирование гелиевых и водородных пузырьков).

Эти исследования позволили предложить для использования защитный диэлектрический экран в качестве первой стенки термоядерных установок типа Токамак [21, 25]. Предложение было реализовано на сооруженной в г. Троицке термоядерной установке ТСП, в которой $\sim 3 \text{ м}^2$ поверхности, контактирующей с плазмой, защищены экраном из нитрида бора.

В лаборатории радиационного и космического материаловедения под руководством проф. М.М.Михайлова ведутся исследования по разработке радиационно- и фотостойких отражающих покрытий для космических аппаратов, лазерных устройств и люминофоров. Объектами исследований являются такие оксиды, как ZnO , ZrO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 и шпинели Zn_2TiO_4 , MgAl_2O_4 , используемые в качестве пигментов отражающих покрытий, а также сами покрытия на основании этих пигментов и связующих K_2SiO_3 , полиметилсилоксан, акриловая смола и другие, а также реальные люминофоры $\text{ZnS} + \text{Ag}$ (синий), $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S} + \text{Eu}$ (оранжевый), $\text{CdSZnS} + \text{Cu} + \text{Al}$ (зеленый). Кроме того, модельные эксперименты по вопросам аддитивности действия различных видов излучений и синергетическим эффектам выполнены на монокристаллах и порошках KCl и KBr .

Изучено влияние типа модификатора (Al_2O_3 , SiO_2 , $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, SrNO_3) на устойчивости пигмента ZrO_2 к действию излучений. Установлено, что наибольшее стабилизирующее действие оказывают оксиды и соли, светорассеяние которых, определяемое отношением диэлектрической проницаемости пигмента и модификатора, находится в диапазоне значений $0 \div 0,13$. Для модификатора SiO_2 определено влияние кристаллической фазы SiO_2 и кристаллогидратной фазы $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и найдено оптимальное соотношение этих фаз на устойчивость к излучению пигмента ZrO_2 . Разработан способ получения модифицированного пигмента на основе ZrO_2 , включающий выбор химического состава модификатора, расчет его концентрации, технологию перемешивания и отжига.

Выполнено модифицирование порошков ZrO_2 , добавок La_2O_3 , Ho_2O_3 , Dy_2O_3 , Ho_2O_3 , Lu_2O_3 , Y_2O_3 , Sc_2O_3 и исследовано их влияние на электронную плотность, потенциал возбуждения, коэффициент поглощения и изменение спектров диффузного отражения после облучения электронами. Определено влияние режимов термообработки исходных и модифицированных диоксидом кремния порошков ZrO_2 на стабильность оптических свойств к действию ускоренных электронов и электромагнитного излучения.

Проведены исследования по изучению свойств и разработаны высокотемпературные стекло-керамические отражающие покрытия для видимой и ближней ИК-областей спектра на основе MgO и SiO_2 с добавками BaO , Al_2O_3 , ZnO и TiO_2 , стабильных к действию заряженных частиц и импульсного лазерного нагрева [26]. Исследовано изменение механических свойств, спектров диффузного отражения и поглощения покрытий при таких воздействиях.

Выполнены исследования по разработке отражающих покрытий на основе анодированного алюминия с различными добавками в электролите. Изучены закономерности их оптической деградациии при раздельном и одновременном облучении электромагнитным излучением, электронами и протонами, имитирующим действие этих излучений на трех различных орбитах космических аппаратов: геостационарной, высокоэллиптической и низкой [27]. Аналогичный комплекс исследований выполнен для плазменнопыленного отражающего покрытия MgAl_2O_3 [28].

Впервые обнаружено и исследовано влияние удельной поверхности, размеров зерен и гранул на стабильность отражательной способности и люминесценции материалов к действию ионизирующих излучений. Исследования выполнены на пигментах ZnO , ZrO_2 , TiO_2 и люминофорах

ZnS+Ag, Y₂O₂S+Eu, CdSZnS+Cu+Al. Установлены зависимости интенсивности свечения и изменений спектров диффузного отражения при облучении от размеров зерен, гранул и удельной поверхности порошков. Полученные закономерности и разработанные на этой основе порошки позволяют повысить срок службы отражающих покрытий космических аппаратов и лазерных устройств, люминофоров для кинескопов, люминесцентных ламп [29].

Разработанные в лаборатории проф. М.М.Михайлова модели деградации оптических свойств отражающих покрытий космических аппаратов, а также комплексы унифицированных моделей и программа прогнозирования [30] нашли реальное применение при прогнозировании коэффициента поглощения покрытий на фирмах аэрокосмической отрасли.

4. Разработка физических основ радиационных технологий

Модифицирование материалов методами имплантации является одним из наиболее перспективных направлений в технологии. Возможности методов существенно расширяются при использовании мощных импульсных пучков. Первые исследования по модификации материалов с использованием импульсных мощных ионных пучков (энергия ионов $eU - 10^5 - 10^6$ эВ, плотность тока $j_i - 10 - 10^3$ А/см², длительность импульса $t_n - 10^{-8} - 10^{-6}$ с) [31, 32] были начаты в Корнельском университете США, исследования по имплантации и отжигу дефектов в полупроводниках и модификации металлических материалов – в НИИ ядерной физики при ТПУ [34]. В последние годы эти работы развиваются в ряде лабораторий России, США, Японии (см. ссылки [31, 32, 33]). В России исследования по модификации материалов импульсными мощными ионными пучками в последние годы проводятся: в СФТИ при ТГУ А.Д.Коротаевым, А.Н.Тюменцевым – по металлическим материалам, А.В.Войцеховским – по короткоимпульсной имплантации полупроводников; в Московском авиационном институте и Всесоюзном институте авиационного материаловедения В.А.Шуловым, Н.А.Ночевой; в Омском государственном университете Г.И.Герингом, К.И.Полещенко; в Казанском физико-техническом институте И.Б.Хайбуллиным, Р.М.Баязитовым; в НИИЯФ при ТПУ под началом проф. Г.Е.Ремнева. Экспериментальные исследования, в основном, проводятся на установках «ТЕМП» и «МУК», разработанных под началом проф. Г.Е.Ремнева в НИИЯФ [34].

Модификация металлических материалов импульсными мощными ионными пучками (МИП) основана на чисто энергетическом воздействии (плотность мощности $P \sim 5 \cdot 10^6 - 10^8$ Вт/см²) и короткоимпульсной имплантации ($P \leq 10^5 - 5 \cdot 10^6$ Вт/см²).

В первом случае характер воздействия пучка схож с действием других концентрированных потоков энергии: импульсного лазерного излучения, наносекундных электронных пучков, в особенности низкоэнергетичных электронных пучков, импульсной плазмы, искрового воздействия. Энергия ионов, также как и сорт ионов, решающего значения не имеют. Во втором случае наряду с энергетическим воздействием контролируемой величины происходит имплантация ионов.

Исследование воздействия МИП с плотностью мощности более $5 \cdot 10^6$ Вт/см² показало, что оно сопровождается рядом процессов: нагревом, плавлением, испарением материала поверхности, образованием пароплазменного факела, возбуждением волн сжатия в мишени за счет импульса отдачи, перемешиванием компонент, протеканием химических реакций, быстрым остыванием нагретого поверхностного слоя вглубь мишени со скоростями $\sim 10^9 - 10^{10}$ К/с. При этом формируется достаточно сложный и неоднозначный топологический рисунок поверхности. Он связан с образованием отверстий, микрократеров волнообразной структуры на поверхности мишени. Поверхность, занятая кратерами, увеличивается с увеличением плотности тока. При превышении определенного значения они сливаются, и поверхность становится типа апельсиновой корки.

При уменьшении шероховатости поверхности образцов из титана и меди до 0,1 мкм достигались условия, когда при тех же режимах облучения микрократеры не образовывались. Эти факты дают основание утверждать, что образование микрократеров в значительной степени определяется дефектной структурой поверхностного слоя.

Воздействие мощного ионного пучка наносекундной длительности с плотностью мощности $P \geq 10^7 - 10^8$ Вт/см² на твердотельную мишень сопровождается образованием высокоплотной абляционной плазмы (концентрация $10^{19} - 10^{20}$ см⁻³, температура плазмы 0,2 – 2 эВ, скорость разлета

$\sim 10^6$ см/с) [35], которая может быть успешно использована для высокоскоростного осаждения тонких пленок. Пороговая плотность мощности $P_{\text{пор}}$, при которой происходит взрыв поверхностного слоя на глубину пробега ионов, определяется теплофизическими характеристиками мишени, скоростью поглощения энергии.

Для определения углового разлета абляционной плазмы в пространстве дрейфа была проведена серия экспериментов с использованием энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа [35]. Общими чертами угловых распределений частиц при распылении мощным ионным пучком является преимущественный вылет частиц по нормали к поверхности мишени и независимость угловых распределений от угла падения ионов на мишень. Распыляемый поток частиц характеризуется узконаправленным пиковым распределением, описываемым функцией $\exp(-n|\theta|)$ с $3 < n < 4,3$ (угол θ относительно нормали к мишени). Угловое распределение существенно отличается от косинусоидального, характерного для обычного распыления за счет упругих столкновений или для обычного термического испарения.

Воздействие МИП с плотностью мощности, которая еще не приводит к расплаву поверхностного слоя, но может его нагревать кратковременно до высоких температур, приводит к самоотжигу радиационных дефектов. Исследования, проведенные на ускорителях «МУК» в условиях такого термоциклирования и на ЭСГ-2,5 при сопоставимых параметрах по энергии ионов, дозе [36], показали, что уже при числе импульсов 2000, дозе $2 \cdot 10^{16}$ см⁻² дислокационная структура сталей возвращается к исходному состоянию в отличие от непрерывной имплантации при тех же дозах.

Импульсно-пучковые технологии обработки материалов отличаются низкими энергозатратами ($\sim 0,1$ кВт·ч/м²), экологической чистотой, высокой производительностью (более 1 м² обрабатываемой поверхности за час), отсутствием необходимости предварительной специальной очистки поверхности деталей, неизменностью геометрических размеров в пределах до 1 мкм модифицируемых изделий. Параметры разработанных источников, которые могут использоваться для этих целей [34]: энергия ионов 100 – 300 кэВ, плотность тока ионов 1 – 200 А/см², длительность импульса тока 10 – 100 нс.

Первые исследования по воздействию МИП на металлические материалы показали, что при определенных параметрах пучка наблюдается улучшение рабочих характеристик инструмента [33]. В настоящее время два ускорителя «ТЕМП» эксплуатируются в производственных условиях [34] для упрочнения твердосплавного инструмента, используемого для обточки колесных пар железнодорожного транспорта. В табл. 1 приведены результаты испытаний отдельных видов режущего инструмента.

Таблица 1

Материал инструмента	Обрабатываемый материал	Коэффициент увеличения износостойкости
T5K10	Сталь 45	3
T5K10	Сталь 40X	2,7
T5K10	Сталь 58ПП	3,2
T14K8	Сталь 2	2,2
T14K6	Сталь 2	2,5

МИП могут успешно использоваться для очистки как металлических, так и керамических изделий от различного рода загрязнений. Ниже (табл. 2) приведены данные для очистки лопаток компрессора газотурбинного двигателя, где данная операция является финишной (по результатам совместных исследований с сотрудниками МАИ и ВИАМ г.Москва) [33].

Таблица 2

Изделие	Положительный результат
Лопатки компрессора газотурбинного двигателя из титановых сплавов VT18У, VT9, VT25У, VT8М	Удаление окисленных слоев толщиной до 0,5 мкм за одно срабатывание ускорителя Снижение шероховатости с 0,2 – 0,25 до 0,1 – 0,06 мкм Повышение служебных характеристик: усталостной прочности, сопротивления пылевой эрозии, солевой коррозии вплоть до уровня исходных

Обработка МИП может использоваться и как промежуточная технологическая операция перед нанесением различного рода покрытий. Дополнительное положительное свойство, наблюдаемое при такой обработке, – увеличение адгезии к покрытиям. Эти данные подтверждены использованием МИП для предварительной обработки твердосплавного инструмента перед нанесением износостойких покрытий из TiN.

МИП может быть использован для сверхбыстрого ($\sim 0,1 - 1$ см/с в импульсе) осаждения одно- и многокомпонентных пленок из различных материалов на подложки и готовые изделия [37]. Метод основан на использовании абляционной плазмы, генерируемой при воздействии МИП на мишень. Принципиальные особенности аналогичны тем, которые наблюдаются при использовании импульсных лазеров.

Преимущества этого метода в сравнении с обычными методами следующие:

- сохранение в пленке стехиометрического состава многокомпонентных мишеней;
- относительно высокая температура абляционной плазмы (~ 1 эВ), которая способствует получению пленок высокого качества, вместе с тем практически не нагревая подложку;
- снижение загрязнения в пленке из атмосферы вакуумного объема, при этом могут быть также снижены требования к величине давления в рабочей камере на 2 – 3 порядка в сравнении с обычными методами осаждения.

Метод был использован для получения нанокристаллических пленок тугоплавких металлов (W, Ta, Mo, Nb) и алмазоподобных углеродных пленок при низкой температуре подложки. Углеродные пленки состояли из аморфного алмазоподобного углерода ($\sim 15\%$) и нанокристаллов (25 – 125 нм) алмазов ($\sim 10\%$). Удельное сопротивление пленок $10^2 - 10^8$ Ом/см. Таким же образом были получены пленки нитрида бора с кубической фазой ($\sim 30\%$).

В проблемной лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДИП) под руководством Ю.М.Анненкова на протяжении многих лет проводятся работы по созданию радиационных технологий синтеза и модифицирования материалов с уникальными свойствами. В качестве источников радиации использовались непрерывные и импульсные пучки заряженных частиц, обеспечивающие изменение мощности поглощенной дозы от 10 до 10^{12} Гр/с.

В области радиационной физико-химии и технологии полимеров получены следующие результаты.

Для широкого класса карбоцепных и гетероцепных полимеров создана энергетическая теория радиационной стойкости материалов, позволяющая по величине энергии мономерного звена прогнозировать стойкость полимеров.

Разработаны радиационные технологии получения органических полупроводников, полиамидной изоляции с улучшенными электрическими свойствами, экспрессной вулканизации резин для кабельного производства. Внедрение данных результатов в промышленность позволяет существенно увеличить производительность труда. Кроме того, модифицирование материалов мощными электронными потоками повышает их эксплуатационные свойства.

Исследования специфики стимулированных радиацией процессов в ионных кристаллах при мощных воздействиях привели к обнаружению следующих полезных для использования в технологии эффектов:

1. Облучение ионных кристаллов мощными электронными пучками стимулирует диффузию точечных дефектов за счет генерации акустических волн. Акусто-диффузионные явления в кристаллах могут найти широкое применение при создании новых критических технологий.

2. В ионных структурах при интенсивном облучении обнаружено явление высокотемпературного ускорения массопереноса [38].

3. Установлен и исследован переход диэлектрик – полупроводник под действием ионных пучков. Явление наблюдается в полимерах и широком классе ионных структур, включая кристаллы, керамику, стекла. Резистивный эффект, стимулированный ионным облучением, имеет широкие перспективы использования при получении органических полупроводников, резисторов для тонкопленочной микроэлектроники и других устройств.

Результаты научных исследований, сформулированные выше, послужили основанием для создания нового научного направления – высокоэнергетические керамические технологии. Под высокоэнергетическими воздействиями прежде всего понимаются мощные потоки радиации, позволяющие вести технологический процесс при высоких температурах. Одним из главных результатов, полученных на первом этапе исследований в этом направлении, явилось открытие явления радиационной гомогенизации керамических структур, заключающееся в растворении паразитных фаз. Использование этого эффекта позволило получить керамические высокотемпературные сверхпроводники с рекордным значением критических токов.

В конце восьмидесятых годов из ПНИИ ЭДИП выделилась лаборатория радиационного материаловедения, которую возглавил А.П.Суржиков. Отличительная особенность работ, проводимых этим коллективом, состояла в изучении радиационно-термических процессов диффузии, спекания и синтеза ферритовых структур, а также в исследовании радиационно-стимулированной диффузии в ЦГК. В лаборатории радиационного материаловедения получен ряд важных и интересных результатов, из которых особо следует выделить следующие [39]:

1. Для кристаллов КВг установлен эффект высокотемпературной радиационно-стимулированной диффузии примесей Al и Mg под действием сильноточных электронных пучков.
2. На примере ферритов получила дальнейшее развитие идея радиационной гомогенизации керамики.
3. Создана оригинальная методика разделения объемной и зернограничной диффузии кислорода в ферритах. С помощью этой методики показано, что под электронным пучком в ферритах ускоряется как объемная, так и зернограничная диффузия.
4. Разработаны пилотные технологии ускоренного спекания и синтеза ферритов в электронных пучках.

В лаборатории ЭДИП по направлению «высокоэнергетические керамические технологии» под руководством Ю.М.Анненкова в последние годы разрабатываются физические основы радиационных технологий на примере создания высокопрочной корундо-циркониевой керамики [40]. Техническая керамика с ультравысокими свойствами должна обладать мелкозернистой, беспористой и гомогенной структурой. Для реализации этих требований предложена новая технология, заключающаяся в спекании или модифицировании керамики в мощных электронных пучках. При отработке технологического процесса установлены следующие принципиально важные эффекты.

Температура спекания оксидной керамики при воздействии снижается на $(200 - 250)^\circ\text{C}$, при этом резко тормозится процесс рекристаллизации. Данные результаты открывают широкие перспективы получения мелкокристаллических структур. Монопольным преимуществом радиационной технологии является растворение паразитных фаз, включая поры.

По радиационной технологии получена корундо-циркониевая керамика с механическими свойствами на уровне мировых достижений. В частности, в данном случае трещиностойкость образцов достигала $21 \text{ МПа}/\text{м}^{0,5}$. Производственные испытания привели к заключению, что изделия из радиационно-модифицированной корундо-циркониевой керамики имеют более высокие технико-экономические свойства, чем инструмент из твердых сплавов.

Для объяснения природы радиационного спекания и модифицирования керамики предложен поверхностно-рекомбинационный механизм, суть которого состоит в следующем. Внутренние и внешние поверхности гетерогенных структур (керамика) ввиду высокой дефектности, являются мощными стоками электронных возбуждений. В связи с этим межзеренные области и границы фаз характеризуются повышенным, по сравнению с объемом, темпом безызлучательной рекомбинации, что приводит к возникновению локальных градиентов температур, напряжений и дефектов.

Этот процесс интенсифицирует термодиффузионный и концентрационный массоперенос на границах раздела фаз и зерен, обеспечивая гомогенизацию структуры и протекание других твердофазных реакций. На основе предложенного механизма разработана теория радиационного спекания и модифицирования керамики, которая удовлетворительно объясняет на количественном уровне эффекты, описанные выше [41]. Идеология объемно-неоднородной диссипации энергии поглощенной энергии радиации в гетерогенных структурах оказалась перспективной как в науч-

ном, так и в прикладном плане и может с успехом использоваться при создании высококачественных керамических материалов различного функционального назначения.

Проведенными под руководством проф. В.В.Лопатина исследованиями электропроводности поверхности диэлектриков было обнаружено ее изменение при подготовке керамических образцов для просвечивающей электронной микроскопии методом ионного распыления. Это послужило толчком для исследований ионной модификации свойств. Было показано, что ионная обработка при $\Phi = 10^{14} \div 10^{17} \text{ см}^{-2}$ уменьшала поверхностное сопротивление ρ_s с $10^{16} \text{ Ом}/\square$ до $10^{10} - 10^6 \text{ Ом}/\square$. Были выбраны оптимальные режимы облучения и виды ионов для разных термостойких диэлектриков (оксидная и нитридная керамика, стекла, монокристаллы): частотно-импульсный режим, энергия ионов $\epsilon \approx 100 \text{ кэВ}$, $j_{\text{имп.}} = 10^{-3} - 10^{-2} \text{ А}/\text{см}^2$, $j_{\text{ср.}} = (1 \div 10) \times 10^{-5} \text{ А}/\text{см}^2$, легкие ионы Li, C, N, Al.

Сформированное ионным воздействием новое состояние является неравновесным, его проводимость релаксирует при нагреве и увеличивается даже при комнатной температуре. Дальнейшее снижение поверхностного сопротивления ρ_s до величины $10^3 \text{ Ом}/\square$ и его стабилизация (малый температурный коэффициент сопротивления $\text{TK}\rho_s = 10^{-3} \div 10^{-4} \text{ 1}/\text{град}$) обеспечивает постимплантационный отжиг при температуре порядка $(0,6T_{\text{пл}})$ в неокислительной среде при пониженных давлениях.

Причинами гигантского увеличения электропроводности, сопровождаемого изменением люминесцентных, фоточувствительности и других оптических свойств, являются:

1. Рост вклада прыжковой электропроводности за счет высокой концентрации радиационных дефектов, их трансформации при отжиге в термостабильные анионные комплексы и формирование в энергетической щели мощной донорной подзоны [42].

2. Структурно-фазовые превращения в модифицированных диэлектриках, выражающиеся в образовании новых фаз, выделении и сегрегации элементарных составляющих фаз (например, образование вкраплений Al в Al_2O_3 и AlN) и формировании нанокристаллических материалов за счет измельчения структурных фрагментов.

На основе этих результатов в настоящее время разработана технология [43] и создается пилотная установка для мелкосерийного производства мощных высокоомных резисторов и электрических нагревателей. Установка содержит вакуумную камеру, в которой одновременно в автоматическом режиме будет осуществлено 5 операций. В отличие от существующих предложенная технология экологически чистая.

Трудности при разработке новых технологий связаны прежде всего с недостаточным знанием фундаментальных вопросов диссипации энергии мощных импульсных потоков излучения в веществе, включающих взаимосвязанные процессы генерации и эволюции тепловых и термомеханических полей, а также фазовых переходов и эрозии поверхности. Они характеризуются сверхвысокими скоростями протекания, сложной кинетикой, и их крайне трудно изучить экспериментальным путем. Поэтому создание расчетных моделей объективно необходимо для правильных представлений о закономерностях диссипации энергии излучения в твердом теле.

В связи с этим в НИИ ядерной физики под началом проф. В.П. Кривобокова были развернуты работы по созданию комплексных математических моделей указанных процессов. Результатом анализа разработанных моделей в сочетании с полученными экспериментальными результатами позволили составить следующее представление о совокупности процессов в материалах при возбуждении сильноточными пучками.

В отличие от стационарного облучения пучки нано- и микросекундной длительности производят разогрев приповерхностной области мишени с очень высокими скоростями (до $10^{10} - 10^{11} \text{ К}/\text{с}$), что влечет за собой образование неравновесных полей температур и мощных волн термомеханических напряжений.

В общем случае диссипация энергии импульсных пучков заряженных частиц в среде описывается весьма сложной для решения системой уравнений сплошной среды совместно с уравнениями состояния вещества. Однако при невысоких мощностях ввода энергии некоторыми связями термодинамических параметров генерируемых в веществе процессов можно пренебречь из-за их незначительности. Поэтому существует возможность упростить систему расчетов без заметных по-

терь точности вычислений. С этой целью в процессе создания математических моделей диссипации энергии излучения в твердом теле импульсные пучки представляется целесообразным разделить на две группы: умеренной интенсивности и высокоинтенсивные.

Воздействие пучков **умеренной** интенсивности характеризуется следующими признаками: 1) генерируемые вследствие высокоскоростного разогрева волны давлений весьма слабы, связанные с ним деформации вещества не выходят за пределы упругости; 2) небольшие возмущения плотности распространяются со звуковой скоростью и выравниваются гораздо быстрее, чем температура; 3) испарение носит поверхностный характер. Эти особенности позволяют упростить задачу математического моделирования процессов диссипации энергии такого пучка.

Поскольку термомеханические процессы слабо влияют на эволюцию температурных полей, задача расчета поля температур и определения фазового состояния вещества может быть решена отдельно от термомеханической в постановке задачи Стефана. Термомеханические процессы могут быть описаны в рамках теории упругости совместным решением уравнений теплопроводности и термоупругости.

Испарение при облучении пучками умеренной интенсивности имеет ярко выраженный поверхностный характер, с четкой границей между конденсированной и паровой фазами. Пары почти не оказывают влияния на конденсированную фазу. В этом случае испарение может быть описано с использованием моделей изотермического скачка или поверхностного Кнудсеновского слоя. Для ионного облучения эти модели дают близкие результаты, однако последняя лучше описывает динамику процесса и позволяет учесть также активационный механизм испарения.

С увеличением интенсивности излучения и при переходе в так называемую **высокоинтенсивную** область в веществе: а) возникают пластические деформации; б) плотность в конденсированной фазе заметно меняется; в) испарение приобретает ярко выраженный объемный характер. Следовательно, тепловые, термомеханические и эрозионные процессы необходимо рассматривать в совокупности в рамках теории движения сплошной среды.

На основе критического анализа существующих методов решения уравнений сплошной среды авторами был разработан специальный метод. Решение уравнений осуществлялось методом «крупных частиц» по схеме расщепления с некоторыми существенными модификациями, имеющими целью повысить устойчивость вычислений и не допустить присущего газодинамическим задачам лишнего физического смысла растекания конденсированного вещества. В то же время метод устойчиво работает при больших перепадах плотности среды и им можно уверенно рассчитывать испарение материала.

Разработаны критерии классификации излучения на умеренно и высокоинтенсивное, на основании которых можно сделать вывод о необходимости применения той или иной модели. В совокупности разработанные модели позволяют рассчитывать процессы диссипации энергии во всем имеющем практическую значимость диапазоне мощности нано- и микросекундных пучков заряженных частиц ($10^7 - 10^{12}$ Вт/см²).

С помощью этих моделей были получены закономерности протекания тепловых, термомеханических и эрозионных процессов в твердых телах в наносекундном режиме их облучения, а также найдены оптимальные параметры облучения в некоторых радиационных технологиях модификации поверхности материалов [44 – 46].

Другим важным аспектом воздействия мощных наносекундных пучков заряженных частиц на твердое тело является перенос атомов в приповерхностном слое твердого тела. В экспериментах по перемешиванию тонких металлических пленок наносекундными ионными и электронными пучками неоднократно фиксировался эффективный коэффициент диффузии примеси на уровне $10^{-2} - 10^{-4}$ см²/с. Это значение на несколько порядков выше коэффициента диффузии в жидких металлах, и, естественно, столь интенсивный перенос не может быть объяснен только обычной диффузией в расплавленном поверхностном слое образца. Не применимы здесь и теории радиационно-стимулированной диффузии и баллистического ионного перемешивания из-за малости флюенса ионов ($10^{13} - 10^{14}$ см⁻²).

Для объяснения этого результата, принципиально важного в изучении механизмов миграции атомов в конденсированной фазе, коллектив исследователей лаборатории 23 НИИ ядерной физики рассмотрел и математически промоделировал следующие возможные каналы переноса атомов [47 – 48]: а) диффузию атомов примеси в расплавленном поверхностном слое образца; б) термо- и бародиффузию примеси в условиях высоких градиентов полей температур и механических напряжений; в) уменьшение энергии активации диффузии в зонах разрежения плотности, обусловленных термомеханическими эффектами; г) сегрегацию примеси в движущемся фронте затвердевания; д) перемешивание пленки и подложки, находящихся в расплавленном состоянии, в гидродинамическом режиме. Было показано, что все эти процессы оказывают заметное влияние на формирование результирующего концентрационного профиля примеси. Однако задача точного количественного расчета процессов переноса атомов при облучении мощными импульсными пучками заряженных частиц с учетом всех возможных механизмов пока не решена и требует продолжения исследований.

5. Методы радиационных испытаний и исследований

В ТПУ имеется большой набор методов испытаний материалов и изделий на стойкость к действию радиации, методов исследования изменения свойств материалов полем радиации, структуры и состава материалов. Развитию испытательной и исследовательской базы и сегодня уделяется много внимания. Разрабатываются принципиально новые методы.

В лаборатории радиационных испытаний НИИ интроскопии ТПУ под руководством В.М.Зыкова ведутся работы по исследованию влияния факторов космического пространства на полупроводниковые материалы и приборы [49 – 50]. Эти исследования ведутся по следующим направлениям:

- лабораторное моделирование факторов космического пространства, включая моделирование электронной компоненты радиационных поясов Земли с учетом радиационной защиты космического аппарата;
- разработка методов и средств радиационных испытаний полупроводниковых материалов и приборов;
- разработка методов контроля радиационных изменений в процессе испытаний;
- разработка методов компьютерного моделирования деградации параметров полупроводниковых приборов в процессе испытаний.

В работе [51] рассмотрены методы лабораторного моделирования спектрально-угловых распределений электронного излучения радиационных поясов Земли в элементах бортовой аппаратуры космического аппарата на основе использования линейного ускорителя электронов и бетатрона. Методика моделирования основана на комбинации численного эксперимента (метод Монте-Карло) и физического измерения параметров поля электронного излучения в гетерогенных конвертерах. Входными данными для моделирования являются: тип орбиты, геометрия и состав материалов оболочки космического аппарата, параметры первичного пучка ускорителя электронов. Используется мишень специальной конструкции – конвертер или автоматическая система управления энергией ускоренных электронов в каждом цикле ускорения ускорителя электронов.

Задача моделирования сводится к правильному выбору и управлению энергией ускоренных электронов, выбору параметров конвертеров – рассеивателей, обеспечивающих необходимые спектрально-угловые характеристики электронов в поле облучения, а также к выбору способа получения поля излучения с необходимым поперечным размером. Размеры поля облучения достигаются или за счет рассеяния электронов в фольгах, или за счет магнитной развертки электронного пучка, выведенного из ускорителя. Поддержание условий, обеспечивающих заданные спектрально-угловые характеристики поля излучения, достигается на основе применения системы контрольно-измерительных устройств, контролирующих параметры пучка ускоренных электронов и работу ускорителя электронов.

Исходными данными для моделирования спектра электронов в элементах бортовой аппаратуры (БА) космического аппарата (КА) являются: характеристики натурной радиационной обстанов-

ки; конструктивные особенности КА, обеспечивающие его радиационную защиту; конструктивные модели элементов БА, учитывающие структуру, геометрические размеры, а также плотность и химический состав всех компонент. В процессе моделирования, исходя из типа орбиты КА, определяют характеристики натуральных полей электронного излучения и их изменение во времени. При моделировании усредненных радиационных условий эти характеристики могут быть представлены в виде математических моделей, не зависящих от времени. Далее на основании конструкторско-технологической документации строится расчетная модель элемента БА для проведения на ней расчетов методом Монте-Карло. Численным моделированием переноса излучения рассчитываются спектрально-угловые характеристики излучения и мощность дозы в элементе БА или в радиационно-чувствительном объеме этого элемента в натуральных условиях. После этого на основе экспериментально определенных характеристик электронного пучка ускорителя и их зависимости от режима его работы методом численного моделирования рассчитываются характеристики устройства формирования поля излучения (конвертера), обеспечивающие требуемое спектрально-угловое распределение электронов в облучаемом элементе БА и определяется необходимый режим работы ускорителя. В заключение проводится тестовый эксперимент для подтверждения правильности работы программы расчета, выбора параметров устройства формирования и режима работы ускорителя электронов.

Разработанные методы обеспечивают низкий фон тормозного излучения и высокую эффективность использования электронного пучка: до (2 – 3) % для линейного ускорителя ЭЛУ-4 и до 10% – для бетатрона МИБ-6э.

В работе [52] рассмотрены новые методы контроля примесных атомов и дефектов технологического и радиационного происхождения в монокристаллических примесных полупроводниках типа кремния и германия. Эти методы позволяют одновременно получить оценку ряда фотоэлектрических параметров полупроводника и основаны на измерении квазиравновесной низкотемпературной релаксации примесной или прыжковой проводимостей, индуцированных ионизирующим (в том числе оптическим) излучением. На примере монокристаллического кремния, полученного методом зонной плавки и легированного бором, экспериментально показано, что этими методами можно контролировать концентрации технологических или радиационных дефектов, обусловленных межузельным бором, и остаточную примесь фосфора после легирования кремния или после облучения его электронами с энергией 6 МэВ.

Измеряя относительное изменение квазиравновесной проводимости при её релаксации, можно на основе разработанной модели кинетики процесса выделить вклады отдельных примесей и дефектов, которые зависят от их относительных концентраций и фотоэлектрических параметров. Модель квазиравновесной прыжковой проводимости включает в себя модифицированное с учетом квазиравновесности уравнение Прайса, модифицированное с учетом рекомбинационного излучения уравнение Хейнса и Хорнбека, а также уравнение нейтральности. Метод квазиравновесной прыжковой проводимости [52] применен при температуре $T = 8 - 11$ К для определения с погрешностью 3 – 5% степени компенсации, а также концентраций межузельного бора и остаточного фосфора в кремнии, который получен методом зонной плавки и легирован бором до концентраций $(2 - 9) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а затем подвергнут облучению электронами с энергией 6 МэВ. Применительно к кремнию методы реализуются на аппаратуре, состоящей из малогабаритного гелиевого криостата погружного типа [53], транспортного гелиевого сосуда СТГ-40, а также измерительного интерфейса, управляемого ЭВМ. Известным моделям для предсказания радиационного отклика МОП-транзистора в условиях космоса по результатам ускоренных испытаний присущи ограничения, связанные с некорректностью учета внутренних электрических полей и нелинейных эффектов. Вместе с тем нелинейные эффекты часто играют существенную роль в реакции транзисторов на изменения параметров внешней среды. В работе [54] представлена модель N -канального МОП-транзистора для предсказания сдвига порогового напряжения при изменяющихся радиационных параметрах среды и электрического режима работы. Эта модель учитывает электрическое поле между затвором и центроидом объемного заряда в окисле, а также между центроидом объемного заряда и полупроводником. Для расчета эффективного напряжения на окисном слое затвора ис-

пользована известная электрическая модель МОП-транзистора. Приняты во внимание доля избежавших рекомбинации первичных дырок, степень насыщения ловушек, уменьшение захвата в сильном электрическом поле, особенности ионизирующего излучения и температура. Процесс взаимодействия разбит на малые временные интервалы, на которых значения параметров полагаются неизменными и имеющими усредненное эффективное значение. Изменение эффективных параметров происходит при переходе к очередному временному интервалу. Для каждого временного интервала сдвиги порогового напряжения из-за отжига захваченных дырок и роста поверхностных состояний получены через сумму интегралов свертки. Кроме того, эффективное время использовано для учета изменения параметров.

Расчеты, основанные на этой модели, корректно предсказывают временную зависимость сдвига порогового напряжения в МОП-транзисторах для диапазона мощности дозы (10^{-2} – 10^9) рад/с, диапазона дозы (10^4 – 10^6) рад и диапазона времени (10^{-3} – 10^8) с. Точность модели проверена сравнением с экспериментальными данными для нескольких МОП-технологий. Развита модель может быть использована для предсказания радиационной надежности КМОП интегральных схем в изменяющейся космической среде.

Проф. В.М.Лисицыным с сотрудниками показано, что спектрально-кинетические исследования люминесценции минералов, возбуждаемой импульсом радиации, значительно расширяют возможности люминесцентного метода анализа.

Для возбуждения люминесценции чаще всего используют излучение оптического диапазона (фотолюминесценцию) и рентгеновское излучение (рентгенолюминесценцию). Практика исследований люминесценции минералов использованными стационарными методами показала, что круг люминесцирующих минералов является довольно узким. Более того, внутри одного и того же минерального вида часто встречаются нелюминесцирующие образцы. Для повышения информативности метода, увеличения интенсивности свечения, спектрального разрешения исследования иногда проводят при низких температурах, что существенно усложняет проведение эксперимента.

Большинство природных минералов являются легированными диэлектриками и полупроводниками, в которых всегда есть условия для люминесценции при возбуждении. Низкая интенсивность свечения или его отсутствие при условиях наблюдения могут иметь много причин. Может быть низким излучательный канал релаксации возбуждений в матрице из-за отсутствия эффективных центров свечения, наличия центров тушения и т.д. Можно в таких минералах обнаружить свечение, если использовать мощные источники для возбуждения или повысить чувствительность регистрирующей аппаратуры. Однако это сопряжено с техническими трудностями, реализация которых возможна лишь в специализированных лабораториях. Решение задачи существенно упрощается при использовании в качестве источников возбуждения импульсных малогабаритных ускорителей мощных потоков электронов, простых по устройству и надежных в работе. Возбуждение сильноточными импульсными пучками электронов позволяет получить интенсивные вспышки люминесценции и наведенного поглощения, достаточные для регистрации простыми способами, даже в таких слабо люминесцирующих или окрашивающихся материалах, как кварц [55 – 56] и кристаллы фторидов щелочноземельных металлов [57].

Более того, использование для возбуждения материалов импульсных пучков электронов наносекундной длительности позволяет существенно повысить информативность люминесцентных методов анализа. Как показали проведенные исследования, вид спектров вспышки свечения или наведенного поглощения в кристаллах меняется со временем после возбуждения. Вид спектров свечения, его эволюция после окончания импульса возбуждения зависят от предыстории материала [5].

Таким образом, можно ожидать, что использование в качестве источников возбуждения импульсных сильноточных ускорителей электронов позволит существенно расширить использование методов люминесцентного анализа минералов: высокая мощность возбуждения позволит расширить круг изучаемых минералов, а временное разрешение эволюции спектров – информативность.

Для подтверждения сказанного были изучены спектрально-кинетические характеристики кальцитов из восьми различных месторождений. Этот минеральный вид интересен тем, что он об-

ладает изменчивыми спектральными характеристиками, отражающими устойчивые связи с геологической обстановкой образования минералов. При фотовозбуждении в спектрах люминесценции часто регистрируется только оранжево-красная полоса, приписываемая иону марганца Mn^{2+} . При азотных температурах могут проявляться и другие линии.

Были проведены исследования нестационарной люминесценции восьми образцов кальцитов из разных месторождений. Спектры были измерены при комнатной температуре в области спектра 200 – 850 нм. Кинетические кривые релаксации свечения были изучены в пределах 10^{-8} – 10^1 с.

Проведенные исследования показали, что в кальцитах можно выделить две группы спектров катодолюминесценции, которые резко различаются по временам релаксации. Импульсом возбуждения инициируется интенсивное свечение в области 350 – 600 нм, состоящее из сложного набора полос. Это свечение имеет малое характеристическое время релаксации, менее 20 нс. В спектрах стационарной фотолюминесценции и рентгенолюминесценции свечение в этой области либо отсутствует, либо имеет очень низкую интенсивность.

Характеристики исследованной быстрозатухающей люминесценции: вид спектра, короткое время затухания, независимость параметров люминесценции от предыстории исследованных образцов позволяет сделать предположение о том, что это свечение является собственным. То есть центрами свечения быстрозатухающей люминесценции являются собственные локализованные в решетке электронные возбуждения, не связанные с дефектностью решетки кристалла. Возможно, это свечение имеет экситонную природу.

Со временем оно исчезало полностью, и в спектрах всех исследованных образцов доминирующей становилась полоса с максимумом при 620 нм и полушириной 50 нм, приписываемая свечению ионов Mn^{2+} . Спектральные характеристики полосы были одинаковы для всех восьми исследованных образцов. Обнаружено, что интенсивность этого свечения в этой области спектра различна в разных образцах.

Показано, что кинетические характеристики полосы свечения при 620 нм существенно различаются для разных образцов. Установлено, что в кальцитах из Хакасии (Дарьинское, Кладбищенское, Таньсвай) время послесвечения люминесценции имеет величину около 50 мс, в кальцитах из месторождения Дальнегорское – 25 мс. Исландский шпат (Туруханск, Тунгуска) имеет самое длительное время послесвечения – около 70 мс. Имеется корреляция различия кинетических характеристик с условиями формирования соответствующих пород, т.е. с их генетическим типом.

Таким образом, метод импульсной катодолюминесценции перспективен для анализа геологических объектов, в том числе обладающих выраженными типоморфными свойствами. Достоинства метода: 1) существенное сокращение «не люминесцирующих» образцов; 2) более высокая информативность по сравнению с традиционными стандартными методами; 3) экспрессность.

Использование импульсных сильноточных пучков в качестве атомизатора открывает новые широкие перспективы для атомного спектрального анализа [58]. Известно, что при достижении плотности мощности электронного потока на поверхности металлов 10^9 Вт/см² наблюдается их испарение и формирование интенсивно излучающей эрозионной плазмы (анодного факела), являющегося основным поставщиком вещества в вакуумный диод импульсного сильноточного ускорителя электронов. В связи с этим появляется возможность использования атомных спектров поглощения (испускания) анодного факела для контроля химического состава металлов. Разработан способ получения атомных спектров поглощения анодного факела и выяснена возможность их применения в атомно-абсорбционном спектральном анализе (ААСА) металлов и горных пород.

Источником электронного пучка служил ускоритель с энергией пучка в импульсе 1,0 Дж, длительностью импульса тока на полувысоте 25 нс и средней энергией электронов в энергетическом спектре 0,2 МэВ. Для достижения необходимой скорости нарастания плотности потока мощности на поверхности испаряемой пробы использовался эффект фокусировки электронного пучка в вакуумном диоде ускорителя. Для получения атомных спектров поглощения испаренного материала использовалась специальная конструкция вакуумного диода, позволяющая формировать из одного и того же эрозионного факела разделенные в пространстве излучающий и поглощающий плазменные слои. Поток излучения, имеющего сплошной спектр, проходя через холодный слой реабсор-

бироваля, в результате чего на фоне непрерывного спектра наблюдались линии поглощения элементов, входящих в состав испаряемой пробы.

С целью определения оптимальных условий получения спектров абсорбции предварительно были исследованы зависимости оптических и спектроаналитических характеристик плазменных образований от параметров ускорителя, конструкции вакуумного диода, физических свойств пробы и геометрии регистрации спектра.

Для изучения аналитических возможностей метода электронно-пучкового ААСА были приготовлены образцы металлов (Fe, Bi, Pb, Al, Zn) и горных пород, галенита (PbS), пирита (FeS₂) и сфалерита (ZnS) в виде пластин с площадью поверхности 1 см² и толщиной (1 – 5)мм, которые устанавливались в полость анода ускорителя. Катод изготавливался из стали. Экспериментальная камера, совмещенная с вакуумным диодом ускорителя, откачивалась до давления 10⁻⁴ Торр, после чего проба возбуждалась электронным пучком. Изображение высокоскоростной плазменной струи, содержащей испаренное вещество исследуемого образца, проектировалось при помощи кварцевого конденсора на входную щель спектрографа ИСП-30. Интегральные за вспышку спектры поглощения регистрировались на высокочувствительную пленку РФ-3. Необходимая экспозиция набиралась за 1 – 10 импульсов возбуждения пробы.

Использование фотографического метода регистрации спектра позволяло одновременно регистрировать диапазон длин волн от 280 до 600 нм и определять интенсивности линий различных элементов, присутствующих в пробе. Анализ полученных спектров показал, что линии поглощения принадлежат в основном нейтральным и однократно ионизированным атомам с энергией возбуждения. Так, например, в спектре поглощения эрозионной плазмы галенита наблюдаются как линии основы (свинца), так и линии сопутствующих элементов (серебра, меди, кальция и цинка). Наличие нескольких линий абсорбции одного элемента, а также возможность одновременного получения этих же линий в испускании, по мере разлета плазменной струи, позволяет проводить корреляционный анализ по всем этим линиям, что увеличивает достоверность обнаружения и идентификацию элемента.

Таким образом, разработана методика получения атомных спектров поглощения анодного факела, возникающего при испарении твердых тел сильноточным электронным пучком. Показано, что эрозионный плазменный факел при определенных условиях его формирования имеет хорошие спектроаналитические характеристики и может быть использован для определения элементного состава металлов и горных пород.

Заклучение

В настоящем обзоре представлены результаты лишь некоторых из проводимых в ТПУ исследований в области радиационной физики и радиационных технологий. Продолжаются фундаментальные исследования, растет количество и объем прикладных работ. ТПУ продолжает оставаться одной из ведущих в этом направлении научных организаций. Он является организатором конференций по радиационной физике и химии неорганических материалов (РФХ), которые в последние десятилетия регулярно с трехгодичным интервалом проводились в Риге, затем в Томске. В 1999 г. в Томске проведена 10-я юбилейная конференция РФХ-10. В ТПУ же была проведена в 1996 г. 4-я Всероссийская конференция по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. ТПУ предполагает расширить в будущем свою научно-организационную деятельность при проведении конференций в области радиационной физики и радиационных технологий как одного из основных своих научных направлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын В. М. // Изв. вузов. Физика. - 1979. - №2. - С.86-90.
2. Лисицын В. М. // Сильноточные имп.электр. пучки в техн. - Новосибирск: Наука, 1983. - С.61-72.
3. Лисицын В. М., Корепанов В. И., Яковлев В. Ю. // Изв. вузов. Физика. - 1996. - №11. - С.5-29; Rus. Phys J. - 1996. - V.39. - №11. - P. 1009-1028.
4. Лисицын В. М., Корепанов В. И., Яковлев А. Н. // ФТТ. - 1998. - Т. 40. - №1. - С.79-80
5. Корепанов В. И., Лисицын В. М., Лисицына Л. А. // Изв. вузов. Физика. - 1996. - №11. - С.94-108; Rus. Phys. J. - 1996. - V.39. - №11. - P.1082-1092.
6. Annenkov Yu.M., Stolarenko V.F., Frangulian T.S. // Phys. Stat. Sol. - 1989. - V.156. - №1. - P.354-356.
7. Анненков Ю. М., Суржиков А. П. // ЖТФ. - 1985. - Т.55. - Вып.4. - С.735-736.
8. Лисицына Л. А. // Изв. вузов. Физика. - 1996. - №11. - С.57-75.
9. Лисицына Л. А. // Твердотельные детекторы ионизирующих излучений. - Екатеринбург: Изд. УГТУ, 1998. - С.3-12.
10. Вайсбурд Д. И., Похолков Ю. П. // Изв. вузов. Физика. - 1997. - № 11. - С. 3-12.
11. Vaisburd D.I. et al. // International Conf. on Luminescence. Abstracts. - Leningrad, 1972. - P. 34; Вайсбурд Д. И., Семин Б. Н. // Письма в ЖЭТФ. - 1980. - Т. 92. - № 5. - С. 197-200.
12. Вайсбурд Д. И., Семин Б. Н., Таванов Э. Г. и др. Высокоэнергетическая электроника твердого тела. - Новосибирск: Наука, 1980. - 227 с.
13. Вайсбурд Д. И., Б. Н., Таванов Э. Г. // Письма в ЖТФ. - 1975. - Т. 1. - № 11. - С. 531-534; Бутков В. В., Вайсбурд Д. И. // ДАН СССР. - 1987. - Т. 293. - № 3. - С. 598-602; Vaisburd D. // Proceedings 2nd Intern. Conf. on Space Charge in Solid Dielectrics. - Antibes, France: SFV, 1995. - P. 126 - 136.
14. Балычев И. Н., Вайсбурд Д. И., Геринг Г. И. // Письма в ЖТФ. - Т. 2, № 7. - С. 327-330; Изв. вузов. Физика. - 1975. - № 3. - С. 157-158; Vaisburd D.I., Tverdokhlebov S.I., Kotlyarewskii A.M. // Proceedings Intern. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. - Santa-Fe, USA: IEEE, 1990. - P. 395-399; Vaisburd D.I., Tukhfatulin T.A. // Proceedings of 18th Intern. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. - Eindhoven, Netherlands, 1998. - V. 1. - P. 160-169.
15. Vaisburd D.I. // Proceeding of 3rd Intern. Confer. on Electric Charge in Solid Insulators / Ed.: G. Damamme. - Tours, France: SFV, 1998. - P.185-195.
16. Барденштейн А. Л., Быков В. И., Вайсбурд Д. И. // Письма в ЖЭТФ. - 1995. - Т.61. - № 2. - С.100-105; Bardenstein A., Vaisburd D. // Proceedings of 2nd Intern. Confer. on Electric Charge in Solid Dielectrics. - Antibes, France: SFV - IEEE - Asprom, 1995. - P.108-117.
17. Вайсбурд Д. И., Балычев И. Н. // Письма в ЖЭТФ. - 1972. - Т. 15. - № 9. - С.380-383; Vaisburd D.I., Matlis S.B. // Proceedings 7th Intern. Confer. on High Power Particle Beams / Ed. W. Bauer and W. Schmidt. - V. II. - Karlsruhe, Germany, 1988. - P. 1067-1072.
18. Вайсбурд Д. И., Гольденберг С. У., Каратеев В. П., Хлебников О. Д. // ДАН СССР. - 1990. - Т. 314. - № 2. - С.364-369; Вайсбурд Д. И., Петрова А. А. // Изв. вузов. Физика. - 1997. - № 11. - С. 94-103.
19. Lopatin V.V. // Electrical Transport Properties of BN / Ed by J.Edgar. Properties Group III Nitrides. Published IEE London. - 1994. - №11. P.89-111.
20. Бужинский О. И., Лопатин В. В. // Физика и техника мощных имп. систем / Под ред. Е.П.Велихова. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С.311-329.
21. Buzhinskij O.I., Lopatin V.V., Kabyshev A.V., Opimakh I.V., Surov Yu.P. // J.of Nucl. Mater. - 1990. - V.173. - P.179-184.
22. Lopatin V.V., Konusov F.V. // J.Phys. and Chem. Solid. -1992. - V.53. - №6. - P.847-854.
23. Lopatin V.V., Ivanov Yu.F., Dedkov V.S. // Nanostructured Materials. - 1994. - V.4. - №6. - P.669-676.
24. Лопатин В. В., Иванов Ю. Ф. // Письма в ЖЭТФ. - 1989. - Т.50. - №11. - С.466.
25. АС №15617229, 1990 / О. И. Бужинский, А. В. Кабышев, В. В. Лопатин и др.
26. Михайлов М. М., Смирнов С. В., Верещагин В. И. // Перспективные материалы. - 1999. - № 1. - С.27-30.
27. Михайлов М. М. // Перспективные материалы. - 1998. - № 2. - С.17-22.
28. Michailov M.M. and Dvoretzkii M.I. // J.of Adv. Mat. - 1994. - V.1. - № 4. - P.336-344.29.
29. Михайлов М. М., Власов В. А. // Изв. вузов. Физика. - 1998. - № 12. - С.52-57.
30. Michailov M.M., Krutikov V. №. // J.of Adv. Mat. - 1996. - V.3. - №2. - P.106-113.
31. Быстрицкий В. М., Диденко А. Н. Мощные ионные пучки. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
32. Davis H.A., Remnev G.E., Stinnett R.W., Yatsui K. // MRS Bulletin. - V.XXI. - №8. - P. 58-62.
33. Remnev G.E., Shulov V.A. // Laser and Particle Beams. - 1993 - V.11 - №4. - P.707-731.
34. Г. Е. Ремнев, И. Ф. Исаков, М. С. Опекунов, В. М. Матвиенко. // Изв. вузов. Физика. - 1998. - №4. - С.92-111.
35. Remnev G.E., Zakoutayev A.N., Grushin I.I., et al. // Beams '96: Proceedings of 11th International Conference on High Power Particle Beams. Prague. - 1996. - V. II. - P. 873-877.

36. Ремнев Г.Е., Иванов Ю.Ф., Опекунов М.С., Пузыревич А.Г. // Письма в ЖТФ. - 1995. - Т.21. - Вып.24. - С.60-65.
37. Ремнев Г.Е., Закутаев А.Н., Иванов Ю.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. - 1996. - Т. 22. - Вып. 8. - С. 68.
38. Анненков Ю.М., Франгульян Т.С., Возняк А.В. // Порошковая металлургия. - 1991. - №8. - С.15-18.
39. Суржиков А.П., Притулов А.М. Радиационно-термическое спекание ферритовой керамики. - М.: Энергоатомиздат, 1998. - 217 с.
40. Анненков Ю.М., Апаров Н.Н., Франгульян Т.С., Возняк А.В. // Физика и химия обработки материалов. - 1998. - №2. - С.18-23.
41. Анненков Ю.М. // Изв. вузов. Физика. - 1996. - №11. - С.176-192.42.
42. Lopatin V.V., Kabyshev A.V., Bushnev L.S. // Phys. Stat. Sol. (a). - 1989. - V.116. - №1. - P.K69-K72.
43. Пат. №2006082, приоритет 06.03.1990 г. / А.В. Кабышев, В.В. Лопатин.
44. Кривобоков В.П., Пашенко О.В., Сапульская Г.А., Степанов Б.П. // Физика и химия обработки материалов. - 1991. - № 6. - С.25-32.
45. Кривобоков В.П., Пашенко О.В., Сапульская Г.А. // Изв. вузов. Физика. - 1993. - № 12. - С.37-41.
46. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пашенко О.В. // Изв. вузов. Физика. - 1997. - № 2. - С.67-89.
47. Кривобоков В.П., Пашенко О.В. // ЖТФ. - 1991. - Т. 61. - Вып. 3. - С.188-191.
48. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пашенко О.В. // Письма в ЖТФ. - 1998. - Т. 24. - № 3. - С. 75-79.
49. Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов: Матер. конф. / Под ред. В.М. Зыкова. - Томск, 1991. - С.33-34,154-159,168-171,179-180.
50. Vespalov V.I., Zykov V.M., et al. // Проблемы взаимодействия ИСЗ с космической средой. - Иркутск, 1992. - С. 117-118.
51. Беспалов В.И., Зыков В.М., Кашковский В.В // Неразрушающий контроль и диагностика: Известия ТПУ. - Томск: Изд-во НТЛ, 1998. - С.31-39.
52. Патент РФ 2025827 / Заитов Ф.А., Горшкова О.В., Зыков В.М. и др. - Б.И. - 1994. - № 24.
53. Зыков В.М., Киселев А.Н., Лукин А.Л., Ничинский Н.А. // ПТЭ. - 1987. - №1. - С.250.
54. Зыков В.М. // Изв. вузов. Физика. - 1996. - №7. - С.52-58.
55. Лисицын В.М., Гриценко Б.П. // Физика и химия стекла. - 1978. - Т.4. - С.239-240.
56. Гриценко Б.П., Лисицын В.М., Степанчук В.Н. // ФТТ. - 1981. - Т.23. - №2. - С.393-396.
57. Лисицына Л.А., Рейтеров В.М., Лисицын В.М. и др. // Опт. и спектр. - 1983. - Т.55. - Вып.5. - С.875-878.
58. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Штанько В.Ф. // Твердотельные детекторы ионизирующих излучений: Тр. I Всерос. симп. ТТД-97. Екатеринбург, 1998. - С.140-147.