

На правах рукописи

Олешко Владимир Иванович

**ПОРОГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С СИЛЬНОТОЧНЫМИ
ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2009 г.

Работа выполнена на кафедре лазерной и световой техники Томского политехнического университета.

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Лисицын Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ремнев Геннадий Ефимович;
доктор физико-математических наук, профессор
Зуев Лев Борисович;
доктор физико-математических наук, профессор
Кригер Вадим Германович

Ведущая организация: НИИ ПММ Томского государственного
университета

Защита состоится 1 июля 2009 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « » _____ 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д 212.269.02
М.В. Коровкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность.

Действие ионизирующих излучений на твердые тела изучают в связи с необходимостью создания стойких к радиации материалов для ядерной энергетики, развития радиационных технологий и неразрушающих методов контроля материалов. Развитие высоковольтной импульсной техники привело к созданию в 60-х годах сильноточных электронных ускорителей, генерирующих сильноточные электронные пучки (СЭП), максимальная плотность потока энергии которых достигает 10^{13} Вт/см² [1]. Экспериментаторы получили уникальный инструмент, позволяющий исследовать поведение вещества в экстремальных, недоступных ранее условиях. Работа в этом направлении привела к обнаружению ряда пороговых процессов, индуцированных СЭП в твердых телах различных классов соединений: генерации вынужденного излучения в полупроводниках [2], разрушения ионных кристаллов и стекол [3], взрывного разложения энергетических материалов [4]. Нелинейный отклик диэлектриков и полупроводников на мощное электронное облучение позволил объявить о возникновении новой области исследований – *физики мощных радиационных воздействий* [5]. Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью изучения реальной картины физических процессов, индуцированных СЭП в диэлектриках и полупроводниках, разработки теоретических представлений о механизмах электронно-пучкового разрушения твердых тел различных классов, в том числе полупроводниковых лазеров с электронной накачкой.

Исследование закономерностей и выяснение механизмов взрывного разложения энергетических материалов под действием электронного импульса является необходимым этапом решения актуальной проблемы - направленного регулирования стабильности энергетических материалов к внешним воздействиям различной природы.

В фундаментальном плане важность этих исследований связана с необходимостью разработки теории взаимодействия СЭП с веществом [6]. Прикладной аспект проблемы определяется использованием СЭП для реализации новых радиационных технологий и методов контроля материалов.

Цель и задачи исследований.

Фундаментальная проблема, на решение которой направлена работа – выяснить роль кумуляции энергии СЭП в диэлектриках и полупроводниках в иницировании пороговых процессов: пластической деформации, разрушения, плазмообразования, электронной эмиссии и взрывного разложения энергетических материалов.

Целью работы являлось:

Определить главные факторы разрушающего воздействия СЭП на ионные кристаллы и полупроводники A^2B^6 .

Выяснить причины, определяющие порог генерации вынужденного излучения в кристаллах A^2B^6 различной предыстории.

Установить физическую природу свечения и поглощения, сопровождающих взрывное разложение азидов тяжелых металлов (АТМ).

Изучить возможность инициирования взрыва бризантных взрывчатых веществ (ВВ) мощным электронным пучком на примере ТЭНа.

Разработать экспериментально обоснованные физические модели взрывного разложения АТМ и ТЭНа импульсным пучком электронов.

Задачи исследований.

1. Разработать экспериментальные методики и изучить пространственно-временные характеристики поля энерговыведения СЭП в высокоомных материалах с высоким временным (~ 10 нс) и пространственным (~ 10 мкм) разрешением.

2. Изучить основные закономерности разрушения диэлектриков и полупроводников в режимах многократного и однократного облучения СЭП.

3. Исследовать влияние уровня возбуждения, при его варьировании в диапазоне $10^{20} \div 10^{27} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, на спектрально-кинетические характеристики низкотемпературной (25 К) люминесценции CdS и ZnS.

4. Изучить явление самофокусировки СЭП в вакуумном диоде электронного ускорителя ГИН-600 с целью получения максимально возможных плотностей электронного потока.

5. Исследовать оптические и плазмодинамические характеристики низкотемпературной плазмы, возникающей в объеме и на поверхности твердых тел различных классов при облучении СЭП с варьируемой в диапазоне $0,1 \div 100 \text{ Дж/см}^2$ плотностью энергии.

Научная новизна.

1. Впервые изучены спектральные характеристики и пространственно-временная структура сверхзвуковых анодных разрядов, развивающихся в диэлектриках при возбуждении СЭП с плотностью энергии, варьируемой в диапазоне $0,1 \div 100 \text{ Дж/см}^2$.

2. Измерены кинетические характеристики низкотемпературной дефектно-примесной люминесценции нелегированных кристаллов CdS и ZnS.

3. Впервые измерены спектрально-кинетические характеристики люминесценции взрывчатых веществ – АТМ и ТЭНа в довзрывном режиме возбуждения электронным пучком.

4. Установлена физическая природа взрывного свечения и поглощения, сопровождающих процесс взрывного разложения АТМ и ТЭНа при инициировании электронным импульсом.

5. Изучен процесс филаментации и самофокусировки СЭП в вакуумном диоде электронного ускорителя ГИН-600.

6. Разработан новый способ атомно-абсорбционного спектрального анализа с испарением пробы мощным электронным пучком.

7. Обнаружена детонация бризантного взрывчатого вещества (ТЭНа) при облучении сфокусированным СЭП.

8. Предложены экспериментально обоснованные физические модели инициирования АТМ и ТЭНа электронным пучком.

Научная и практическая значимость.

Научная значимость работы определяется полученными новыми данными о пороговых процессах, развивающихся в твердых телах различных классов, в том числе в энергетических материалах, при облучении СЭП.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования пороговых процессов в различных областях науки, техники, радиационных и взрывных технологиях:

- * для кумуляции энергии СЭП в электрически прочных диэлектрических мишенях с целью достижения экстремальных состояний вещества;
- * разработки новых технологий обработки материалов;
- * изучения физики наносекундного электрического пробоя конденсированных сред и возможности управления этим процессом ионизирующей радиацией;
- * для разработки мощных, устойчивых к деградации полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением;
- * разработки люминесцентных и атомно-спектральных методов контроля материалов;
- * прогнозирования поведения взрывчатых веществ при мощном радиационном воздействии;
- * для получения высоких давлений в конденсированных средах на основе детонации бризантных ВВ, инициированной СЭП.

На основе проведенных исследований нами разработаны и защищены авторскими свидетельствами и патентами электронно-пучковые способы контроля параметров твердых тел, а также конструкции катодолуминесцентного и плазмодинамического источников мощного оптического излучения на базе ускорителя электронов ГИН-600.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Нейтрализация инжектированного в диэлектрик отрицательного объемного заряда электронного пучка осуществляется сверхзвуковыми анодными разрядами, удельная плотность мощности в которых может достигать 10^{12} Вт/см³, что приводит к инициированию ряда пороговых процессов - пластической деформации, разрушения, плазмообразования и мощной электронной эмиссии.

2. Порог генерации и механизм излучательной рекомбинации, ответственный за стимулированное излучение в реальных кристаллах A^2B^6 , при возбуждении электронным пучком, определяются типом дефектно-примесных комплексов и их концентрацией.

3. Для реализации атомной спектрометрии с испарением пробы мощным электронным пучком необходимо преобразовать кинетическую энергию высокоскоростного плазменного потока в энергию ударно-сжатой плазмы и сформировать плазменную струю с изменяющимися вдоль направления её распространения газодинамическими и оптическими характеристиками.

4. Взрывное разложение АТМ при воздействии электронных пучков является следствием развития электрического пробоя.

5. Взрывное разложение ТЭНа, инициируемое электронным пучком, возникает в результате последовательного развития нескольких процессов: электрического пробоя с образованием очагов химического разложения, диспергирования и газификации образца в окрестности микроочагов, образования макроочага в области торможения высокоэнергетических электронов с последующим его развитием в детонационную волну.

Личный вклад автора. Диссертационная работа – результат обобщения многолетних исследований, часть из которых выполнена лично автором, а часть в соавторстве с сотрудниками кафедры лазерной и световой техники Томского политехнического университета. Личный вклад автора состоит в постановке общих и конкретных задач исследований, выборе методов их решения, в анализе и обобщении результатов исследований, формулировке выводов и защищаемых положений. В работах, опубликованных в соавторстве, фамилии которых указаны в списке публикаций, автору принадлежат результаты, сформулированные в защищаемых положениях и выводах диссертации.

Апробация работы. По теме диссертации опубликовано 90 работ в виде статей в рецензируемых журналах (24), авторских свидетельств и патентов (5), докладов на международных и всероссийских конференциях (26) и тезисах докладов (35). Результаты исследований, вошедших в диссертацию, были доложены и обсуждены на 17 отечественных и 22 международных конференциях, симпозиумах, школах и семинарах: 30 – Всесоюзном совещании по люминесценции «Неорганические кристаллы» (Ровно 1984); 5, 6 – Всесоюзных конференциях по физике диэлектриков (Баку 1982, Томск 1988); 5, 6 и 7 – Всесоюзных конференциях по радиационной физике и химии ионных кристаллов (Рига, 1983, 1986 и 1989); 3, 4 и 5 – Всесоюзных совещаниях «Воздействие ионизирующего излучения и света на гетерогенные системы» (Кемерово, 1982, 1986 и 1990); 5 - Всесоюзном совещании «Синтез и свойства, исследования и применение люминофоров» (Ставрополь, 1985); 10 – Всесоюзной конференции по физике полупроводников (Минск, 1985); 9 – Всесоюзной конференции «Состояние и перспективы разработки и применения сцинтилляторных детекторов в 12 пятилетке» (Харьков, 1986); 10 – Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике (Киев, 1987); Семинаре «Физика неполного пробоя кристаллов» (Институт физики АН БССР, Минск, 1989); 2 – Всесоюзной конференции «Модификация свойств конструкционных материалов пучком заряженных частиц» 1991, Свердловск; 9, 10, 12 и 13 Международных конференциях по радиационной физике и химии неорганических материалов (Томск, 1996, 1999, 2003 и 2006); Международной конференции по твердотельной дозиметрии, ТТД-7 (Екатеринбург, 1997); Международной конференции по физике твердого тела (Усть-Каменогорск, 2002); III Ural Workshop on Advantaged Scintillation and Storage Optical Materials (Ekaterinburg, 2002); 7, 9 и 10 Международных конференциях «Физико-химические процессы в неорганических материалах» (Кемерово, 1998, 2004 и 2007); Международной конференции по физике твердого тела (Алматы, 2004); IV – Международном оптическом конгрессе «Оптика XXI век» (Санкт-Петербург, 2006); Международном научн.-техн. семинаре «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (Москва, МЭИ, 2002,

2004, 2008); III, IV, V и VI – Международных практических конференциях «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 2002, 2004, 2006 и 2008); 7 – ой международной конференции по атомным и молекулярным лазерам (Томск, 2005); Международной научно-практической конференции по перспективным композиционным материалам (НС 04): «Нанокompозиты» (Сочи, 2004); Международной летней школы «Радиационная физика» (Бишкек – Каракол, 2004); XIII конференции «Высокочистые вещества и материалы» Получение, анализ, применение (Нижний Новгород, 2007); III Всероссийской конференции «Энергетические конденсированные системы» (Черноголовка-Москва, 2006); Международной конференции «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2007), VI Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» Томск, 2008 г.

Работа поддерживалась грантами: «Катастрофические процессы в материалах при возбуждении мощными импульсами потоков электронного и лазерного излучения» (грант РФФИ, проект 04-02-16339, 2004 – 2006 гг.). «Инициирование взрывного разложения взрывчатых веществ и пиротехнических составов импульсом радиации» (грант РФФИ, проект 06-03-3274, 2006 – 2007 гг.). «Закономерности взрывного разложения энергетических материалов при инициировании внешним импульсом и проблемы создания чувствительных быстродействующих лазерных капсулей» (грант РФФИ, проект 08-08-00153, 2008 – 2010 гг.). «Импульсное инициирование взрывчатых веществ и пиротехнических составов лазерным излучением и пучками ускоренных электронов» (программа сотрудничества Минобразования РФ и Минобороны РФ по направлению «Научно-инновационное сотрудничество», 2001 – 2002 гг.). «Исследование нестационарных процессов при импульсных лазерных и электронных воздействиях» (грант Минобразования «Ведущие научно-педагогические коллективы», № Гос. рег.: 01200315128, 2003 – 2004 гг.). «Спектральный элементный анализ материалов и веществ при использовании для возбуждения сильноточных электронных пучков» (грант "Университеты России" – 1998 – 2001 гг.), № Гос. рег.: 01980005343. «Исследование свойств материалов при их взаимодействии с сильноточными электронными пучками» (грант "Университеты России", проект УР.06.01.023, 2002 – 2003 гг.). «Исследование нестационарных процессов в материалах при импульсных лазерных и электронных воздействиях», 2003 – 2005 гг. № Гос. рег.: 01200315128.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав и основных выводов. В начале глав приводится краткий анализ литературы по состоянию исследований и дополнительные методики, предназначенные для решения конкретных задач. Диссертация изложена на 357 страницах, содержит 142 рисунка, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 307 наименований.

Краткое содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи исследований, представлены научная новизна, практическое значение работы и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы описана методика эксперимента и результаты экспериментальных исследований самопроизвольных электрических разрядов, развивающихся в ЩГК под действием СЭП наносекундной длительности.

Основной метод экспериментальных исследований – импульсная оптическая спектрометрия с наносекундным временным разрешением. Сущность метода заключается в возбуждении исследуемого материала наносекундным импульсом радиации (электронным пучком или рентгеновским излучением) и измерении в широком временном диапазоне $10^{-9} \div 10^{-1}$ с релаксации оптических, электрических и механических процессов, развивающихся в образце после облучения. Основные элементы установки: источник радиации, оптический спектрометр и система синхронизации. Источником радиации является импульсный ускоритель электронов типа ГИН-600 конструкции Г.А. Месяца и Б.М. Ковальчука. Параметры ускорителя: максимальная энергия электронов 450 кэВ, длительность импульса на полувысоте $3 \div 12$ нс. Для охлаждения образцов в диапазоне $25 \div 300$ К использовалась промышленная микрокриогенная система МСМР-110Н-3,2/20. Энергия СЭП измерялась радиационно-химическим методом. Относительная погрешность измерения энергии пучка не превышала 10%. Временное разрешение при фотоэлектрической регистрации люминесценции составляло по фронту нарастания ~ 7 нс, по спаду ~ 20 нс. Измерения проведены в спектральном диапазоне $250 \div 900$ нм с использованием монохроматора МДР-23. Для градуировки спектральной чувствительности измерительного тракта спектрометра в диапазоне длин волн $300 \div 1100$ нм использовалась лампа ТРШ 2850 – 3000 с цветовой температурой $T_{цв} = 2850$ К. Совместные погрешности возбуждающего и измерительного трактов определялись из статистических испытаний. В качестве источника сигнала при таких испытаниях использовалась низкотемпературная импульсная рентгенолюминесценция кристалла CdS. Испытания показали, что относительная погрешность измерений люминесценции не превышала ~ 5 %. Для получения высокого пространственного разрешения была использована оптическая микроскопия в сочетании с методами импульсной спектрометрии и статической фотографией. Регистрация остаточных механических напряжений в ЩГК, после воздействия СЭП, производилась с помощью поляризационно-оптического метода. Многоканальная регистрация позволяла синхронно измерять несколько различных процессов. Временная привязка измеряемых оптических сигналов осуществлялась по реперному импульсу рентгеновского излучения электронного ускорителя, воздействующего на фотоприемники. Точность привязки не хуже 5 нс.

Изучены закономерности развития электрических разрядов в диэлектриках и полупроводниках, индуцированных СЭП вне области торможения электронного пучка в схеме облучения с "открытой" облучаемой поверхностью (электрическое поле сосредоточено между отрицательным объемным зарядом (ООЗ) электронного пучка инжектированного в образец и электродом, находящимся на тыльной поверхности образца). Толщина исследуемых образцов (d) варьировалась в диапазоне $1 \div 9$ мм и значительно превышала пробег электронного пучка в облучаемой мишени ($d \gg R_e$).

Обнаружено, что облучение ЩГК серией последовательных импульсов СЭП с плотностью энергии $0,1 \leq H \leq 0,4$ Дж/см² сопровождается формированием анодного разряда, возникающего вблизи контакта заземленного электрода с кристаллом и распространением его к возбуждаемой электронным пучком поверхности в область термализации ООЗ. Электрические разряды развиваются в ЩГК по определенным кристаллографическим направлениям. В кристаллах NaCl, NaBr и LiF стримеры преимущественно ориентированы вдоль [110], в KCl и KBr – вдоль [100], направлений в кристалле (рис. 1).

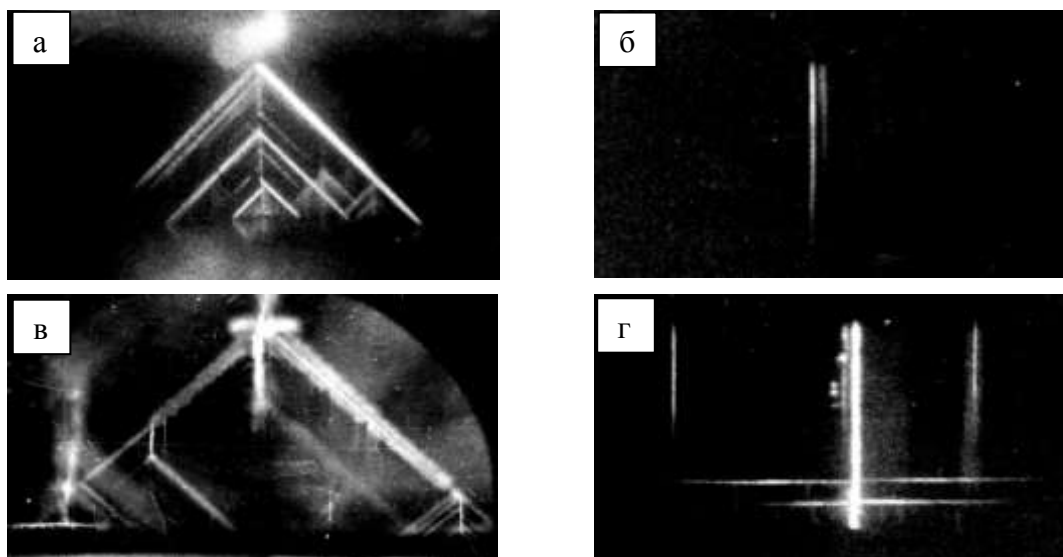


Рис. 1. Фотографии каналов электрического пробоя, индуцированного СЭП в ЩГК вне зоны торможения электронного пучка:
а, б, г – пространственное распределение свечения анодных разрядов по толщине образцов NaCl (а) и KCl (б, г); б – 3^й, г – 7^й импульсы облучения; в – пространственное распределение остаточных каналов пробоя по толщине в кристалле NaCl

Изучение морфологии разрушений в кристаллах, после многократного облучения, позволило выявить полые каналы электрического пробоя (КЭП), симметрично расположенные трещины (рис. 2, а) и кристаллографически ориентированные зоны пластической деформации (рис. 2, б, в).

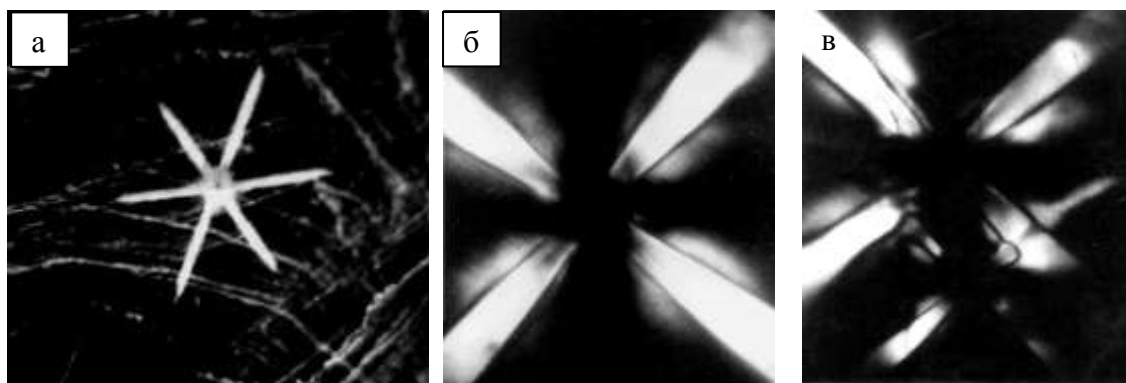


Рис. 2. Зоны разрушения (а) и пластической деформации (б, в) формируемые анодными разрядами вне зоны торможения СЭП в кристаллах: а – CaF₂; б, в – KCl

Размеры деформированных зон достигают $1 \div 3$ миллиметра при диаметрах КЭП $3 \div 30$ мкм. Установлено, что максимальная интенсивность плазменного свечения достигается в момент окончания импульса СЭП.

Длительность свечения плазмы существенно превосходит длительность импульса тока электронного пучка. Регистрация интегральных по времени спектров излучения объемных разрядов в ионных кристаллах с помощью кварцевого спектрографа ИСП-30 показало, что свечение, как правило, имеет сплошной спектр, перекрывающий диапазон от 250 до 700 нм (рис. 3). В монокристалле BaF_2 на фоне интенсивного сплошного спектра наблюдаются линии поглощения, принадлежащие атомам и ионам бария: Ba I ($\lambda=553,6$ нм), Ba II ($\lambda=455,4$; 493,4 нм).

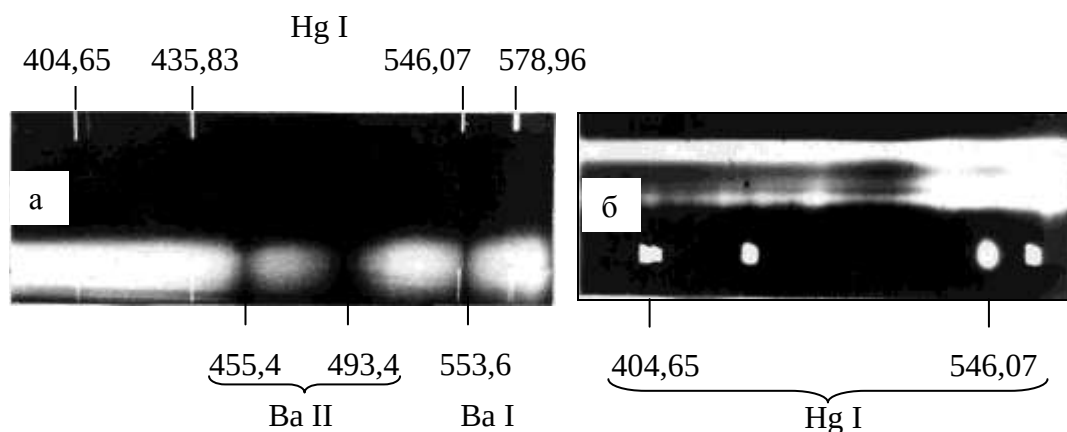


Рис. 3. Фрагменты спектров анодных разрядов, индуцированных СЭП в кристаллах BaF_2 (а) и NaCl (б)

Длительность свечения плазмы в УФ области спектра, как правило, меньше, что приводит к изменению спектра излучения анодного разряда со временем (наблюдается сдвиг максимума спектра в длинноволновую область).

Обнаружена мощная электронная эмиссия из канала электрического пробоя в твердом диэлектрике. Определены параметры эмиссионного тока ($I_m \sim 20$ А, $\tau \sim 2$ нс, $E_m = 40$ кэВ).

Описаны результаты исследования закономерностей и особенностей иницирования неразрушающих стримерных разрядов в кристаллах CdS электронным пучком. Определены пороговые значения плотности энергии СЭП при которых формируются стримерные разряды: при положительной полярности электрода $H(+) = 0,007$ Дж/см² и при отрицательной $H(-) = 0,01$ Дж/см². Спектр стримерной люминесценции в режиме спонтанного излучения подобен спектру катодолуминесценции CdS при низких уровнях возбуждения. Запаздывания стримерной люминесценции относительно иницирующего разряд импульса тока СЭП не обнаружено. При достижении пороговой плотности энергии, иницирующего катодный стример СЭП ($H \sim 0,1$ Дж/см²), наблюдается усиление света в направлении вдоль оси стримерного разряда, которое проявляется в уменьшении полуширины люминесценции до $3 \div 5$ нм и появлении направленности. Обнаружено тушение стримерных разрядов импульсной катодолуминесценцией кристалла.

Изучены закономерности и особенности формирования электрических разрядов в зоне торможения СЭП в схеме облучения с "заземленной" облучаемой поверхностью (электрическое поле сосредоточено между ООЗ и электродом, находящимся на облучаемой поверхности образца).

Выделены две группы диэлектрических и полупроводниковых материалов отличающихся морфологией разрушения зоны торможения СЭП. К первой группе относятся диэлектрики и полупроводники (LiF , CaF_2 , CaCO_3 , LiNbO_3 , $\text{Zn}_{0,98}\text{Cd}_{0,02}\text{Se}$, MgAl_2O_4 , ПММА) в которых ионизирующее излучение практически не влияет на формирование и развитие анодных разрядов (рис. 4, 5). Вторая группа (NaCl , KCl , KBr , ZnSe) отличается тем, что остаточные КЭП в области облучения, как правило, отсутствуют. Лишь в отдельных экспериментах, при многократном облучении СЭП низкой плотности, наблюдались КЭП в тонкой приповерхностной области кристаллов. Одна из причин, вызывающая такие отличия – влияние ионизирующего излучения на процесс шнурования (контрагирования) разряда. Об этом, в частности, свидетельствует появление микрозон пластической деформации в кристаллах KCl и KBr , диаметр центральной зоны которых (зоны энерговыделения) достигает $30 \div 60$ мкм, что значительно превышает диаметр КЭП в LiF и CaF_2 .

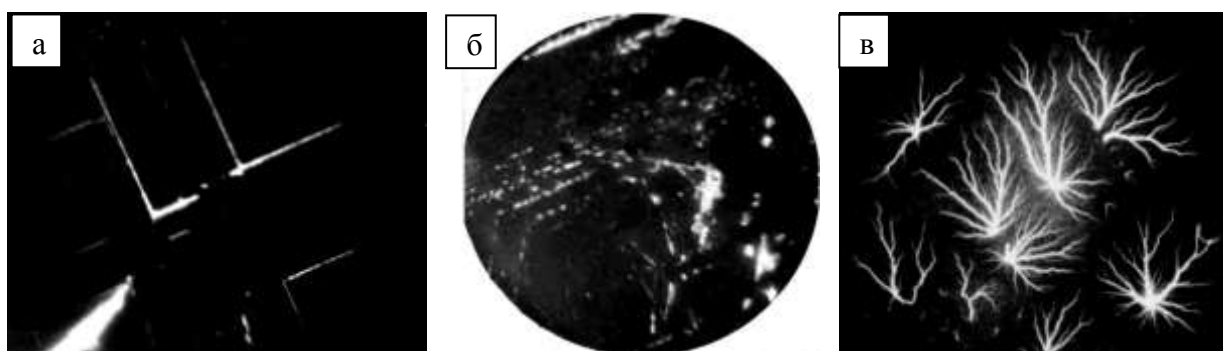


Рис. 4. Фотографии свечения электрических разрядов, развивающихся в зоне торможения СЭП в образцах LiF (а), $\text{Zn}_{0,98}\text{Cd}_{0,02}\text{Se}$ (б) и ПММА (в): а – $H = 0,4$ Дж/см², $20^{\text{й}}$ импульс; б – $H = 0,14$ Дж/см², $20^{\text{й}}$ импульс; в – $H = 0,4$ Дж/см², $3^{\text{й}}$ импульс облучения

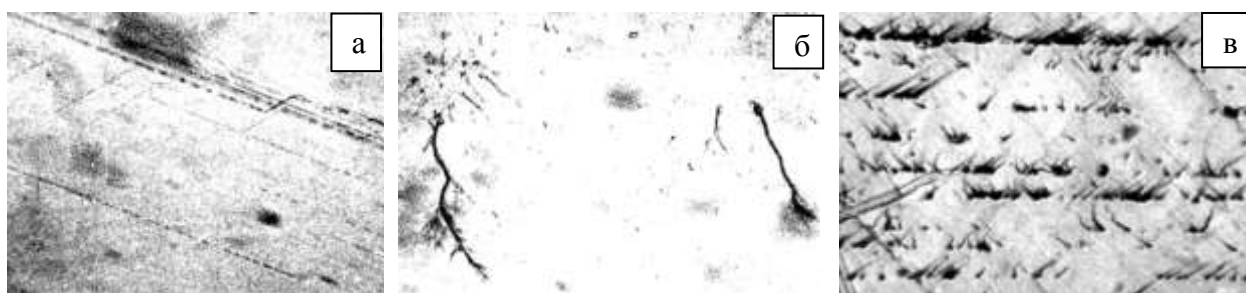


Рис. 5. Пространственное распределение каналов электрического пробоя в области торможения СЭП в различных материалах: а – MgAl_2O_4 , б – SiO_2 , в – $\text{Zn}_{0,98}\text{Cd}_{0,02}\text{Se}$

Обнаружено влияние макродефектов технологического происхождения (границы зерен, преципитаты, поры и др.) на пространственное распределение КЭП и микрозон пластической деформации, возникающих в области торможения электронного пучка в образцах LiNbO_3 , $\text{Zn}_{0,98}\text{Cd}_{0,02}\text{Se}$, SiO_2 , KCl .

Вторая глава посвящена изучению основных факторов разрушающего воздействия СЭП на диэлектрики при однократном облучении. Как упомянуто выше, облучение монокристаллов KCl, KBr и NaCl электронным импульсом не приводит к образованию остаточных КЭП. Для конкретизации механизма разрушения ЩГК, реализующегося в условиях однократного облучения, были проведены дополнительные исследования, в результате которых были обнаружены периодические структуры разрушения (ПСР). Имеющиеся к настоящему времени литературные данные отражают две точки зрения на природу их возникновения. Первая связывает факт появления ПСР с электрическим пробоем кристаллов, индуцированным СЭП. Предполагается, что ПСР являются результатом воздействия на кристалл мощного электромагнитного излучения, источником которого является локальная область разряда с токовой неустойчивостью. Основанием для этого является центрально-симметричное расположение ПСР относительно каналов электрического пробоя в кристалле LiF.

Авторы второй считают, что ПСР формируются акустической волной, распространяющейся из области торможения СЭП к тыльной поверхности кристалла и никакого отношения к электрическому пробоему не имеют. Основание – расположение ПСР в приповерхностной области кристалла, соответствующей взаимодействию двух волн растяжения, формирующихся при отражении биполярного акустического импульса распространяющегося из области потерь энергии СЭП. Для конкретизации механизма формирования ПСР в настоящей работе изучена динамика образования ПСР вблизи тыльной грани образца KCl в условиях локализации электрического поля в зоне торможения СЭП. Кинетика формирования ПСР в этих условиях в кристалле KCl ($d = 2,6$ мм, $C_l = 4400$ м/с) приведена на рис. 6. Видно, что процесс разрушения начинается в момент прихода акустической волны в зону локализации ПСР. При среднем диаметре ПСР в KCl ($L_{cp} \sim 100$ мкм) и времени разрушения ($t_{ПСР} \sim 100$ нс) скорость формирования ПСР составляет $V_{ПСР} \sim 10^3$ м/с.

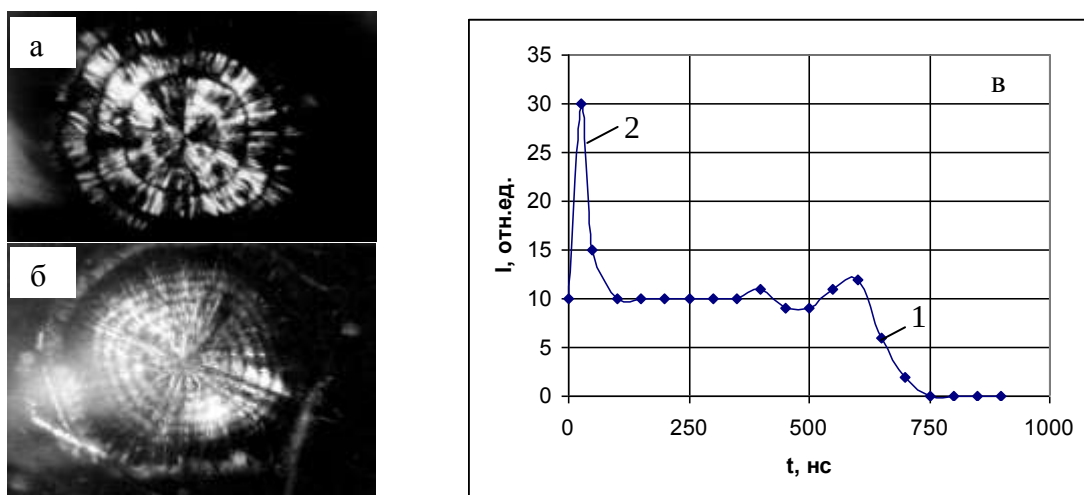


Рис. 6. Вид периодических структур разрушения, образующихся вблизи тыльной (по отношению к облучаемой) поверхности кристаллов NaCl (а) и KCl (б) после облучения импульсом СЭП ($H = 0,6$ Дж/см²); в – кинетика формирования ПСР в кристалле KCl (1) при $H = 1,6$ Дж/см²; 2 – реперный импульс тормозного излучения, фиксирующий начало облучения образца (толщина кристалла $d = 2,6$ мм)

Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают акустическую природу формирования ПСР, независимо от того инициируются ли они ударной волной анодного разряда или акустической волной, формирующейся в области торможения СЭП. Механизм формирования ПСР окончательно не установлен. Предполагается, что ПСР представляет собой диссипативную (самоорганизующуюся) структуру, образующуюся в твердом теле при сверхскоростном нагружении в результате развития деформационной неустойчивости в области максимальных растягивающих напряжений.

Второй вопрос, который решался в данном разделе – выяснить развивается ли электрический пробой в диэлектриках при плотности энергии СЭП ~ 100 Дж/см², при которой происходит интенсивное разрушение и испарение материала. Эксперименты были проведены на ПММА и монокристалле LiF.

Фотография пространственного распределения анодных разрядов в зоне торможения электронного пучка в режиме испарения материала приведена на рис. 7, б. Изображение зоны облучения получено за один (первый) импульс облучения при открытом затворе фотоаппарата. После импульса возбуждения наблюдается разрушение, испарение и выброс вещества из зоны энерговыделения. На рис. 7, а приведена кинетика свечения электрических разрядов ($\lambda = 500$ нм), развивающихся в ПММА в процессе самофокусировки СЭП в первом импульсе возбуждения. Выбор ПММА связан с тем, что интенсивность свечения (и высвеченная светосумма) плазмы, образующейся в КЭП, в несколько раз превышает интенсивность импульсной катодolumинесценции (ИКЛ) образца. Это позволяет в обычных условиях регистрации свечения (без применения микроскопа) следить за динамикой плазмообразования.

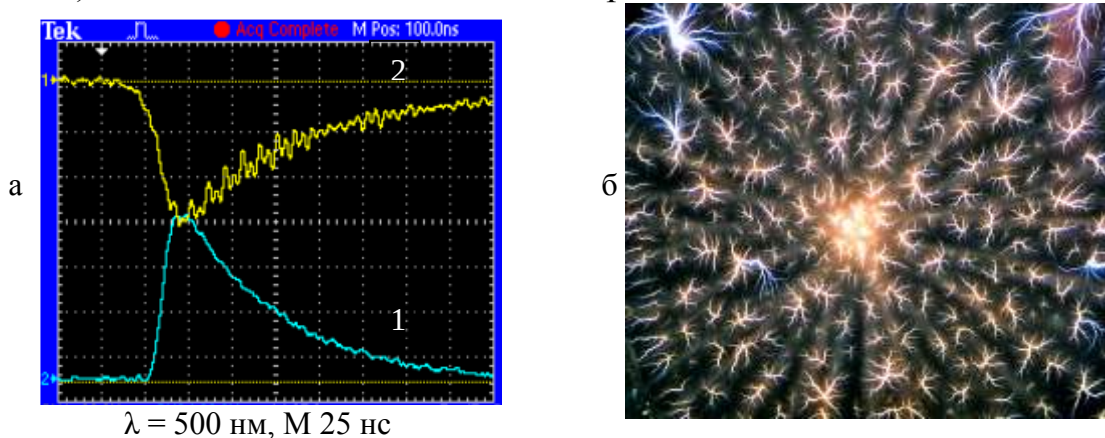


Рис. 7. Кинетика свечения (а, кр. 1) и фотография анодных разрядов (б), развивающихся в первом импульсе возбуждения в зоне торможения СЭП в ПММА: ($q = 10^{12}$ Вт/см², диаметр зоны облучения 6 мм); 2 – реперный импульс тормозного излучения

Таким образом, экспериментально показано, что электрический пробой, индуцированный СЭП в электрически прочных диэлектриках, развивается в момент импульса облучения, т.е. значительно раньше, чем происходит разрушение и испарение материала. При этом процесс плазмообразования развивается в объеме твердого тела в условиях препятствующих разлету плазмы, что способствует получению сверхвысоких давлений и температур.

Согласно [7] состав и свойства вещества в канале электрического пробоя зависят от скорости распространения анодного разряда. При $v \geq 5 \cdot 10^7$ см/с

удельная энергия плазмы в канале разряда достигает $\omega \sim 10^5$ Дж/см³. Зная из эксперимента длительность импульса плазменного свечения в ПММА ($t \sim 25$ нс при $\lambda = 450$ нм), можно оценить удельную плотность мощности в канале анодного разряда, индуцированного электронным пучком в зоне торможения СЭП: $W \sim 10^{12}$ Вт/см³.

В третьей главе рассмотрено влияние дефектов технологического происхождения на порог генерации вынужденного излучения в кристаллах CdS и ZnS, выращенных в различных технологических условиях. Возбуждение образцов осуществлялось импульсным рентгеновским излучением и электронным пучком в вакууме при давлении остаточных газов $\sim 10^{-4}$ Па и температуре 27 К. В работе использовались высокочистые монокристаллы CdS, полученные методом Давыдова - Маркова, с отклонением от стехиометрии в сторону избытка, как кадмия, так и серы, а также монокристаллы стехиометрического состава (CdS № 18). Кристаллы сульфида цинка были выращены из расплава (ZnS № 1 и № 2) и химическим осаждением из газовой фазы (ZnS № 3, CVD – технология), различались степенью отклонения от стехиометрии и содержанием неконтролируемых примесей.

Исследования спектрально-кинетических характеристик низкотемпературной люминесценции серии кристаллов CdS и ZnS при варьировании уровня возбуждения в диапазоне $10^{20} \div 10^{27}$ см⁻³ · с⁻¹ позволили выявить следующие закономерности.

1. Спектр импульсной рентгенолюминесценции (ИРЛ) стехиометрического кристалла CdS №18 обусловлен излучательной аннигиляцией экситонов при непрямых переходах с рождением оптических фононов (рис. 8). В спектрах ИРЛ нестехиометрических кристаллов CdS № 1 и ZnS № 1 – № 3 преимущественной является дефектно - примесная люминесценция (рис. 8 – 9).

2. Определены пороговые уровни возбуждения ($G_{\text{пор}}$), соответствующие переходу спонтанной люминесценции в режим вынужденного излучения. Показано, что в реальных кристаллах CdS наблюдается конкуренция различных механизмов усиления (экситонного, межзонного и примесного). Реализация конкретного механизма, ответственного за генерацию стимулированного излучения в реальных кристаллах, зависит от типа и концентрации дефектов и уровня возбуждения. Установлена четкая корреляция между характеристиками спонтанной люминесценции CdS, измеренной при низких уровнях возбуждения, и характеристиками стимулированного излучения:

в кристалле CdS № 18 стимулированное излучение возникает при $G_{\text{пор}} \sim 1,56 \cdot 10^{26}$ см⁻³ · с⁻¹ и определяется излучательной аннигиляцией экситонов с рождением А - LO – фононов ($\lambda_m = 492,5$ нм). С увеличением уровня возбуждения линия А - LO насыщается и при $G_{\text{пор}} \sim 3,9 \cdot 10^{26}$ см⁻³ · с⁻¹ (концентрация электронно-дырочных пар $N_{e-h} \geq 4 \cdot 10^{17}$ см⁻³) основным каналом стимулированной люминесценции является аннигиляция электронно-дырочной плазмы;

в кристалле CdS №1, имеющим дополнительное оптическое поглощение вблизи края фундаментального поглощения, вынужденное излучение наблюдается в области максимума краевой полосы спонтанной люминесценции ($\lambda_m \sim 505$ нм, рис. 8) и предположительно возникает в результате излучательной ан-

нигиляции свободного экситона твердого раствора CdS(O) в кислородных скоплениях, присутствующих согласно [8], в матрице кристалла CdS.

в кристалле ZnS № 3 (CVD – технология), вынужденное излучение наблюдается на первом фоновом повторе свободного экситона ($\lambda_m = 330$ нм) при уровне возбуждения $G_{\text{пор}} \sim 4,6 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;

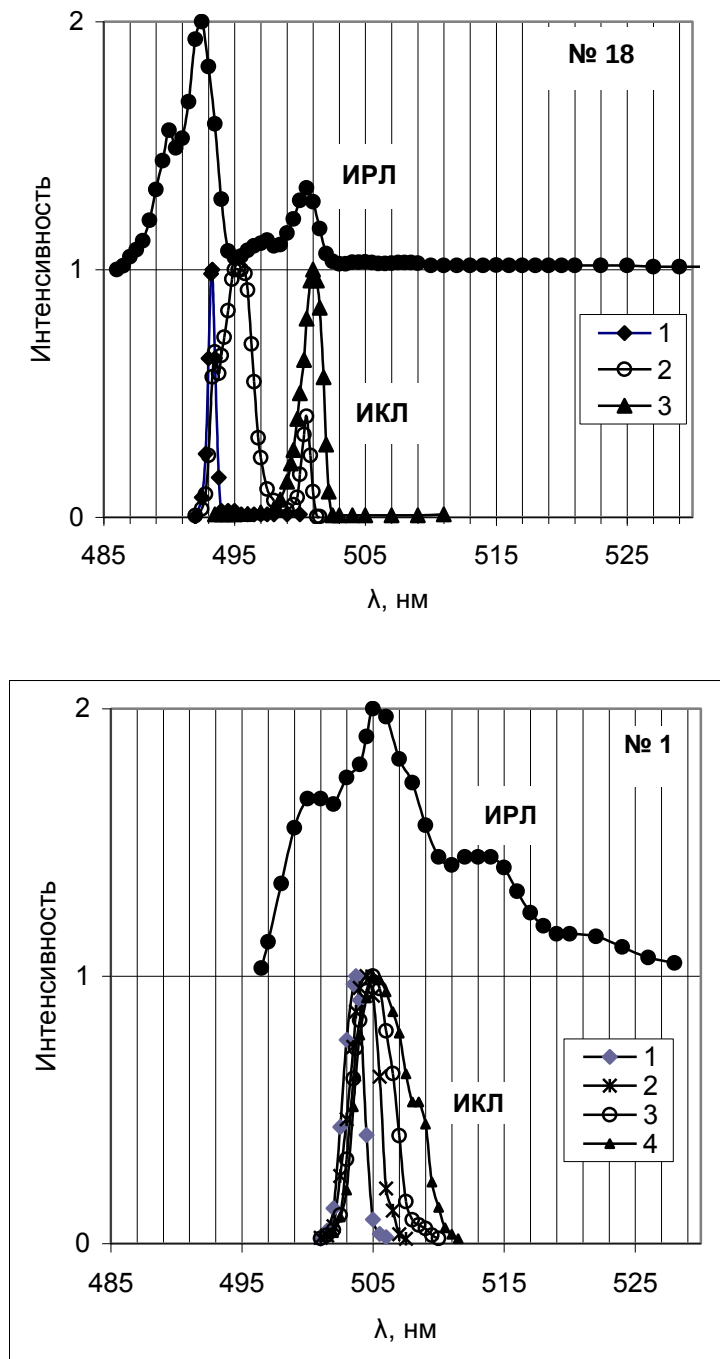


Рис. 8. Спектры спонтанной (ИРЛ) и стимулированной (ИКЛ) люминесценции кристаллов CdS № 18 и № 1: $T = 27$ К

1 – $G = 1,56 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$; 2 – $G = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;
3 – $G = 6,52 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$; 4 – $G = 7,8 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;
ИРЛ: $G \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;

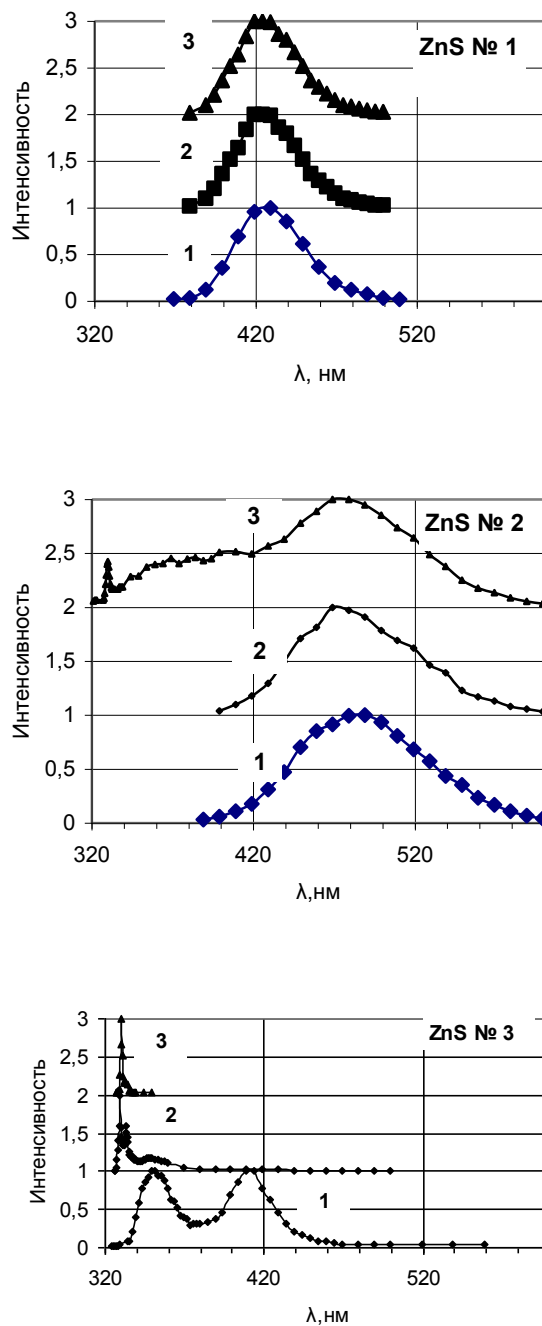


Рис. 9. Влияние уровня возбуждения на спектры люминесценции кристаллов ZnS различной предыстории № 1 - 3:
1 – (ИРЛ) $G \sim 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;
2 – (ИКЛ) $G = 0,9 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;
3 – (ИКЛ) $G = 4,6 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$; $T = 27$ К

в кристаллах ZnS № 1 и № 2, выращенных из расплава и имеющих высокую концентрацию глубоких центров, вынужденное излучение отсутствует при максимально возможном в эксперименте уровне возбуждения.

4. Сравнительный анализ спектров спонтанного и вынужденного излучения кристаллов CdS разной предыстории показывает, что для создания эффективных полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением необходимо использовать высокочистые кристаллы с низкой концентрацией глубоких центров или применять легированные образцы с высокой концентрацией ($\geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$) мелких акцепторных уровней.

5. Результаты изучения спектров ИКЛ, зависимости $G_{\text{пор}}$ от предыстории образцов положены в основу неразрушающего способа отбраковки монокристаллов A^2B^6 для приборов с электронным возбуждением.

Четвертая глава посвящена исследованию оптических и плазмодинамических характеристик плазмы образующейся при фокусировке СЭП на поверхность металлов и минералов. Особенностью такой плазмы является высокая удельная скорость энерговыделения $\sim 10^{14} \text{ Вт/см}^3$, что определяет широкие перспективы её применения. Цель исследований – выяснить возможность использования плазмы, образующейся при термическом взрыве мишеней мощным электронным пучком, в атомном спектральном анализе для контроля элементного состава твердых тел. Основные результаты, полученные в этом направлении исследований, заключаются в следующем.

Изучена пространственная структура электронного пучка в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600 (рис. 10). Установлено, что явление самофокусировки СЭП в вакуумном диоде ускорителя позволяет получить мгновенное значение потока энергии на поверхности исследуемых материалов $\sim 10^{12} \text{ Вт/см}^2$, реализовать термический взрыв твердых тел различных классов и сформировать сверхзвуковую плазменную струю.

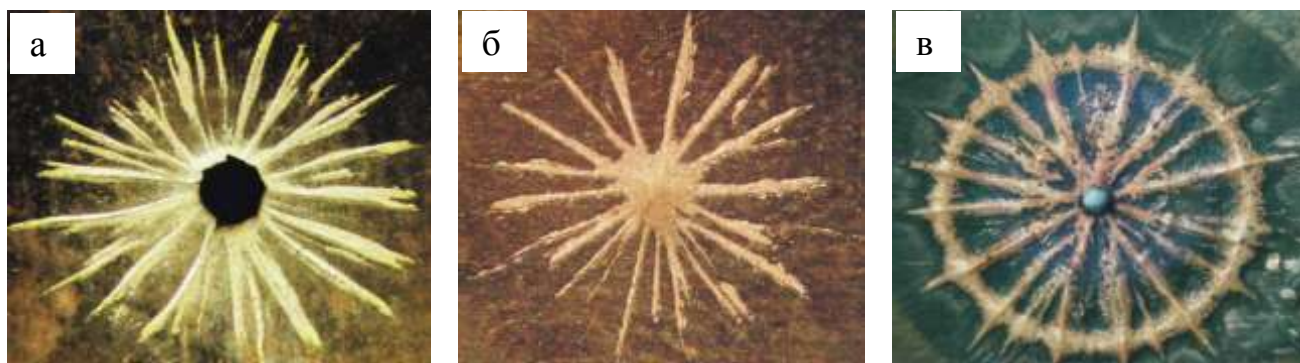


Рис. 10. Филаментация электронного пучка в опытах по фокусировке на ускорителе ГИН-600 (0,45 МэВ, 3 кА, 25 нс): а, б – фотографии эрозионных следов, образованных на поверхности латунного (а) и медного (б) анодов за один импульс ускорителя; в – многократное облучение медного анода. Диаметр фигур $\sim 8 \text{ мм}$

Установлено, что свободно расширяющийся в вакуум плазменный факел, имеющий высокую температуру, плотность и скорость, для аналитической практики интереса не представляет.

Изучены спектральные характеристики сверхзвукового плазменного потока, взаимодействующего с твердотельными преградами различной конфигурации. Показано, что при изменении геометрических параметров вакуумного диода (формы и размеров взрывоэмиссионного катода), можно получать различные излучающие плазмодинамические конфигурации. Выполнение катода электронного ускорителя в виде ударной трубы с соплом, позволяет затормозить сверхзвуковую плазменную струю и трансформировать ее кинетическую энергию в энергию ударно-сжатой плазмы и в широких пределах варьировать оптические характеристики плазменной струи истекающей из ударно-сжатой зоны, получать оптически плотные и оптически прозрачные плазменные среды с хорошими спектроаналитическими характеристиками. На рис. 11 приведен фрагмент спектра поглощения эрозионной плазмы галенита (а) и необходимый для расшифровки спектр испускания ртутной лампы ДРШ-250 (б).

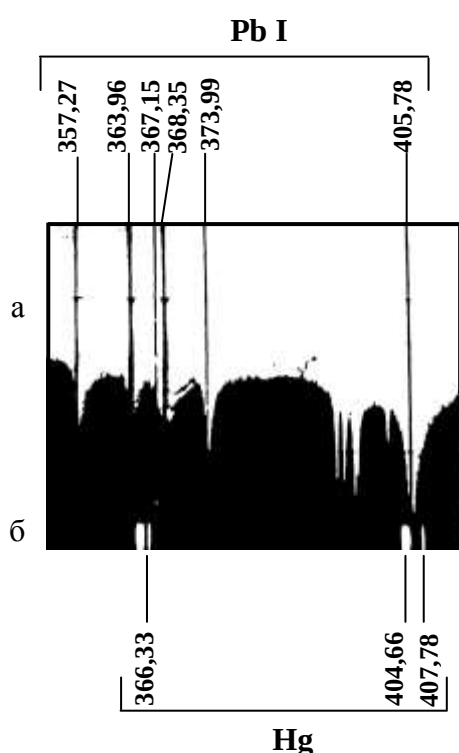


Рис. 11. Спектры поглощения эрозионной плазмы галенита (а) и испускания лампы ДРШ-250 (б)

Видно, что абсорбционные спектры хорошего качества, линии получаются узкими с хорошим разрешением. Анализ спектрограмм различных материалов показывает, что линии поглощения принадлежат в основном нейтральным и однократно ионизированным атомам с энергией возбуждения до 8 эВ. Например, CaI 422,67 (2,93); CaII 396,85 (3,12); 393,37 (3,15); CuI 327,4 (3,78); 324,75 (3,82); AgI 338,29 (3,66); 328,07 (3,78); PbI 405,78 (4,38); 373,99 (5,97); 368,35 (4,34); 357,27 (6,12); 283,31 (4,37); 282,32 (5,70); 280,2 нм (5,74 эВ). Наличие нескольких линий поглощения одного элемента позволяет проводить корреляционный анализ по всем этим линиям, что увеличивает достоверность обнаружения и идентификацию элемента. Линии поглощения имеют небольшую полуширину, что позволяет разрешать линии поглощения с разницей в десятые доли нанометра, например, линии MnI (403,08; 403,31; 403,45 нм) в спектре анодного факела стали. В данном варианте метода атомно-абсорбционного анализа отсутствует внешний источник зондирования плазмы, который необходим в традиционной схеме проведения абсорбционных измерений. Его роль выполняет ударная волна (имеющая сплошной спектр излучения), которая формируется в момент удара сверхзвуковой плазменной струи о дно полого катода. Начало зондирования определяется временем пролета плазменной струи до преграды и самосинхронизовано с моментом формирования слоя холодного атомного пара, прилегающего к ударно-сжатой зоне.

Разработан способ атомно-абсорбционного спектрального анализа элементного состава вещества и устройство для его осуществления.

В пятой главе приведены литературные данные по экспериментальным исследованиям импульсного инициирования и основным модельным представлениям о природе взрывного разложения АТМ под действием лазерных и электронных импульсов. В большинстве опубликованных работ предполагается, что механизм инициирования АТМ электронным пучком – нетермический (цепной) [9]. Основанием для этого являются экспериментальные данные, свидетельствующие о существовании "предвзрывных" процессов (предвзрывной люминесценции и предвзрывного оптического поглощения), протекающих в твердом теле до механического разрушения образца и наблюдающиеся после индукционного периода в течение ~ 1 мкс [10]. На основе анализа материала главы сформулированы цели и задачи исследований.

Шестая глава посвящена описанию экспериментальных результатов исследования кинетики взрывного разложения АТМ при возбуждении электронным пучком, электрическим разрядом, лазерным излучением и ударом микрочастиц. Цель исследований – установить первичный физический процесс, ответственный за инициирование реакции взрывного разложения АТМ внешним энергетическим импульсом. Основное внимание уделено выяснению физической природы взрыва, инициируемого электронным пучком. Варьирование плотности энергии СЭП в диапазоне $0,05 \div 0,2$ Дж/см² позволило реализовать два режима возбуждения ВВ – *допороговый*, при котором инициирование взрыва АТМ не происходит и наблюдается только ИКЛ твердого тела, и *надпороговый*, при котором развивается реакция быстрого химического разложения АТМ.

Изучены спектрально-кинетические характеристики ИКЛ поликристаллов азидов тяжелых металлов при уровнях возбуждения не превышающих порог инициирования взрыва. Установлено, что люминесценция AgN_3 , PbN_6 и TlN_3 при 300 К в интервале $1,5 \div 3,5$ эВ представлена слабо структурированным широкополосным спектром с временем затухания $\tau \leq 15$ нс, ограниченным с высокоэнергетической стороны краем фундаментального поглощения материала. В области спектра $h\nu < 1,5$ эВ наблюдается монотонный спад интенсивности свечения вплоть до границы спектральной чувствительности установки.

Для исследования кинетических характеристик взрывного свечения применялись две схемы измерения. Первая (рис. 12, а) позволяла одновременно с помощью двух фотоприемников регистрировать кинетику свечения и оптического пропускания продуктов взрывного разложения AgN_3 на заданном расстоянии от тыльной поверхности образца. Основная задача заключалась в том, чтобы отделить свечение плазмы от люминесценции образца и установить момент фазового перехода в исследуемом материале. Типичные кинетические характеристики свечения ($\lambda = 600$ нм) и оптического пропускания продуктов взрыва, полученные из зоны прилегающей к тыльной поверхности AgN_3 ($L_1 = L_2 = 0,2$ мм) и из зоны прилегающей к преграде ($L_1 = L_2 = 9$ мм), представлены на рис. 13, а, б, а измеренные при панорамном обзоре всей области разлета плазменного факела ограниченного преградой – на рис. 13, в.

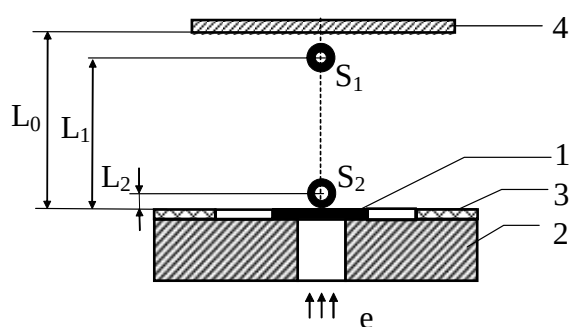


Рис. 12, а. Схема зондирования свечения и пропускания продуктов взрывного разложения AgN_3 ($\alpha = 90^\circ$): 1 — образец; 2 — коллиматор; 3 — экран; 4 — преграда; S_1 — площадь зондирования оптического пропускания; S_2 — площадь зондирования излучения

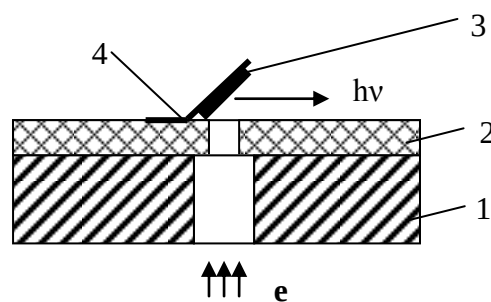


Рис. 12, б. Схема возбуждения и измерения люминесценции АТМ ($\alpha = 45^\circ$): 1 — анод, 2 — коллиматор, 3 — образец, 4 — держатель

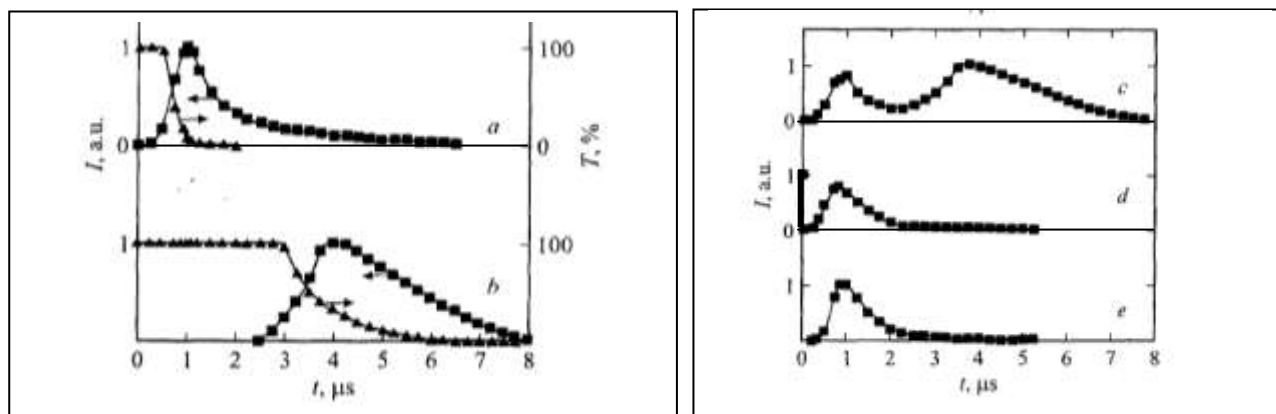


Рис. 13. Кинетические кривые свечения и пропускания, сопровождающих взрывное разложение AgN_3 при инициировании СЭП: а — из зоны прилегающей к тыльной поверхности образца ($L_1 = L_2 = 0,2$ мм); б — из зоны прилегающей к преграде ($L_1 = L_2 = 9$ мм); в — свечение, измеренное при панорамном обзоре области разлета продуктов взрыва

Начало координаты времени соответствует моменту возбуждения образца СЭП. Из осциллограмм представленных на рис. 13, а, б следует, что свечение и поглощение продуктов взрывного разложения начинаются с задержкой ($t_1 = t_2 + t_3$), где t_2 — индукционный период; t_3 — время распространения плазменного факела до области зондирования. Видно, что при $L_1 = 0,2$ мм время задержки составляет $\sim 300 \div 400$ нс, а при $L_1 = 9$ мм, $t_1 \sim 2,8 \div 3$ мкс.

Средняя скорость разлета продуктов взрыва, определенная из экспериментов составила $\sim 3,5 \cdot 10^3$ м/с.

Для получения полной кинетической кривой свечения, сопровождающего взрывное разложение AgN_3 , применялась схема зондирования свечения (рис. 12, б). Эта схема позволяла (без пространственного разрешения) регистрировать все виды свечения, инициируемые электронным пучком, со стороны облучаемой поверхности образца. Регистрировались осциллограммы свечения при различных условиях эксперимента. Одна из них (рис. 13, д) была получена при свободной облучаемой поверхности образца, вторая (рис. 13, е) — при воз-

буждении поверхности, закрытой тонкой ($d \sim 10$ мкм) алюминиевой фольгой. Фольга прозрачна для электронного пучка и не прозрачна для света. Сравнение осциллограмм свидетельствует о том, что в первом случае наблюдается два пика свечения: пик ИКЛ и следующий, с задержкой $\sim 0,2$ мкс. Во втором случае ИКЛ не наблюдается, так как излучение не выходит за пределы фольги, но следующий пик наблюдается, так как фольга разрывается продуктами взрывного разложения.

Приведенные выше факты однозначно свидетельствуют о плазменной природе инерционных пиков свечения и поглощения, формирующихся сразу после индукционного периода. Эти данные соответствуют теории взрывного разложения, согласно которой продукты взрыва в начальной его фазе представляют собой плотную, сжатую до давления $3 \cdot 10^{10}$ Па плазму, температура которой достигает $3500 \div 4500$ К [11]. Максимум интенсивности сплошного спектра такой плазмы должен находиться в области $\sim 700 \div 800$ нм. Именно в этом диапазоне длин волн расположен максимум свечения, который приписывается "предвзрывной" люминесценции, т.е. "холодному" свечению твердого тела [10]. Таким образом, существование предвзрывных явлений в АТМ не подтверждается, что ставит под сомнение цепные модели инициирования.

Анализ фундаментальных процессов, протекающих в диэлектриках и полупроводниках при облучении СЭП, позволяет предположить, что только один физический процесс может быть ответственен за образование очага химического разложения в АТМ – электрический пробой в поле инжектированного объемного заряда электронного пучка.

Для выяснения роли электрического пробоя в иницировании АТМ электронным пучком применялась схема эксперимента (рис. 14), позволяющая формировать электрическое поле с фронтом нарастания $\sim 10^{14}$ В/см·с, индуцировать электрический пробой в диэлектриках и полупроводниках различных классов, в том числе и АТМ, и изучать динамику сопутствующих этому явлению физико-химических процессов (свечение, разрушение, взрыв и др.) отдельно от процессов, развивающихся в области торможения электронного пучка. Установлено, что зарядка потенциального электрода электронным пучком ($H \geq 0,2$ Дж/см²) приводит к электрическому пробую монокристаллов и прессованных образцов азида серебра и иницированию взрыва. Кинетика взрывного свечения из зоны прилегающей к поверхности прессованного образца AgN_3 приведена на рис. 15. Первый пик свечения возникает синхронно с импульсом электронного пучка и связан со свечением AgN_3 в результате возбуждения электрическим разрядом, второй обусловлен свечением продуктов взрыва, формирующимся с задержкой относительно первого. При к.п.д. преобразования энергии СЭП в энергию электрического поля $1 \div 10\%$, энергетический порог иницирования АТМ электрическим разрядом находится в диапазоне $0,002 \div 0,02$ Дж. Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о том, что возникновение очагов химического разложения при иницировании АТМ электронным импульсом является результатом развития электрического пробоя, что подтверждается низким ($\leq 0,02$ Дж/см²) энергетическим порогом взрыва АТМ электрическим разрядом, индуцированным СЭП.

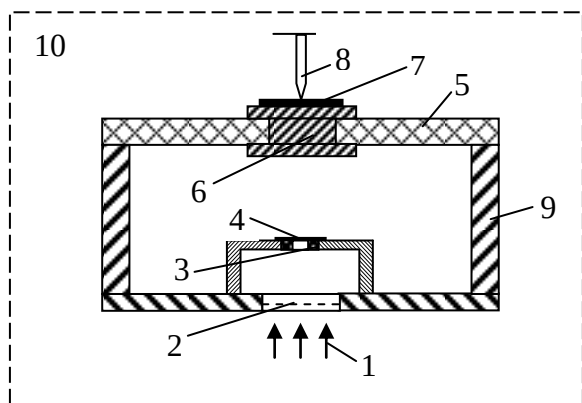


Рис. 14. Схема инициирования взрывного разложения АТМ электрическим разрядом, индуцированным СЭП: 1 – электронный пучок, 2 – анод, 3 – диафрагма, 4 – фольга, 5 – диэлектрический держатель, 6 – потенциальный электрод, 7 – образец АТМ, 8 – электрод "нулевой" (корпус), 9 – держатель 10 – вакуумная камера

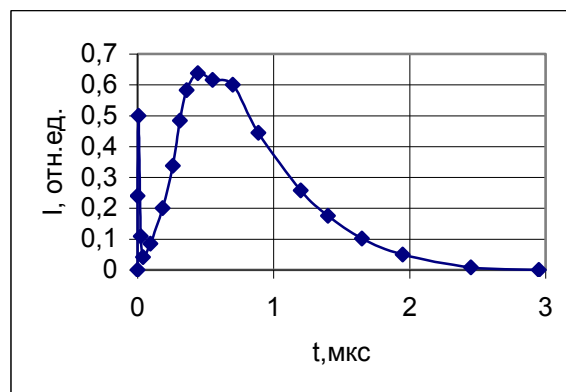


Рис. 15. Кинетика взрывного свечения пресованных образцов AgN_3 при инициировании электрическим разрядом, индуцированным электронным пучком:

($H = 0,2 \text{ Дж/см}^2$, $d = 400 \text{ мкм}$, $\lambda = 600 \text{ нм}$)

При инициировании взрыва излучением неодимового лазера ($\lambda = 1060 \text{ нм}$, $t \approx 20 \text{ нс}$) к концу индукционного периода в зоне лазерного воздействия возникает взрывное разложение ВВ, сопровождающееся короткой вспышкой свечения плотной низкотемпературной плазмы с временной структурой, идентичной в различных областях спектра (рис. 16). Такая структура указывает на то, что взрывное свечение является однокомпонентным, т.е. определяется одним физическим процессом. В противном случае максимумы сигналов, регистрируемых в различных областях спектра, должны быть разнесены во времени.

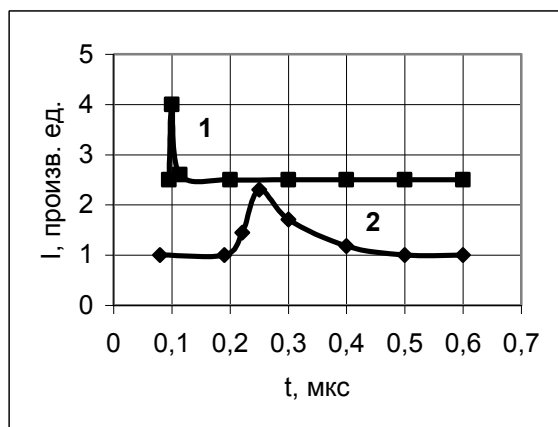


Рис 16. Осциллограмма свечения, сопровождающего взрывное разложение AgN_3 при лазерном инициировании взрыва: 1 – лазерный импульс; 2 – кинетика свечения в зоне лазерного воздействия

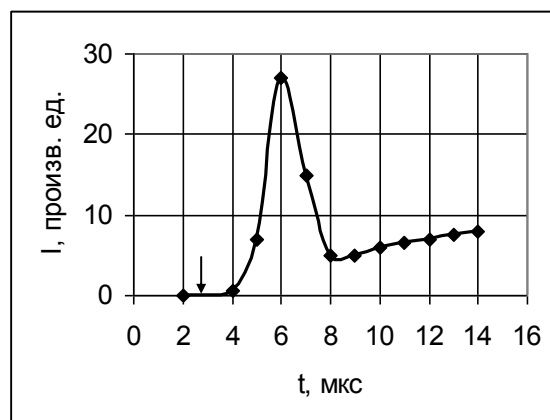


Рис 17. Осциллограмма свечения, сопровождающего взрывное разложение AgN_3 при инициировании ударом микрочастиц. Стрелкой показан момент удара

При инициировании АТМ ударом микрочастиц, их ускорение достигалось разгоном ударной волны (УВ), которую формировали в металлической пла-

стине детонацией ТЭНа. Налетающая микрочастица при ударе приводит к сжатию образца в области, равной диаметру частицы. Считая соударение соосным, можно найти начальное давление при ударе: $P = \rho_e \omega_e v / (1 + \rho_e \omega_e / \rho_p \omega_p)$, где v – скорость микрочастицы до удара; ρ_e – плотность и ω_e – скорость ударной волны, индекс (e) относится к ВВ (AgN_3) и индекс (p) – к микрочастице (Cd). При скорости микрочастицы 2000 м/с, давление в зоне взаимодействия с образцом составляет $\sim 10^{10}$ Па. На рис. 17 приведена кинетика свечения, сопровождающая процесс взрывного разложения AgN_3 при инициировании процесса ударом микрочастиц.

Приведенные результаты исследования кинетики взрывного разложения АТМ свидетельствуют о подобии развития процесса взрыва после воздействия на образец энергии лазерного и электронного импульсов, электрического разряда, а также удара микрочастиц. Единственным отличием является отсутствие люминесценции АТМ в момент импульса возбуждения при инициировании взрыва неодимовым лазером и микрочастицами, что связано со значительно меньшей (по сравнению с возбуждением электронным пучком и электрическим разрядом) концентрацией электронно-дырочных пар в объеме образца.

Общим для перечисленных видов воздействия является создание в микрообъеме вещества локальных импульсных напряжений с амплитудой $\sim 10^8 \div 10^{10}$ Па. Проведенные теоретические исследования показали, что деформация решетки кристалла азида серебра приводит к перераспределению электронной плотности в кристалле. С ростом деформации решетки происходит ослабление связи между атомами соседних анионов N_3^- . Очевидно, что результатом такого процесса должна быть реакция распада двух трехатомных ионов на три двухатомных N_2 с выделением энергии около 10 эВ. Высокая вероятность реализации совокупности таких актов, совмещенных в пространстве и времени, может быть обеспечена в результате кумуляции энергии внешнего импульса при всех рассмотренных видах энергетического воздействия. Образующийся при этом очаг может затем развиваться, объединяться с другими, обеспечивая необходимую скорость развития реакции для преобразования в волну детонации.

Седьмая глава работы посвящена описанию экспериментальных результатов исследования физико-химических процессов в ТЭНе при облучении СЭП. Основная задача этих исследований – изучить возможность инициирования взрыва бризантного ВВ мощным электронным пучком, измерить кинетику взрывного свечения ТЭНа и на основании полученных данных построить физическую модель инициирования ТЭНа электронным импульсом.

Приведены следующие экспериментальные данные и модельные представления о развитии взрыва в бризантных ВВ.

1. В спектрах импульсной катодолюминесценции поликристаллов ТЭНа при уровнях возбуждения не превышающих порог разрушения образца ($H \sim 0,05 \div 0,1$ Дж/см²) при $T = 300$ К обнаружены полосы свечения с максимумами при 3,1; 2,6 и 2,1 эВ. Длительность импульса люминесценции не превышает ~ 15 нс во всем спектральном интервале. Спектр безынерционного компонента при $T = 30$ К состоит из двух полос с максимумами при 3,1 и 2,5 эВ. Через 1 мс в спектре ИКЛ остается полоса с максимумом при 2,6 эВ.

2. При более высоких уровнях возбуждения ($H \geq 0,3$ Дж/см²) обнаружено образование на облучаемой поверхности прессованных образцов ТЭНа откольных разрушений (микрократеров). По мере увеличения плотности энергии СЭП в диапазоне $0,8 < H < 3$ Дж/см² происходит выброс продуктов абляции навстречу электронному пучку, в результате чего образец приобретает импульс в противоположном направлении – вдоль распространения электронного пучка. Средняя скорость микрочастиц, выбрасываемых из кратера, составляет ~ 500 м/с. Подобные процессы наблюдались и в инертных материалах (ЩГК).

3. Низкий порог инициирования газодинамических процессов в различных диэлектриках ($\Delta T \leq 30$ К) позволил предположить, что основная роль в газификации твердых тел при облучении электронным пучком принадлежит электрическому пробое, индуцированному СЭП. Для более детального исследования газодинамических процессов была изучена морфология разрушения и газификация монокристаллов ТЭНа размерами $500 \div 700$ мкм при облучении электронным пучком. Образец помещался в эпоксидную смолу, при этом толщина полимерного слоя над образцом не превышала 100 мкм (схема облучения "под прикрытием"). Установлено, что при $H \sim 0,5 \div 1$ Дж/см² наблюдается разрушение прикрывающей образец эпоксидной смолы и выброс отдельных фрагментов (или всего) микрокристалла (рис. 18, а) на облучаемую поверхность. На кромке образующегося кратера наблюдались следы оплавления эпоксидной смолы и появление темного слоя вследствие разогрева вещества до высокой температуры (рис. 18, б).

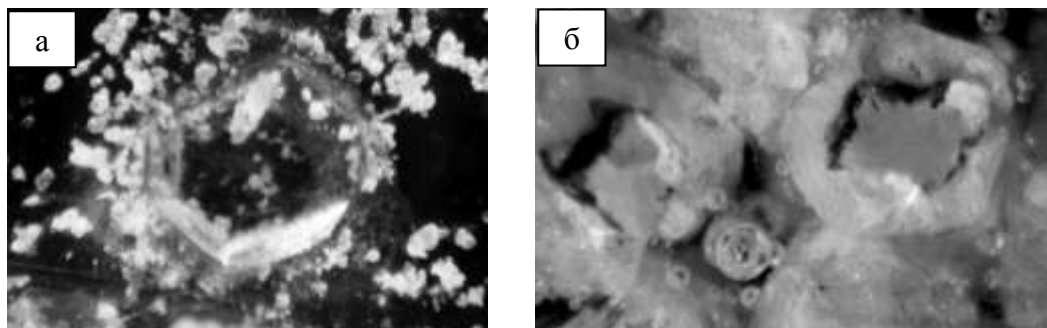


Рис. 18. Морфология разрушения микрокристаллов ТЭНа помещенных в эпоксидную смолу при облучении СЭП ($H = 0,8$ Дж/см²)

Такие же закономерности наблюдались и при облучении гексогена. Одновременно были проведены исследования на инертных материалах – LiF и KCl. Установлено, что, несмотря на развитие в LiF и окружающей его эпоксидной смоле электрических разрядов, вскрытие прикрывающего образец полимерного слоя не происходит. Эксперименты свидетельствуют о том, что химическая реакция в ТЭНе может быть запущена в микроочаге, но реакция не распространяется на окружающее очаг вещество и детонация не возникает.

4. Впервые осуществлена детонация прессованных образцов ТЭНа при возбуждении свободной (без прикрытия) поверхности ВВ сфокусированным электронным пучком. Определены порог инициирования детонации ТЭНа ($H \sim 60$ Дж/см²) и скорость детонации ($V_d \sim 10$ км/с). Установлено, что ампли-

туда давления на фронте ударной волны, формируемой взрывом ТЭНа в металлических оболочках, достигает $\sim 10^{10}$ Па, что приводит к отколу тыльной поверхности различных материалов (дюралюминий, сталь и др.).

5. Изучена физическая природа свечений, сопровождающих взрывное разложение прессованных образцов ТЭНа (рис. 19 – 20). Показано, что при облучении образцов электронным пучком с плотностью потока варьируемой в диапазоне $10^6 < q < 10^8$ Вт/см² основным видом свечения является импульсная катодолюминесценция (рис. 20, а). При $q \sim 10^9$ Вт/см² на заднем фронте ИКЛ появляется более инерционное свечение, связанное со свечением продуктов взрывного разложения ТЭНа, образующихся в зоне торможения СЭП (рис. 20, б, в). Детонационный пик свечения возникает при $q > 5 \cdot 10^9$ Вт/см² с задержкой относительно импульса СЭП на время $t_3 \sim 200 \div 300$ нс (рис. 19, б, в; рис. 20, г).

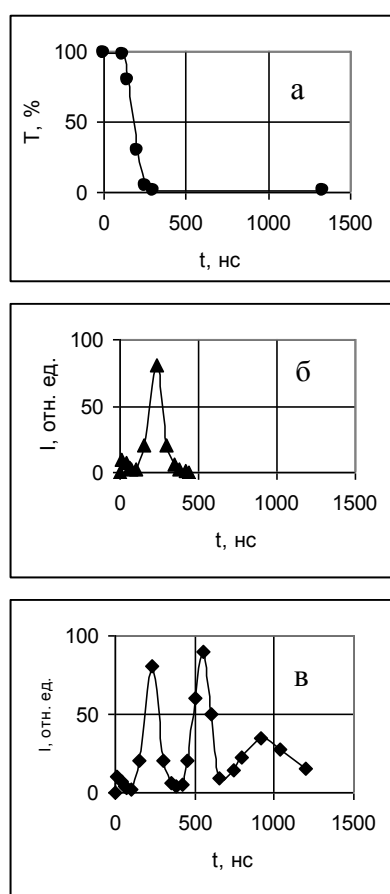


Рис. 19. Кинетики пропускания (а) и свечения (б, в) продуктов взрывного разложения ТЭНа: а, б – при свободном разлете продуктов взрыва; в – при наличии двух преград (геометрия возбуждения и регистрации $\alpha = 90^\circ$, см. рис. 12, а)

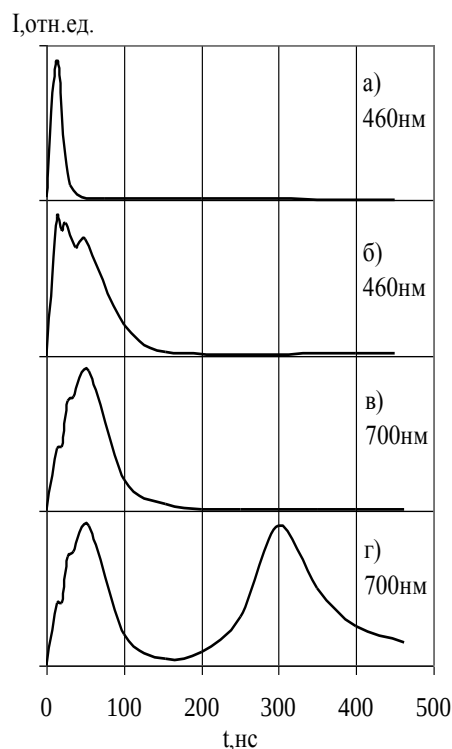


Рис. 20. Кинетики свечения, наблюдаемого с облучаемой поверхности ТЭНа (геометрия возбуждения и регистрации $\alpha = 45^\circ$, см. рис. 12, б): а – $10^6 < q < 10^8$ Вт/см²; б, в – $q \sim 10^9$ Вт/см²; г – $q > 5 \cdot 10^9$ Вт/см²

6. На основе анализа приведенных результатов предложена многостадийная модель инициирования ТЭНа электронным пучком, включающая ряд последовательных процессов: электрический пробой с образованием очагов химического разложения, диспергирование и газификацию образца в окрестности

микроочагов, образование макроочага в области торможения СЭП с последующим его развитием в детонационную волну.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Обнаружены и изучены пороговые процессы в твердых телах различных классов соединений при воздействии сильнофокусированных электронных пучков. Установлено, что одним из главных факторов, инициирующим катастрофические процессы в ионных кристаллических диэлектриках и полупроводниках, является кумуляция энергии СЭП в зонах локализации электрических разрядов.

В результате этого в диэлектриках и полупроводниках развиваются такие процессы, как *пластическая деформация, разрушение, плазмообразование, мощная электронная эмиссия и взрывное разложение энергетических материалов.*

Основные результаты исследования пороговых процессов, индуцированных СЭП в твердых телах, можно сформулировать в виде следующих пунктов.

1. Воздействие СЭП на ионные кристаллические диэлектрики и полупроводниковые соединения A^2B^6 приводит к формированию сильного электрического поля, нейтрализация которого осуществляется сверхзвуковыми анодными разрядами, удельная плотность мощности в которых может достигать 10^{12} Вт/см³.

Установлены следующие закономерности и особенности этого явления.

Показано, что за фронтом ионизации анодных разрядов в диэлектриках формируется плотная ионно-электронная плазма, излучающая сплошной спектр, а в полупроводниках – электронно-дырочная плазма. В монокристаллах CdS наблюдается генерация вынужденного излучения вдоль оси стримерного разряда в направлении его распространения. Обнаружено тушение стримерных разрядов в CdS импульсной катодолюминесценцией кристалла.

Обнаружена бесканальная форма электрического пробоя, развивающегося в ионных кристаллах в зоне торможения электронного пучка, проявляющаяся в эффекте накопления микроразрушений и появлении локальных зон пластической деформации.

Пространственное распределение каналов электрического пробоя и микрозон пластической деформации в ионных кристаллах и полупроводниках индивидуально для конкретного образца и определяется макродефектами технологического происхождения (границы блоков, преципитаты, поры и др.).

В электрически прочных диэлектриках (LiF, ПММА) электрический пробой реализуется в диапазоне плотностей энергии СЭП $0,2 \div 100$ Дж/см², развивается в момент импульса облучения и предшествует таким инерционным процессам, как разрушение и термическое испарение. Определены скорость развития и давление в каналах анодного разряда, образующегося в зоне торможения электронного пучка в ПММА ($v \sim 5 \cdot 10^7$ см/с, $P \sim 10^{11}$ Па).

Обнаружена мощная электронная эмиссия из канала электрического пробоя в твердом диэлектрике. Определены параметры эмиссионного тока ($I_m \sim 20$ А, $\tau \sim 2$ нс, $E_m = 40$ кэВ).

2. Установлены два главных фактора разрушающего воздействия СЭП на ионные кристаллы – ударные волны, генерируемые сверхзвуковыми анодными разрядами и акустические импульсы сжатия-растяжения, возникающие в твердом теле в результате мгновенного разогрева электронным пучком. Подтверждена акустическая природа формирования периодических структур разрушения в ЩГК, не зависимо от способа их инициирования (анодные разряды, индуцированные СЭП или акустические волны сжатия-растяжения, образующиеся в зоне торможения электронного пучка). Предполагается, что ПСР представляют собой диссипативную (самоорганизующуюся) структуру, образованную в результате вихревого пластического течения кристалла характерного для взрывного нагружения.

3. Установлена четкая корреляция между характеристиками низкотемпературной (25 К) спонтанной люминесценцией кристаллов CdS, измеренной при низких уровнях возбуждения и характеристиками стимулированного излучения. Определены пороговые уровни возбуждения, соответствующие переходу спонтанной люминесценции в режим вынужденного излучения. Показано, что в реальных кристаллах CdS при возбуждении СЭП наблюдается конкуренция различных механизмов стимулированного излучения – экситонного, межзонного и примесного. Вклад каждого из них определяется типом дефектно-примесных комплексов, их концентрацией и уровнем возбуждения кристалла.

4. Показано, что в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600, при использовании полого цилиндрического катода, происходит филаментация и самофокусировка электронного пучка при токе значительно меньшем, чем критический ток Альфвена. В зонах самофокусировки СЭП мгновенное значение электронного потока на поверхность исследуемой мишени достигает $\sim 10^{12}$ Вт/см², что приводит к термическому взрыву твердого тела и формированию сверхзвуковой эрозионной плазменной струи. Обнаружена тонкая структура эрозионного следа филаменты, что может быть связано с пульсацией эмиссионного тока с частотой $\nu \sim 2$ ГГц.

5. Подобраны условия и приемы, при которых возможно использование мощных электронных пучков в аналитической спектроскопии. Для реализации атомной спектроскопии, с испарением пробы мощным электронным пучком, необходимо преобразовать кинетическую энергию высокоскоростного плазменного потока в энергию ударно-сжатой плазмы и сформировать плазменную струю с изменяющимися вдоль направления её распространения газодинамическими и оптическими характеристиками.

6. Измерены спектрально-кинетические характеристики импульсной катодолюминесценции взрывчатых веществ – АТМ и ТЭНа в довзрывном режиме возбуждения электронным пучком. Показано, что люминесценция AgN₃, PbN₆ и TlN₃ при 300 К в интервале 1,5 ÷ 3,5 эВ представлена слабо структурированным широкополосным спектром с временем затухания $\tau \leq 15$ нс, ограниченным с высокоэнергетической стороны краем фундаментального поглощения материала. В спектрах катодолюминесценции ТЭНа (Т = 300 К) обнаружены полосы свечения с максимумами при 3,1; 2,6 и 2,1 эВ. Спектр безынерционного компо-

нента при $T = 30$ К состоит из двух полос с максимумами при 3,1 и 2,5 эВ и полуширинами $\sim 0,5$ эВ.

7. Установлена физическая природа взрывного свечения и поглощения, сопровождающих взрывное разложение АТМ при инициировании взрыва СЭП. Показано, что на пороге инициирования взрывное свечение АТМ определяется двумя физическими процессами – импульсной катодолюминесценцией твердого тела, которая наблюдается только в момент импульса облучения, и свечением продуктов взрывного разложения (плазмой), которое формируется после индукционного периода. Кинетика этого свечения определяется скоростью химического разложения АТМ и плазмодинамическими процессами, сопровождающими образование и разлет продуктов взрывного разложения. Наличие длинновременной компоненты люминесценции твердого тела, после индукционного периода, не подтверждается.

8. Исследовано инициирование АТМ анодным разрядом, индуцированным СЭП. Предложена экспериментально обоснованная физическая модель инициирования АТМ электронным пучком, ключевым моментом которой является кумуляция энергии электронного пучка в образце, вследствие развития анодного разряда. Предложенная модель подтверждается низким ($\leq 0,02$ Дж/см²) энергетическим порогом взрывного разложения АТМ электрическим разрядом, индуцированным СЭП.

9. Исследовано инициирование AgN_3 ускоренными до 2000 м/с микрочастицами кадмия ($d \sim 20$ мкм). Показано, что при ударе формируется давление $\sim 10^{10}$ Па, что приводит к инициированию взрыва образца. Предложена универсальная деформационная модель взрывного разложения АТМ, согласно которой инициирование возможно при локальной деформации образца в зонах кумуляции энергии внешнего энергетического импульса.

10. Впервые исследованы физико-химические процессы в бризантном взрывчатом веществе ТЭНе при облучении электронным пучком с варьируемой плотностью энергии в диапазоне $0,05 \div 100$ Дж/см². На основании экспериментальных данных предложена многостадийная модель инициирования детонации ТЭНа мощным электронным пучком, включающая инициирование электрического пробоя, диспергирование, газификацию и взрыв образца в зоне торможения высокоэнергетических электронов пучка с последующей детонацией всей массы взрывчатого вещества при достижении амплитуды ударной волны порогового значения.

11. Измерены параметры детонации цилиндрических зарядов ТЭНа насыпной плотности, помещенных в металлические оболочки. Установлено, что максимальная скорость детонации составляет 10 км/с. Давление на фронте ударной волны, формируемой взрывом ТЭНа в металлической оболочке, достигает $\sim 10^{10}$ Па и приводит к отколу тыльной поверхности различных материалов (дюралюминий, сталь и др.).

12. Показано, что для пороговых процессов, индуцированных СЭП в веществе, характерны явления самоорганизации системы, проявляющиеся в формировании упорядоченных структур: лучевой структуры электронного пучка, образующейся в плазме наносекундного электрического пробоя, периодической

кольцевой структуры разрушений в ЩГК, пространственно-периодической структуры электрического разряда в ионных и полупроводниковых кристаллах, кольцевой структуры вынужденного оптического излучения, идущего вдоль стримерного разряда в CdS.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лисицын В.М., Олешко В.И. Электрический пробой ЩГК при импульсном облучении сильноточными электронными пучками // Письма в ЖТФ. - 1983. - Т.9. - №1. - С. 15 - 18.
2. Лисицын В.М., Олешко В.И., Штанько В.Ф. Образование периодической структуры разрушений в NaCl под действием мощного пучка наносекундной длительности // Письма в ЖТФ. - 1985. - Т.11. - № 24. - С. 1478 - 1481.
3. Лисицын В.М., Олешко В.И., Штанько В.Ф. Кумуляция энергии сильноточных электронных пучков в твердом диэлектрике // ЖТФ. - 1985. - Т.55. - Вып. 9. - С. 1881.
4. Олешко В.И., Штанько В.Ф. Генерация сильных электрических полей в области пробега мощного электронного пучка в LiF // ЖТФ. - 1986. - Т. 56. - Вып. 6. - С. 1235 - 1236.
5. Олешко В.И., Штанько В.Ф. О природе возникновения периодических структур разрушения в ионных кристаллах, возбуждаемых мощным электронным пучком // ЖТФ. - 1987. - Т. 57. - Вып. 12. - С. 2401 - 2403.
6. Олешко В.И., Штанько В.Ф. О природе акустических волн, генерируемых в ионных кристаллах сильноточными электронными пучками // ЖТФ. - 1987. - Т. 57. - Вып. 9. - С. 1857 - 1858.
7. Олешко В.И., Штанько В.Ф. Спектрально-временные параметры свечения электрических разрядов в ионных кристаллах при воздействии СЭП // ЖТФ. - 1987. - Т. 57. - Вып. 9. - С. 1816 - 1818.
8. Лисицын В.М., Олешко В.И., Штанько В.Ф. Генерация света вдоль стримерного канала в CdS, возбуждаемая мощным электронным пучком // Тез. докл. 10 - Всесоюз. конф. по физике полупроводников, Минск, 1985. - Ч.3. - С.74.
9. Олешко В.И., Штанько В.Ф. Механизм разрушения высокоомных материалов под действием мощных электронных пучков наносекундной длительности // ФТТ. - 1987. - Т. 29. - Вып. 2. - С. 320 - 324.
10. Штанько В.Ф., Олешко В.И., Инякин В.Н. Пластическая деформация щелочно-галогенидных кристаллов, облученных плотным электронным пучком наносекундной длительности // ФХОМ. - 1988. - № 6. - С. 11 - 13.
11. Штанько В.Ф., Олешко В.И. Роль электрического поля объемного заряда в процессе преобразования энергии СЭП в ионных кристаллах // ЖТФ. - 1989. - Т.59. - Вып.3. - С. 99 - 105.
12. Олешко В.И., Штанько В.Ф. Эмиссия плотного электронного пучка из канала электрического пробоя в твердом диэлектрике // ЖТФ. - 1990. - Т.60. - Вып. 2. - С. 185 - 186.

13. Штанько В.Ф., Олешко В.И., Толмачев В.М. Динамические и остаточные напряжения в КСІ при воздействии импульсного электронного пучка // ФХОМ. - 1991. - № 2. - С. 53 - 56.
14. Штанько В.Ф., Олешко В.И., Намм А.В., Толмачев В.М., Терещенко Е.А. Импульсная катодолюминесценция CdS и $\text{CdS}_{0,83}\text{-Se}_{0,17}$, выращенных кристаллизацией из газовой фазы // ЖПС. - 1991. - Т. 55. - № 5. - С. 788 - 793.
15. Способ отбраковки кристаллов соединений A^2B^6 и их твердых растворов для приборов с электронным возбуждением. А.С. № 1639344 (СССР). Кл.Н 01 L 21/66 (1990). Штанько В.Ф., Олешко В.И., Толмачев В.М., Намм А.В.
16. Лазер с катодолюминесцентной накачкой // А.С. № 1683464 (СССР). Кл. Н01, S 3/093 (1991). Штанько В.Ф., Олешко В.И., Толмачев В.М.
17. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И. Применение сильноточных электронных пучков наносекундной длительности для контроля параметров твердых тел // Изв. Вузов. Физика. - 2000. - Т. 43, № 3. - С. 22 - 30.
18. Лисицын В.М., Штанько В.Ф., Олешко В.И. Импульсные катодолюминесцентные источники света / В сб. Материалы для источников света и светотехнических изделий. Саранск: Морд. ГУ. -1990. - С. 20 - 26
19. Олешко В.И., Вильчинская С.С., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Морозова Н.К. Низкотемпературная люминесценция сульфида кадмия при низких и высоких уровнях возбуждения // Изв. Вузов. Физика. - 2008. - Т. 51, № 11/3 - С. 101 - 106.
20. Морозова Н.К., Каретников И.А., Голуб К.В., Данилевич Н.Д., Лисицын В.М., Олешко В.И. Влияние кислорода на электронную структуру ZnS // ФТП. -2005. - Т. 39, № 5. - С. 513 - 520.
21. Морозова Н.К., Мидерос Д.А., Каретников И.А., Олешко В.И., Лисицын В.М., Вильчинская С.С. Характеристика полос люминесценции ZnS(O) и ZnSe(O) с позиции теории непересекающихся зон / Доклады 38 межд. научн.-техн. сем. «Шумовые и деградац. процессы в полупроводниковых приборах» (Москва 27-28 ноября 2007 г.) М.: МЭИ, 2008. С. 143 - 148.
22. V.M. Lisitsyn, V.I. Korepanov, V.I. Oleshko, V.P. Tsipilev. Luminescence of azides heavy metal under elecyrone excitation // III Ural Workshop on Advantaged Scintillation and Storage Optical Materials. Program and Abstracts. Ekaterinburg: USTU-UI. - 2002. - С.33
23. Олешко В.И., Корепанов В.И. Атомный спектральный анализ твердых тел с применением импульсных сильноточных ускорителей электронов / Материалы 10-ой международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов. Томск. 1999, С. 201 - 203.
24. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Штанько В.Ф. Атомный абсорбционный анализ металлов и горных пород с использованием электронно-пучкового атомизатора /Твердотельные детекторы ионизирующих излучений. Труды 1 всероссийского симпозиума ТТД-97.-Екатеринбург. - 1998. С.140 - 147.
25. Способ атомно-абсорбционного спектрального анализа элементного состава вещества и устройство для его осуществления // Патент № 2157988 Россия. МКИ G01N 21/62. В.И. Корепанов, В.М. Лисицын, В.И. Олешко. Оpubл. 20.10.2000, Бюл. № 29.

26. Способ спектрального люминесцентного анализа // Патент № 2231774.
27. 06. 2004 г. В.М. Лисицын, В.И. Корепанов, Л.А., Лисицына, В.И.Олешко, Е.Ф.Полисадова.
27. Способ геохимических поисков залежей нефти и газа // Патент № 2303280 от 20. 07. 2007 г. В.И. Олешко, И.С. Соболев, В.М. Лисицын, Л.П. Рихванов, В.И. Корепанов.
28. V.M. Lisitsyn, V.I. Korepanov, V.I. Oleshko. Luminescence of semiconducting material under x-ray excitation // III Ural Workshop on Advantaged Scintillation and Storage Optical Materials. Program and Abstracts. Ekaterinburg: USTU-UPI.-2002. - С. 33
29. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. Импульсная катодолюминесценция азидов тяжелых металлов // Письма в ЖТФ. - 2002. - Т. 28. - № 24. - С. 48 - 52.
30. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. Исследование пространственно-временной структуры плазмы, образующейся при взрывном разложении AgN_3 / Труды третьей международной конференции «Радиационные термические эффекты и процессы в неорганических материалах». – Томск. - 2002. - С. 130 - 132.
31. Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. О физической природе свечения и поглощения, сопровождающих взрывное разложение азидов тяжелых металлов // Письма в ЖТФ. - 2004. - Т. 30. - № 22. - С.17 - 22.
32. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. Закономерности взрывного свечения азидов тяжелых металлов при импульсном инициировании лазерным и электронным пучками // Физика горения и взрыва. - 2004. - Т. 40. - № 5. - С.126 - 128.
33. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. К вопросу о кинетике и механизмах взрывного разложения азидов тяжелых металлов // Физика горения и взрыва. - 2006. - Т. 42. - № 1. - С. 106 - 119.
34. Ципилев В.П., Лисицын В.М., Корепанов В.И., Олешко В.И., Яковлев А.Н. К вопросу о предвзрывных явлениях, порогах и критериях инициирования азидов тяжелых металлов внешним импульсом / Материалы III Всероссийской конференции «Энергетические конденсированные системы» Черноголовка-Москва, М.: Янус-К, 2006 г. С.77 - 79.
35. Олешко В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. Инициирование взрыва азида серебра ударом микрочастицы /Труды IV Международной научной конференции "Радиационно - термические эффекты и процессы в неорганических материалах "Томск: Изд. ТПУ, 2004. С. 202 - 205.
36. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П., Яковлев А.Н. Инициирование азидов тяжелых металлов внешним импульсом / Забабихинские научные чтения: сборник материалов IX Межд. конф. 10-14 сентября 2007. - Снежинск: Изд. РФЯЦ-ВНИИТФ Секция 2. Взрывные и детонационные явления. С. 88 - 89.
37. Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. Первичные процессы взрывного разложения азидов тяжелых металлов при импульсном воздействии // Изв. вузов. Физика. - 2005. - Т. 48. - № 2. - С. 3 -10.

38. Лисицын В.М., Журавлев Ю.Н., Олешко В.И., Федоров Д.Г., Ципилев В.П. Начальные процессы взрывного разложения азидов тяжелых металлов // Химическая физика. - 2006. - Т. 25. - С. 59 – 64.
39. Лисицын В.М., Журавлев Ю.Н., Олешко В.И., Федоров Д.Г., Ципилев В.П. Деформационный механизм взрывного разложения азидов тяжелых металлов при импульсном воздействии // Химия высоких энергий. - 2006. - Т. 40. - № 4, - С. 259 - 264.
40. Олешко В.И. Инициирование взрыва азидов тяжелых металлов анодным стримерным разрядом, индуцированным электронным пучком // Изв. Вузов. Физика. - 2008. - Т. 51, № 11/3. - С. 56 - 60.
41. Олешко В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. Физическая модель инициирования АТМ электронным пучком / Материалы VI Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» Томск: Изд. ТГУ, 2008. С.159 - 160.
42. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. Инициирование детонации ТЭНа мощным электронным пучком // Письма ЖТФ. - 2003. - Т. 29. - Вып. 16. - С. 23 - 28.
43. Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. Разрушение и газификация тэна при облучении электронным пучком. Забабахинские научные чтения: сборник материалов IX Межд. конф. 10 - 14 сентября 2007. - Снежинск: Изд. РФЯЦ – ВНИИТФ Секция 2. Взрывные и детонационные явления. С. 58 - 59.
44. V.I. Oleshko, V.I. Korepanov, V.M. Lisitsyn., V.P. Tsypilev. The threshold phenomena in pentaerythritol tetranitrate initiated by powerful electron beam. Изв. вузов. Физика. - 2006. - Т. 49. - № 10. Приложение. - С. 204 - 207.
45. Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. О природе свечения, возникающего при облучении тетранитропентаэритрита электронным пучком // Физика горения и взрыва. - 2007. - Т. 43. - № 5. - С. 87 - 89.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. - 704 с.
2. Богданкевич О.В., Дарзбек С.А., Елисеев П.Г. Полупроводниковые лазеры. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1976. - 416 с.
3. Высокоэнергетическая электроника твердого тела / Под ред. Д. И. Вайсбурда. - Новосибирск: Наука, 1982. - 237 с.
4. Рябых С.М., Сафонов Ю.Н. Разложение азидов серебра импульсами электронов наносекундной длительности / В кн. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Новосибирск: «НАУКА» 1983. - С. 73 - 80.
5. Вайсбурд Д.И., Месяц Г.А. Сильноточные электронные ускорители. Физика мощных радиационных воздействий // Вестник АН СССР. - 1983. - № 1. - С.62.
6. Бойко В.И., Скворцов В.А., Фортов В.Е. и др. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. М.: «ФИЗМАТЛИТ», 2003. - 288 с.
7. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург. УрО РАН, 2000.-258 с.

8. Морозова Н.К., Морозов А.В., Каретников И.А. и др. Влияние контролируемого изменения собственных точечных дефектов и кислорода на оптические свойства сульфида кадмия // ФТП. - 1994. - Т. 28. - С. 1699 - 1713.
9. Рябых С.М. Возбуждение взрыва инициирующих взрывчатых веществ излучением / В кн. Актуальные проблемы фото- и радиационной физико-химии твердых кристаллических неорганических веществ. - Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. - 327 с.
10. Захаров Ю. А. и др. Предвзрывные явления в азидах тяжелых металлов / Захаров Ю. А., Алукер Э. Д., Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Кречетов А. Г. -М.: ЦЭИ «Химмаш», 2002. - 116 с.
11. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ /Под редакцией В.К. Боболева. М.: «МИР», 1973. - 352 с.