

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Нгуен Ван Ву

ГЕНЕРАЦИЯ САМОСФОКУСИРОВАННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1.3.18 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Томск – 2023

Работа выполнена в Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Олешко Владимир Иванович

Доктор физико-математических наук, профессор
отделения материаловедения Инженерной школы
новых производственных технологий ФГАОУ ВО
НИ ТПУ, г. Томск

Официальные оппоненты:

Ломаев Михаил Иванович

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник Института
сильноточной электроники Сибирского
отделения Российской академии наук, г. Томск

Лисицына Людмила Александровна

доктор физико-математических наук, профессор
федерального государственного бюджетного об-
разовательного учреждения высшего
образования (ФГБОУ) ВО «Томский
государственный архитектурно-строительный
университет», г. Томск

Защита состоится «12» декабря 2023 г. в «14.00» на заседании диссертационного совета МДС.ТПУ.07 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 2, стр. 4, ауд. 326.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Беллинского 53а и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МДС.ТПУ.07
кандидат физико-математических наук



Иванова А. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Действие ионизирующих излучений на твердые тела изучают в связи с необходимостью создания стойких к радиации материалов для ядерной и термоядерной энергетики, развития радиационных технологий и методов радиационного контроля материалов.

В Институте сильноточной электроники СО АН СССР был разработан импульсный сильноточный ускоритель электронов ГИН-600 (400 кэВ, 2 кА, 20 нс). Ускоритель генерирует сильноточный электронный пучок (СЭП) с плотностью энергии $H \sim (0.1-1)$ Дж/см² и плотностью мощности ($10^6-5 \cdot 10^8$) Вт/см² [1].

В настоящее время СЭП с такими параметрами используются в радиационной физике и химии твердого тела, для диагностики люминофоров, природных и искусственных кристаллов [2,3].

В последнее время появились новые задачи, требующие более высоких плотностей мощности электронных пучков (10^9-10^{10}) Вт/см². К ним можно отнести разработку методов электронно-пучковой абляции (по аналогии с лазерной абляцией) с целью получения частиц нано- и микрометрового размера, напыления тонких пленок и покрытий, изучение структурных и химических превращений в материалах, обусловленных высокой плотностью энергии пучка. Некоторые из перечисленных выше задач были решены с помощью ускорителей электронов с плотностью мощности до 10^{12} Вт/см² (1 МэВ; 1 МА; 100 нс) [4]. Однако при этом возникает ряд проблем, препятствующих реализации поставленных выше задач. Генераторы релятивистских электронных пучков (РЭП) с указанными выше параметрами являются крупногабаритными установками, требующими специальных помещений, радиационной защиты экспериментаторов, высокочувствительного оборудования и оптических элементов, подвергающихся мощному радиационному воздействию и значительных финансовых затрат. Одним из перспективных подходов к решению этих проблем – применение явления самофокусировки СЭП в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600. Первые эксперименты в этом направлении были проведены в [5]. Однако закономерности формирования самософокусированных электронных пучков в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600 и их взаимодействие с твердыми телами различных классов практически не изучены, что требует проведения специальных исследований. Актуальность такой работы представляется высокой, имеющей важное практическое значение.

Степень разработанности темы. Процессы и явления, которые рассматриваются в диссертационной работе, носят междисциплинарный характер и охватывают генерацию высокоинтенсивных (10^9-10^{11}) Вт/см² самофокусированных электронных пучков в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600 и их взаимодействие с твердыми телами различных классов с акцентом на поведение вещества в экстремальных условиях, приводящих к формированию ударных волн, фазовым и химическим превращениям. Эти две задачи, генерация мощных электронных пучков и исследование физических свойств твердых тел в экстремальных условиях, взаимосвязаны. Быстровременные, стохастические явления филаментации и самофокусировки СЭП могут быть изучены в основном по результатам их взаимодей-

ствия с конденсированными средами, «автографам» электронного пучка. Их совместное рассмотрение открывает новые перспективы для экспериментального и теоретического изучения как быстропротекающих процессов кумуляции (самофокусировки) энергии СЭП, так и физических свойств материалов в условиях мощных радиационных воздействий.

Цель работы. Изучить явления филаментации и самофокусировки электронного пучка в диоде ускорителя ГИН-600 с током ~ 2 кА в форвакуумной области давлений. Получить электронные пучки с плотностью мощности (10^9 – 10^{10}) Вт/см², превышающей порог сублимации материалов и исследовать физико-химические процессы, развивающиеся в твердых телах различных классов при облучении электронными пучками высокой интенсивности.

Для достижения цели требовалось решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие гипотезы о механизмах филаментации и самофокусировки электронных пучков в вакуумных диодах импульсных сильноточных ускорителей электронов с различными параметрами.

2. Провести анализ теоретических и экспериментальных работ, посвященных изучению свойств твердых тел при воздействии СЭП с плотностью мощности (10^7 – 10^{11}) Вт/см².

3. Изучить явления филаментации и самофокусировки СЭП в диоде ускорителя ГИН-600 в области давлений (0,05–0,3) Торр и определить оптимальные для самофокусировки геометрические параметры диода.

4. Определить параметры самосфокусированного сильноточного электронного пучка (ССЭП), выведенного за анод вакуумного диода.

5. Изучить морфологию разрушения и свечение полимеров (полиметилметакрилат, поликарбонат, винипроз) при облучении СЭП умеренной и высокой интенсивности.

6. Предложить физические модели явлений филаментации и самофокусировки электронного пучка в диоде ускорителя ГИН-600 на основе полученных экспериментальных результатов и теоретического анализа литературных данных.

7. Изучить возможность применения самосфокусированных сильноточных электронных пучков в электронно-пучковых технологиях.

Объекты исследования.

Объекты исследований выбирались исходя из поставленных задач: необходимостью определения параметров самофокусирующегося сильноточного электронного пучка и выяснения особенностей взаимодействия электронных пучков высокой интенсивности с различными материалами. В экспериментах были использованы металлы (Al, Cu, W, Ti, Pb, латунь), полимеры (полиметилметакрилат (ПММА), винипроз (ВП), полиэтилен (ПЭ), поликарбонат (ПК) и полупроводниковый кристалл - селенид цинка с примесью кислорода ZnSe(O)).

Предмет исследования.

- Явления филаментации и самофокусировки СЭП в вакуумном диоде электронного ускорителя ГИН-600 с током менее 2 кА.
- Физические процессы и явления, развивающиеся в конденсированных средах при воздействии электронных пучков умеренной и высокой интенсивности (абляция, ударные волны, фазовые переходы).

Научная новизна исследований:

1. Впервые показано, что в диоде ускорителя ГИН-600 (300 кВ, 2 кА, 12 нс) при малых (3–4) мм катод – анодных зазорах в форвакуумной области давлений (0,05–0,2) Торр в результате ускорения электронов на фронте ветвящегося анодо-направленного стримера в фазе переключения разрядного промежутка формируются филаментированные электронные микропучки (убегающие электроны) с энергией (50–100) кэВ и плотностью мощности до 10^{10} Вт/см². Применение полого цилиндрического катода приводит к самофокусировке электронных микропучков в центральное пятно диаметром ~ 1 мм со скоростью $\sim 1,5$ мм/нс, вследствие образования вблизи катода, не скомпенсированного положительного заряда, который играет роль виртуального анода, фокусирующего электронные микропучки, распространяющиеся по направлению к аноду.

2. Впервые определены параметры самософокусированного сильноточного электронного пучка, выведенного в пространство за анодом. Установлено, что за анодом регистрируются электронные пучки с различными параметрами: низкоэнергетический самософокусированный электронный пучок с плотностью мощности до 10^{10} Вт/см² и энергией (50–100) кэВ распространяющийся вдоль оси вакуумного диода и распадающийся на расстоянии $\sim (10-13)$ мм от поверхности анода и высокоэнергетический электронный пучок с плотностью мощности $\sim 2 \cdot 10^7$ Вт/см² и энергией электронов ~ 290 кэВ, расположенный на периферии самософокусированного пучка.

3. Впервые показано, что воздействие микроструктурированного самофокусирующегося электронного пучка на полиметилметакрилат с плотностью мощности вблизи (ниже) порога абляции приводит к локальному нагреву среды и появлению газообразных веществ, давление которых вызывает упругопластическую деформацию, после релаксации которой остается необратимая пластическая деформация, проявляющаяся в виде микропузырьков, размерами (10–50) мкм, локализованных на каналах электрического пробоя в приповерхностной области образца на глубине (40–80) мкм. При плотности мощности электронного пучка выше порога абляции полиметилметакрилата происходит выброс плазмы и жидких капель из кратера с формированием на поверхности образца «короны» из полимерных нитей.

4. Обнаружено, что воздействие самософокусированного электронного пучка на монокристаллы ZnSe (O) и Pb с плотностью мощности превышающей порог режима абляции вещества, приводит к выбросу плазмы из кратера и формированию на алюминиевой подложке нанокристаллов селенида цинка со структурой сфалерита размерами (2–12) нм и наночастиц свинца размерами (25–60) нм.

Научная значимость работы определяется новыми данными, полученными о явлениях филаментации и самофокусировки электронных пучков в диоде электронного ускорителя ГИН-600 с холодным взрывоэмиссионным полым цилиндрическим катодом в форвакуумной области давлений и процессах, развивающихся в конденсированных средах при облучении высокоинтенсивными электронными пучками.

Практическая значимость. Сильноточные электронные пучки с энергией единицы джоулей и плотностью мощности (10^9 – 10^{10}) Вт/см² могут быть использо-

ваны для решения широкого круга современных научно-технологических проблем, таких как:

- Кумуляция энергии в конденсированных средах с целью достижения экстремальных состояний вещества.
- Электронно-пучковая абляция твердых тел и ее применение в нанотехнологиях для получения полупроводниковых нанокристаллов, частиц нано- и микрометрового размера, металлических и полимерных покрытий и полимерных нитей.
- Разработка методов радиационного контроля конденсированных веществ.
- Моделирование быстропротекающих теплофизических процессов с фазовыми превращениями в конденсированных средах, в том числе в энергетических материалах низкой чувствительности.
- Создание точечных (до ~ 1 мм) источников тормозного и характеристического рентгеновского излучения.

Методология и методы исследования.

Методологической основой диссертационного исследования являются общенаучные и специальные методы, применяемые в области физики пучков заряженных частиц и радиационной физики твердого тела. Для исследований явлений филаментации и самофокусировки электронного пучка в вакуумном диоде использовался импульсный ускоритель электронов ГИН-600 (300 кэВ, 15 нс, 2 кА). Плотность энергии на поверхности облучаемых мишеней в зависимости от задачи варьировалась от 0,1 до 100 Дж/см². Пространственная структура самофокусирующегося электронного пучка регистрировалась по следам разрушений (автографам пучка), образующихся в металлических и полимерных мишенях. Морфология объемных разрушений и продукты абляции полимеров регистрировались после импульса облучения зеркальной цифровой фотокамерой SONY DSLR-A500 через микроскоп МБС-10 и микровизором проходящего света μ Vizo-101с пространственным разрешением ~ 1 мкм. Ток пучка электронов измерялся с помощью коллектора с волновым сопротивлением 50 Ом. Для регистрации сигналов с коллектора использовался цифровой осциллограф DPO 3034 (300 МГц). Временное разрешение системы регистрации ~ 1 нс. Спектры люминесценции диэлектриков и полупроводников, а также спектры свечения эрозионной плазмы регистрировались за один импульс возбуждения (режим «спектр за импульс») с помощью оптоволоконного спектрометра типа AvaSpec-ULS2048L. Спектральный интервал измерений 200–1100 нм, спектральное разрешение $\sim 1,5$ нм. Импульс давления, возникающий в объеме алюминиевой мишени, регистрировался акустическим датчиком с временным разрешением ~ 10 нс. Продукты абляции, образующиеся при испарении твердых тел и элементный состав поверхности латуни после облучения, исследовались с помощью растровой и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения.

Защищаемые положения.

1. Показано, что в диоде ускорителя ГИН-600 (300 кВ, 2 кА, 12 нс) при малых (3–4) мм катод – анодных зазорах в форвакуумной области давлений (0,05–0,2) Торр в результате ускорения электронов на фронте ветвящегося анодонаправленного стримера в фазе перемигания разрядного промежутка формируются филаментированные электронные микропучки (убегающие электроны) с энергией

(50-100) кэВ и плотностью мощности до 10^{10} Вт/см². Применение полого цилиндрического катода приводит к самофокусировке электронных микропучков в центральное пятно диаметром ~ 1 мм со скоростью $\sim 1,5$ мм/нс, вследствие образования вблизи катода не скомпенсированного положительного заряда, который играет роль виртуального анода, фокусирующего электронные микропучки, распространяющиеся по направлению к аноду.

2. При выводе самософокусированного электронного пучка через отверстие в аноде в пространстве за анодом регистрируются электронные пучки с различными параметрами: низкоэнергетический самософокусированный электронный пучок с плотностью мощности до 10^{10} Вт/см² и энергией (50–100) кэВ распространяющийся вдоль оси вакуумного диода и распадающийся на расстоянии $\sim (10-13)$ мм от поверхности анода и высокоэнергетический электронный пучок с плотностью мощности $\sim 2 \cdot 10^7$ Вт/см² и энергией электронов ~ 290 кэВ, расположенный на периферии самософокусированного пучка.

3. Воздействие микроструктурированного самофокусирующегося электронного пучка на полиметилметакрилат с плотностью мощности вблизи (ниже) порога абляции приводит к локальному нагреву среды, появлению газообразных веществ, давление которых вызывает упругопластическую деформацию после релаксации которой остается необратимая пластическая деформация, проявляющаяся в виде микропузырьков, размерами (10–50) мкм, локализованных на каналах электрического пробоя на глубине (40–80) мкм. При плотности мощности электронного пучка выше порога абляции полиметилметакрилата происходит выброс плазмы и жидких капель из кратера с формированием на поверхности образца «короны» из полимерных нитей.

4. Воздействие самософокусированного электронного пучка на монокристаллы ZnSe (O) и свинец с плотностью мощности превышающей порог режима абляции вещества, приводит к выбросу плазмы из кратера и формированию на алюминиевой подложке нанокристаллов селенида цинка со структурой сфалерита размерами (2–12) нм и наночастиц свинца размерами (25–60) нм.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность результатов, изложенных в диссертации, определяется их взаимной согласованностью и воспроизводимостью, отсутствием принципиальных противоречий с результатами других авторов, использованием современного экспериментального и аналитического оборудования.

Личный вклад автора. Постановка цели и задач исследования были выполнены совместно с научным руководителем. Расчёты и измерения, были выполнены лично или при участии автора в лабораториях отделения материаловедения ИШНПТ ТПУ. Обработка и анализ результатов исследований, формулировка основных защищаемых положений и выводов выполнены лично автором.

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2019» 22–24 мая 2019 г., г. Томск; XIV Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров – AMPL-2019, 15-20 сентября 2019 г., г. Томск; XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых уче-

ных “Перспективы развития фундаментальных наук”, 21-24 апреля 2020 г., г. Томск; The 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), September 14-26, 2020, Tomsk. XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Перспективы развития фундаментальных наук”, 27-30 апреля 2021 г., г. Томск.

Публикации. Представленные в настоящей диссертации результаты опубликованы в 9 работах: 3 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (из них 2 статьи в журналах, индексируемых Scopus); 1 статья в сборнике трудов по материалам конференции, индексируемом Scopus; 5 тезисов докладов в сборниках материалов научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 151 наименований. Материал изложен на 185 страницах, содержит 89 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены защищаемые положения, отображена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации в котором приведены существующие механизмы самофокусировки и филаментации сильнооточных электронных пучков в вакуумных диодах, рассмотрены физические процессы в твердых телах при взаимодействии с электронными пучками умеренной и высокой интенсивности.

Во второй главе представлены методика эксперимента и объекты исследования. Приведена конструкция электронного ускорителя ГИН-600, его характеристики, геометрические параметры вакуумного диода и конструкции катодов, применяемые для исследования явлений филаментации и самофокусировки электронного пучка.

В третьей главе представлены результаты исследования филаментации и самофокусировки СЭП в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600 со взрывоэмиссионным катодом в диапазоне давлений (0,05–0,3) Торр. Определены оптимальные параметры вакуумного диода с плоским анодом (радиус полого катода $R_K \approx 3$ мм, глубина полости (2–3) мм, величина межэлектродного зазора $d_{КА} \approx 3$ мм), позволяющие генерировать филаментированные самосфокусирующиеся электронные пучки с плотностью мощности (10^9 – 10^{10}) Вт/см². На рисунке 1 представлены конструкции вакуумных диодов, отличающиеся формой эмиссионной поверхности катода (катод с плоской эмиссионной поверхностью (а) и полый цилиндрический катод (б)). На рисунке 2 приведены фотографии автографов электронного пучка, образованных на анодах из алюминия (а–в) и меди (г) при использовании катодов с различной конфигурацией эмиссионной поверхности.

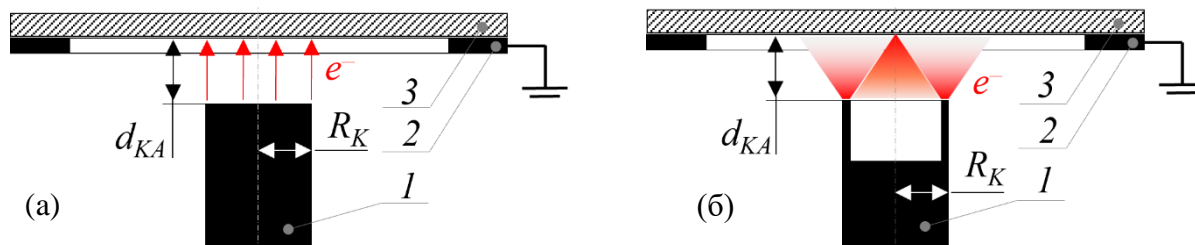


Рисунок 1 – Конструкции вакуумных диодов: (а) – цилиндрический катод без полости; (б) – пологий цилиндрический катод; 1 – катод; 2 – держатель; 3 – анод



Рисунок 2 – Автографы электронного пучка, оставленные на анодах из алюминия (а, б, в) и меди (г) при использовании цилиндрического катода без полости (а, б) и пологого катода (в, г)

Видно, что на поверхности алюминиевого анода (рисунок 2, а, б) автографы представляют собой локальные эрозионные пятна, которые в основном сосредоточены по окружности, диаметр которой несколько превышает диаметр катода. В некоторых экспериментах эрозионные пятна располагались не только на периферии, но и внутри окружности (рисунок 2, б), что может быть обусловлено неоднородным пространственным распределением центров взрывной электронной эмиссии по поверхности катода. Результаты исследования автографов электронного пучка на анодах из алюминия и меди, при использовании пологого цилиндрического катода, приведены на рисунке 2, в, г. Видно, что в результате единичного импульса воздействия на поверхности анодов формируются геометрическая фигура, напоминающие «звезду», число «лучей» в которой может достигать ~ 20 при диаметре фигуры $\sim (7-8)$ мм. Ширина «лучей» (эрозионных следов) изменялась в пределах $\sim (70-150)$ мкм, глубина $\sim (10-15)$ мкм, диаметр центрального кратера $\sim (1-1,5)$ мм. В отдельных экспериментах на тыльной стороне медной мишени, толщиной 180 мкм наблюдался откол. В алюминиевых анодах, толщиной 100 мкм, в пятне самофокусировки за один импульс наблюдались отколы на тыльной и на облучаемой поверхности с формированием сквозного отверстия (рисунок 2, в). Анализ автографов, формируемых СЭП в различных мишенях, позволяет сделать заключение о том, что они образуются в результате воздействия на анод филаментированных (нитевидных) электронных микропучков с плотностью энергии, превышающей теплоту сублимации исследованных материалов. Из экспериментально определенных величин (максимума энерговыделения в алюминиевой мишени и откольной прочности меди) были оценены средняя энергия электронов и объемная плотность энергии в пятне самофокусировки, которые составили ≈ 100 кэВ и $1,2 \cdot 10^9$ Дж/м³, соответственно. Объемную плотность энергии в зоне самофокусировки СЭП можно рассчитать, зная теплоту сублимации облучаемых мишеней. Для алюминия, $\Delta H_{\text{субл}} \approx 1,1 \cdot 10^4$ (дж/г), для меди – $\Delta H_{\text{субл}} \approx 0,47 \cdot 10^4$ (дж/г), что соответствует плотности мощности электронного пучка ($1,26 \cdot 10^{10}$ и $0,55 \cdot 10^{10}$)

Вт/см², соответственно. При этом давление в ударной волне, образующейся вблизи зоны самофокусировки в этих материалах, составит, соответственно $2,9 \cdot 10^{10}$ и $4,2 \cdot 10^{10}$ Па. Автографы самофокусирующегося электронного пучка, полученные при облучении полимеров - винипроза и полиметилметакрилата в геометрии (рисунок 1, б) приведены на рисунке 3.

Видно, что фигуры разрушения, формируемые ССЭП в полимерах, мало отличаются от структур, полученных на металлах.

В процессе исследований были определены четыре основных фактора, влияющие на явление самофокусировки и параметры ССЭП. К таким факторам следует отнести:

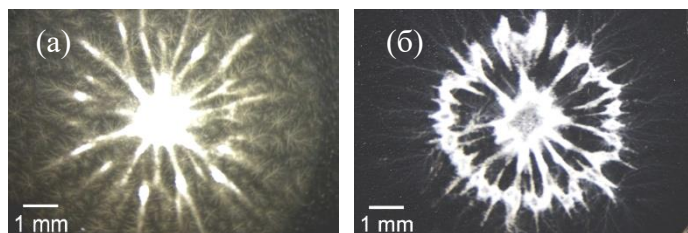


Рисунок 3 – Автографы (эрозионные следы) самофокусирующегося электронного пучка, оставленные на поверхности ВП (а) и ПММА (б)

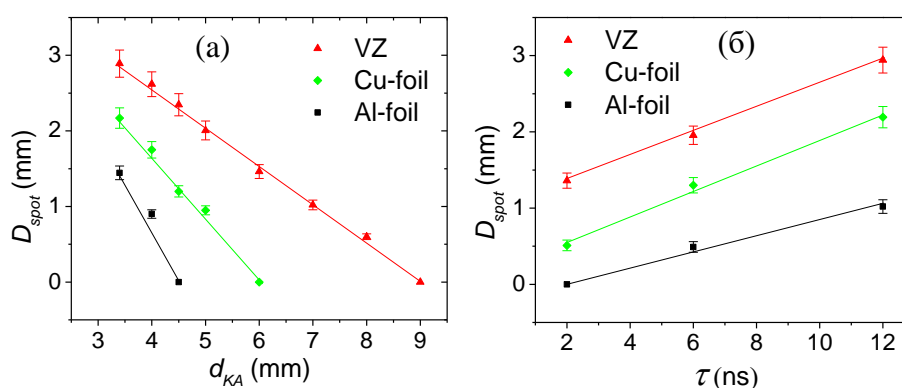


Рисунок 4 – Зависимость среднего диаметра центрального кратера ($D_{\text{цк}}$), образующегося при облучении однократным импульсом ССЭП винипроза (1), меди (2) и алюминия (3) от: (а) – межэлектродного зазора $d_{\text{КА}}$ и (б) – длительности импульса при $R_{\text{К}} = 3$ мм; $d_{\text{КА}} = 3$ мм

наличие полого катода, размер катод – анодного зазора ($d_{\text{КА}}$), длительность импульса тока СЭП и давление остаточных газов в вакуумном диоде.

На рисунке 4 приведены зависимости среднего диаметра центрального кратера ($D_{\text{цк}}$), образующегося при облучении винипроза (1), меди (2) и алюминия (3) от величины межэлектродного зазора и длительности импульса тока самофокусирующегося сильнофокусированного электронного пучка.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение. Уменьшение величины катод - анодного зазора и увеличение длительности импульса тока пучка приводит к увеличению диаметра (и глубины) кратера в исследованных образцах. Винипроз является наиболее чувствительным (по сравнению с металлами), материалом, который позволяет проводить диагностику явлений филаментации и самофокусировки электронного пучка в диоде в широком диапазоне изменения величины межэлектродного зазора от 3 до 9 мм. Оптимальные условия самофокусировки реализуются при радиусе полого катода ~ 3 мм. С увеличением длительности импульса тока пучка с 2 до 12 нс вначале формируется «кратер», а затем появляются эрозионные «лучи», глубина которых увеличивается с ростом длительности импульса тока (рисунок 5).

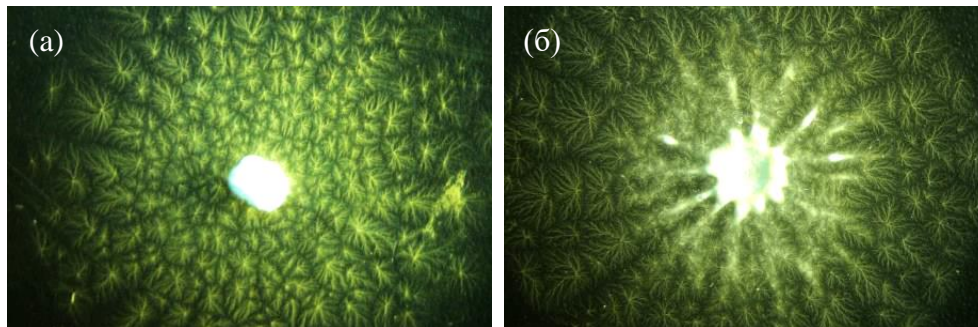


Рисунок 5 – Автографы ССЭП, образующиеся на поверхности винипроза за один импульс облучения при длительностях импульса тока электронного пучка: а) – 2, б) – 6 нс. $R_K = 3$ мм

Зная из эксперимента минимальную длительность импульса тока пучка и радиус катода, при которых наблюдается самофокусировка, можно оценить минимальную скорость схлопывания ССЭП, которая составила $\sim 1,5$ мм/нс. Следует отметить, что кроме следов эрозии в виде «лучей» и «кратера» на облучаемой поверхности винипроза формируются каналы электрического пробоя (КЭП) с пространственным распределением, близким к однородному. Диаметр зоны облучения составляет (7-8) мм и несколько превышает диаметр полого катода. Пороговая плотность энергии СЭП, при которой инициируется электрический пробой в винипрозе, составляет $\sim 0,2$ Дж/см², что значительно ниже по сравнению с плотностью энергии, необходимой для испарения полимера. Формирование неоднородной пространственной структуры энерговыделения в винипрозе можно объяснить генерацией в диоде ускорителя электронных пучков с различными параметрами: однородный по облучаемой поверхности электронный пучок с плотностью мощности, близкой к пороговой для инициирования электрического пробоя полимера и филаментированный, с плотностью мощности достаточной для локального испарения винипроза.

Зависимости длительности импульса тока электронного пучка на полувывсоте и амплитуды тока электронного пучка от остаточного давления воздуха в диоде для межэлектродного зазора $d_{KA} = 3$ мм приведены на рисунке 6.

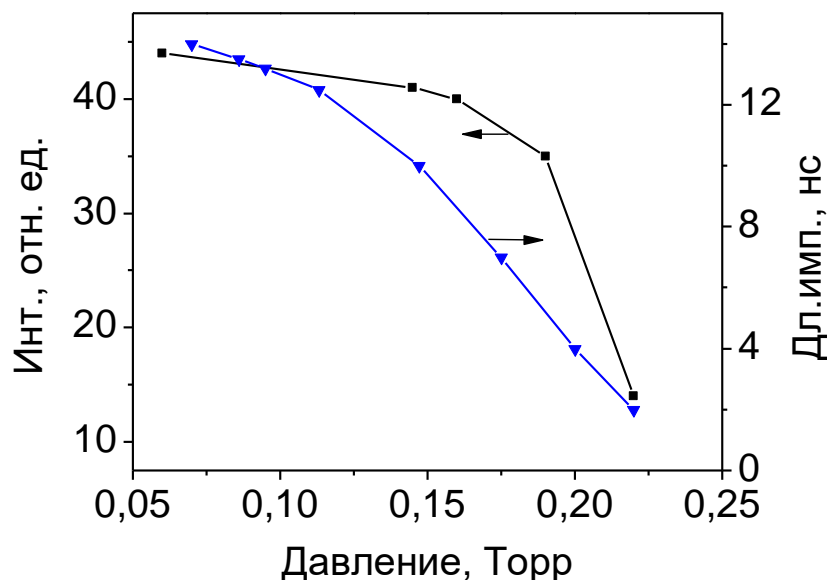


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды и длительности импульса тока электронного пучка на полувысоте от остаточного давления воздуха в диоде при $d_{КА} = 3$ мм

Видно, что максимальные амплитуда и длительность импульса тока электронного пучка наблюдаются при откачке диода до давления $\sim 0,05$ Торр. С увеличением давления наблюдается уменьшение длительности и амплитуды импульса тока пучка. При давлении в диоде, превышающем $0,22$ Торр, амплитуда тока пучка, выведенного в атмосферу через алюминиевую фольгу толщиной 30 мкм, недостаточна для его регистрации. Возможно, что причиной этого является недостаточное временное разрешение применяемого нами осциллографа (300 МГц), поскольку, согласно известным литературным данным, длительность электронных пучков, генерируемых в газовых диодах при давлениях близких к атмосферному, составляет десятки – сотни пикосекунд.

Для детального изучения пространственного распределения свечения плазмы, образующейся в межэлектродном зазоре, мы использовали открытый диод. В этом случае сетчатый анод убирался, а вместо него использовалась часть поверхности корпуса диода, выполненную в виде кольца диаметром ~ 20 мм. На рисунке 7 приведены фотографии интегрального излучения объемного разряда в открытом диоде за один импульс возбуждения при давлении $\sim 0,26$ Торр.

Видно, что разряд является объемным, развивается в виде диффузных струй синего цвета, истекающих в направлении анода из катодных факелов, сосредоточенных вблизи центров взрывной электронной эмиссии. Интегральные спектры свечения объемного разряда приведены на рисунке 8.

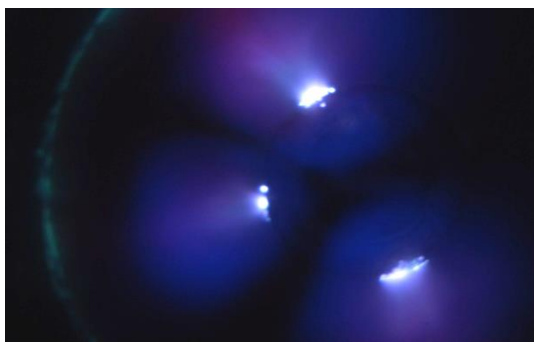


Рисунок 7 – Фотография интегрально-го излучения объемного разряда в открытом диоде, полученная в первом импульсе возбуждения при давлении $\sim 0,26$ Торр. $R_k = 3$ мм

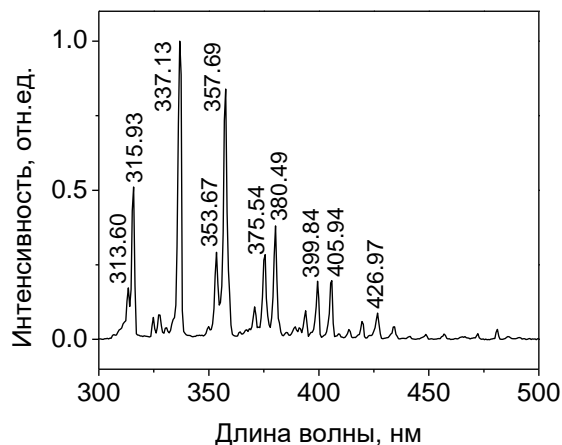


Рисунок 8 – Спектр излучения объемного разряда, полученный в открытом диоде в первом импульсе возбуждения при давлении $\sim 0,26$ Торр

В спектрах свечения регистрируются полосы второй положительной системы молекулы N_2 на электронном переходе ($C^3\Pi_u$) \rightarrow ($B^3\Pi_g$). В серии последующих импульсов возбуждения (без откачки диода) наблюдается постепенное изменение цвета разряда на красный (рисунок 9).

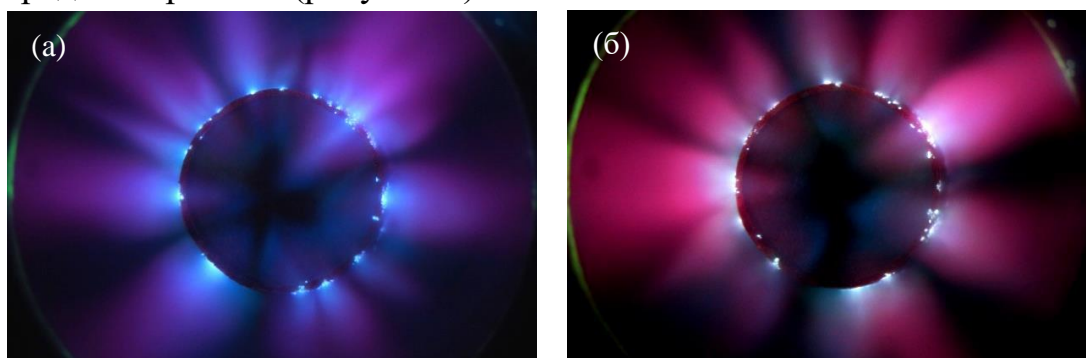


Рисунок 9 – Фотографии интегрального излучения объемного разряда в открытом диоде, полученные во втором и третьем импульсах возбуждения при давлении $\sim 0,26$ Торр

В спектрах свечения при этом появляется и увеличивается интенсивность свечения «красной» линии атома водорода $H_\alpha = 656,28$ нм и атома кислорода $O I = 777,3$ нм.

Фотография свечения разряда, инициированного в газовом диоде при давлении 760 Торр, приведена на рисунке 10. Видно, что разряд состоит из отдельных плазменных струй, диаметром от 0,5 до 2 мм, расположенных между катодом и анодом.

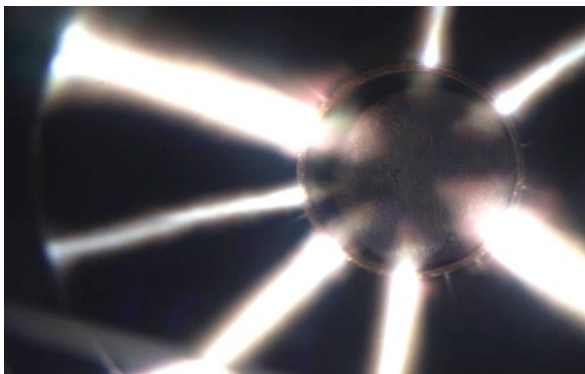


Рисунок 10 – Излучение разряда при давлении 760 Торр за один импульс возбуждения при $d_{КА} = 8$ мм, $R_K = 3$ мм

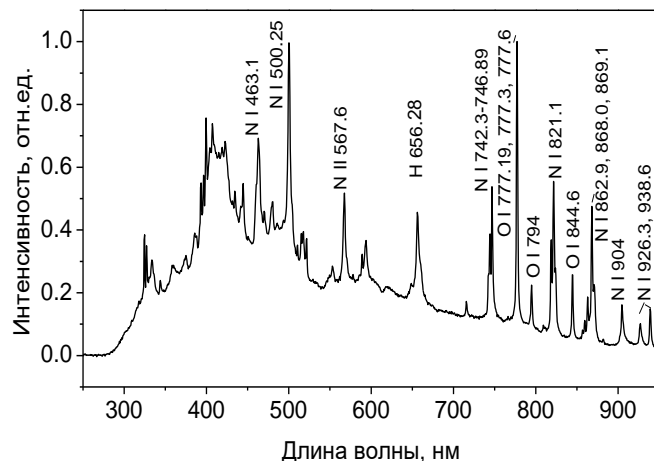


Рисунок 11 – Спектр излучения разряда в открытом газовом диоде при давлении 760 Торр

При этом часть лучей замыкается на острой кромке катода, а часть входит в полость катода. Спектр свечения разряда при 760 Торр приведен на рисунке 11. Сравнение спектров излучения плазмы, полученных при давлениях 0,26; 10; 45; 75 и 760 Торр свидетельствует о том, что при увеличении давления воздуха в диоде наблюдается рост интенсивности свечения сплошного спектра и свечения атомов азота, кислорода и водорода по отношению к интенсивности свечения молекул азота, которое при 760 Торр не регистрируется.

Длинноволновая часть спектра разряда в атмосферном воздухе полностью повторяет спектр лазерной искры в воздухе, что свидетельствует о высокой температуре и давлении атмосферной плазмы. Анализ полученных результатов по изучению влияния давления (в области 0,05–0,2 Торр) в диоде ускорителя ГИН-600 на пространственные и спектральные характеристики свечения высоковольтных наносекундных разрядов и параметры электронных пучков, генерируемых в этих условиях, дают основание утверждать, что в условиях эксперимента формируется плазменно-пучковый разряд (ППР). Электронные пучки, регистрируемые при давлении 0,05 – 0,2 Торр представляют собой убегающие электроны, которые формируются в результате ускорения между фронтом волны ионизации и анодом.

Для фундаментальных и прикладных исследований процесса взаимодействия мощных электронных пучков с диэлектриками и полупроводниками представляется важным вывести самосфокусированный сильноточный электронный пучок за анод вакуумного диода и получить максимальную плотность энергии на заданном расстоянии от анода. Для изучения этого вопроса был выбран ПММА. Энергия электронов в пучке измерялась двумя методами – по глубине залегания микроразрушений, формируемых электронным пучком в ПММА и по поглощению электронов в тонких алюминиевых фольгах. Переход в режим испарения регистрировался по следам эрозии, образующимся на поверхности облучаемых мишеней и по спектрам свечения эрозионной плазмы. На рисунке 12 приведены автографы, сформированные электронным пучком в ПММА, полученные на различных расстояниях L от анода при $d_{КА} = 3,5$ мм и диаметре отверстия в аноде $\varnothing_A = 1,5$ мм.

Измерения с высоким пространственным разрешением свидетельствуют о том, что на расстоянии L до 10 мм от анода, в облучаемой мишени ПММА фор-

мируются два вида разрушений. В центральной области облучаемых мишеней образуется совокупность микропузырьков диаметром от 10 до 50 мкм, возникающих из-за взрывного вскипания полимера при его облучении ССЭП. Вокруг зоны вскипания наблюдаются объемные электрические разряды, которые регистрировались за однократный импульс возбуждения в виде кольцевой структуры как по разрушению, так по свечению. Глубина залегания микропузырьков от облучаемой поверхности составляет (20–80) мкм, а каналов электрического пробоя – (350–450) мкм, что соответствует средней энергии электронов в центральном самосфокусированном сильноточном электронном пучке (ССЭП) и периферийном, высокоэнергетическом сильноточном электронном пучке (ВСЭП) ~ 70 и ~ 220 кэВ, соответственно.

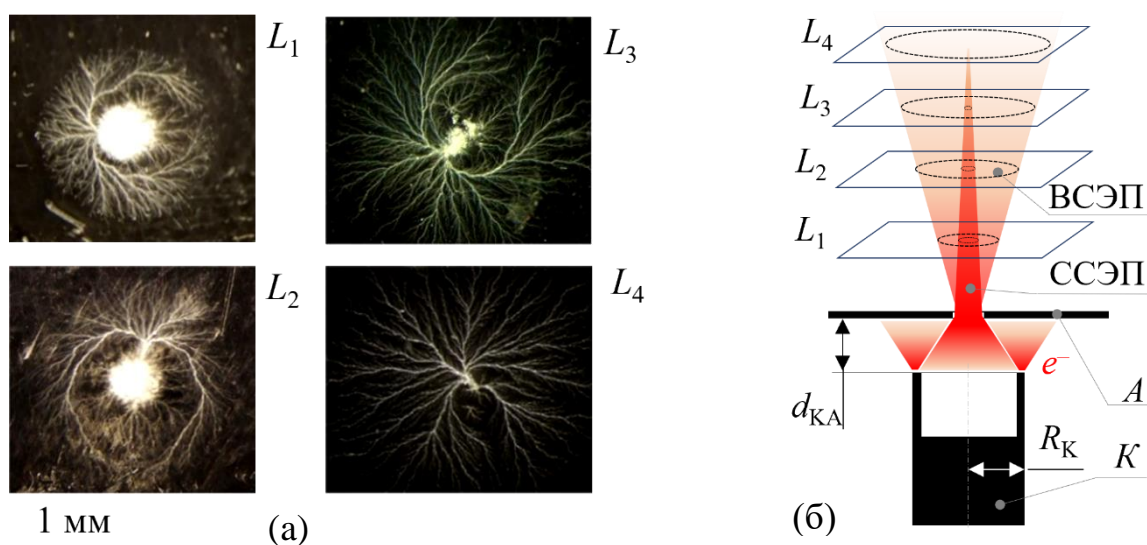


Рисунок 12 – Фотографии разрушений, формируемых в ПММА электронным пучком, выведенным за анод вакуумного диода, на различных расстояниях от анода (а): $L_1 = 4$ мм, $L_2 = 6$ мм, $L_3 = 9$ мм, $L_4 = 13$ мм; (б) – пространственная структура электронных пучков, регистрируемых за анодом вакуумного диода. $d_{KA} = 3,5$ мм, $\varnothing_A = 1,5$ мм, $\varnothing_K = 6$ мм

На осциллограммах тока (рисунок 13, а, б), измеренных из зоны самофокусировки (а) и периферийной области электронного пучка (б) прошедшего поглощающие алюминиевые фольги различной толщины, хорошо видны несколько максимумов, которые образуются из-за рассогласования диода с формирующей линией. Сравнение двух осциллограмм тока пучка показывает, что длительность импульса тока ССЭП превышает длительность тока ВСЭП. Энергия электронов ССЭП и ВСЭП также различаются. Видно, что четвертый пик тока ССЭП (рисунок 13, а) практически полностью поглощается алюминиевой фольгой толщиной ~ 50 мкм, а амплитуды второго и третьего импульсов тока уменьшаются более чем в 2 раза. Это означает, что в ССЭП основная доля электронов имеет энергию ~ 100 кэВ. Из осциллограмм тока ВСЭП, приведенных на рисунке 13, б, видно, что все три импульса тока присутствуют при суммарной толщине поглощающих алюминиевых фольг ~ 280 мкм, что соответствует максимальной энергии электронов ~ 290 кэВ.

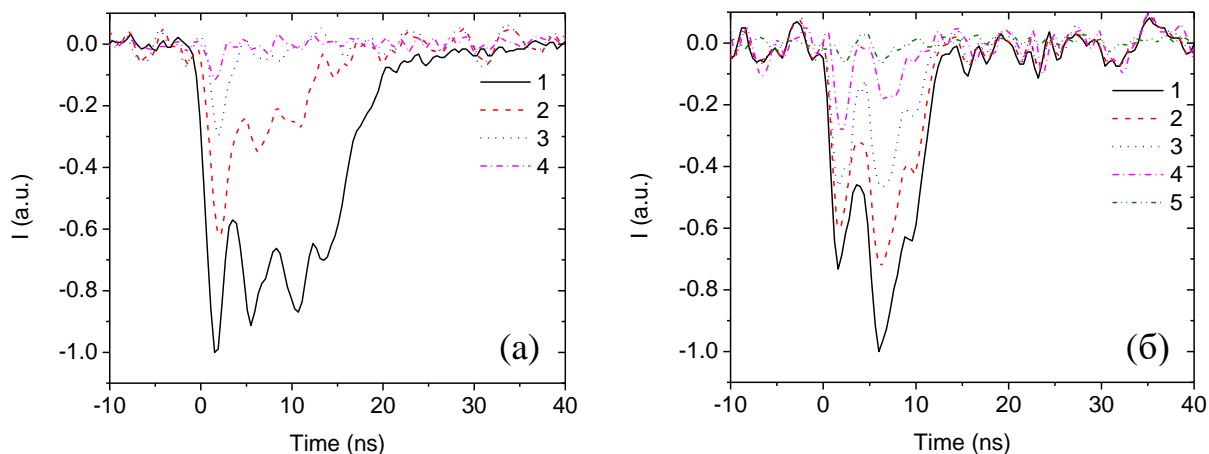


Рисунок 13 – Осциллограммы тока электронного пучка, выведенного за анод вакуумного диода и измеренные из зоны самофокусировки (а) и периферийной области электронного пучка (б) после прохождения алюминиевых фольг различной толщины: 1 - 30; 2 – 80; 3 – 130; 4 – 230; 5 – 280 мкм; а) – ток ССЭП; б) – ток ВСЭП. $d_{КА} = 3,5$ мм; $\varnothing_A = 1,5$ мм; $\varnothing_K = 6$ мм

Таким образом, в пространстве за анодом регистрируются электронные пучки с различными параметрами и отличающиеся пространственным распределением. Один из них – ССЭП, с плотностью энергии достаточной для испарения металлических и диэлектрических мишеней и энергией электронов в спектре $\sim (50–100)$ кэВ. Второй – ВСЭП с плотностью энергии, превышающей пороговую для инициирования электрического пробоя в ПММА ($H > 0.2$ Дж/см²), и максимальной энергией электронов в спектре до 290 кэВ. Длина транспортировки ССЭП в вакуумной камере длиной 15 мм и диаметром 23 мм при $d_{КА} = 2,5$ мм и диаметре отверстия в аноде $\varnothing_A = 1,5$ мм составляет $L \sim 13$ мм. Одна из причин распада ССЭП может быть связана с развитием различного рода неустойчивостей.

На основании полученных в настоящей работе экспериментальных данных и анализе литературы о процессах, развивающихся в вакуумных и газовых диодах с полым катодом в сильных электрических полях наносекундной длительности, нами предложена физическая модель процессов филаментации и самофокусировки электронного пучка в диоде ускорителя с генератором ГИН-600 в форвакуумной области давлений.

При генерации самофокусирующихся электронных микропучков следует выделить несколько стадий развития процессов в диоде. На первой стадии под действием высоковольтного импульса напряжения с наносекундным фронтом развивается взрывная электронная эмиссия с генерацией плотной катодной плазмы и потока ускоренных электронов с энергией, соответствующей приложенному напряжению с пространственным распределением, близким к однородному, вследствие уширения пучка под действием собственных электрических полей. Одновременно происходит ионизация остаточного газа и газа, образующегося в результате термической десорбции с катода. Вследствие электронной бомбардировки анода возникает анодная плазма. В результате между полым катодом и плоским анодом формируется плазменно-пучковый разряд (ППР) в виде микроструктурированного анодонаправленного стримерного разряда (фронта высокоскоростной волны ионизации (ВВИ)), скорость которой составляет $\sim 10^9$ см/с. На фронте ВВИ генерируются микропучки убегающих электронов с энергией 50–100

кэВ. Самофокусировка электронных микропучков происходит, по-видимому, вследствие образования у выхода из полости катода области не скомпенсированного положительного заряда, который играет роль виртуального анода, фокусирующего электроны на поверхности анода.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния плотности мощности электронного пучка на морфологию разрушения ПММА. Плотность мощности варьировалась в диапазоне (10^7 – 10^9) Вт/см². Установлено, что при умеренной плотности мощности электронного пучка (до $5 \cdot 10^8$ Вт/см²) в ПММА образуются каналы электрического пробоя (КЭП). Глубина залегания КЭП составляет ~ 760 мкм, что соответствует энергии электронов в пучке ~ 280 кэВ. Увеличение плотности мощности электронного пучка, которое осуществляется путем уменьшения величины катод – анодного зазора $d_{КА}$, приводит к формированию нового вида разрушений - микропузырьков и их скоплений с диаметрами (10–50) мкм. Микропузырьки расположены под облучаемой поверхностью на глубине (40–80) мкм. Этот вид разрушений характерен для большинства исследованных полимеров (полиметилметакрилат, поликарбонат, полиэтилен), но наиболее четко этот вид разрушений проявляется в ПММА. Общий вид автографа ССЭП на поверхности ПММА приведен на рисунке 14, а.

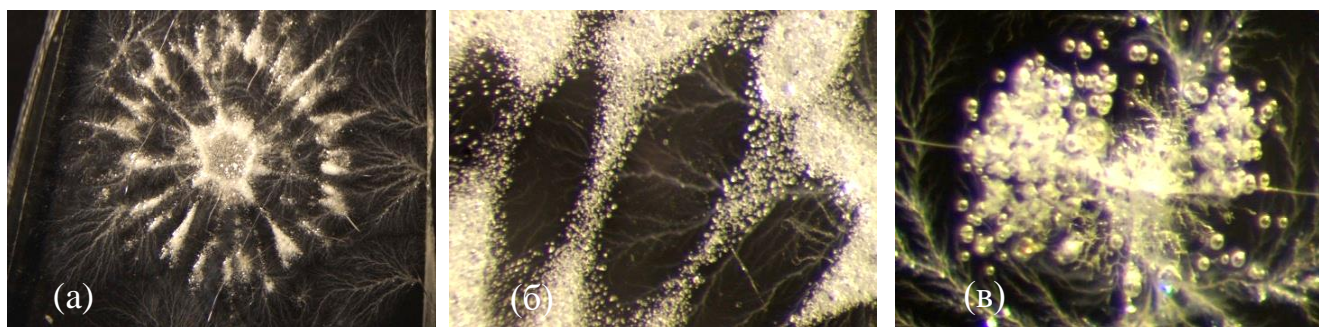


Рисунок 14 – Фотографии автографа ССЭП, образующегося на поверхности ПММА за один импульс облучения: а) общий вид фигуры разрушения, б) увеличенные фрагменты «лучей» в) морфология разрушений образца в зоне самофокусировки электронного пучка, выведенного за анод диода с плотностью мощности не достаточной для абляции полимера (в). Длительность импульса тока ССЭП ~12 нс, $d_{КА}$ ~3,5 мм

Фотографии были получены при регистрации микроразрушений через микроскоп МБС–10 с подсветкой внешним источником со стороны облучаемой поверхности.

Автограф представляет собой «звезду» с «лучами», «кольцом» на периферии, и центральным пятном самофокусировки. Плотность мощности ССЭП была близкой (ниже) порога абляции полимера в зонах расположения «лучей» и «кольца» и только в пятне самофокусировки наблюдалось испарение материала.

На рисунке 14, б, приведена увеличенная микрофотография «лучей» и зона самофокусировки пучка (в), полученные в режиме облучения до порога абляции полимера.

На фотографиях микропоразрушений, полученных с помощью микровизора проходящего света μ Vizo-101 микропузырьки и их скопления не прозрачны для проходящего света и выглядят черными. На рисунке 15 приведена микроструктура разрушений, расположенных в зоне локализации «лучей» (а) и «кольца» (б) при длительности импульса тока пучка на полувысоте $\tau_{0,5} \sim 6$ нс.

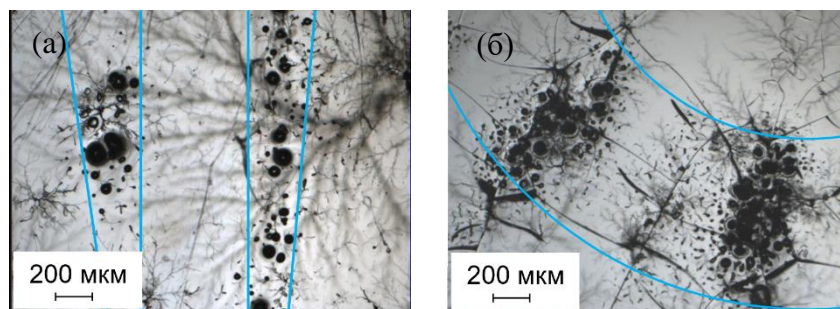


Рисунок 15 – Пространственная структура микропоразрушений, образующихся в зоне локализации «лучей» (а) и расположенных на «кольце» (б) в виде отдельных микропузырьков или их скоплений. $\varnothing_K = 6$ мм; $d_{KA} \sim 3$ мм; $\tau_{0,5} \sim 6$ нс

«Лучи» и «кольцо» в этих условиях регистрируются в виде отдельных микропузырьков или их скоплений округлой и более сложной формы, размерами от 10 до 80 мкм. На рисунке 16 приведены фотографии увеличенного изображения микропоразрушений, образующихся в зоне расположения «лучей» в ПММА и зарегистрированные на различной глубине от облучаемой поверхности.

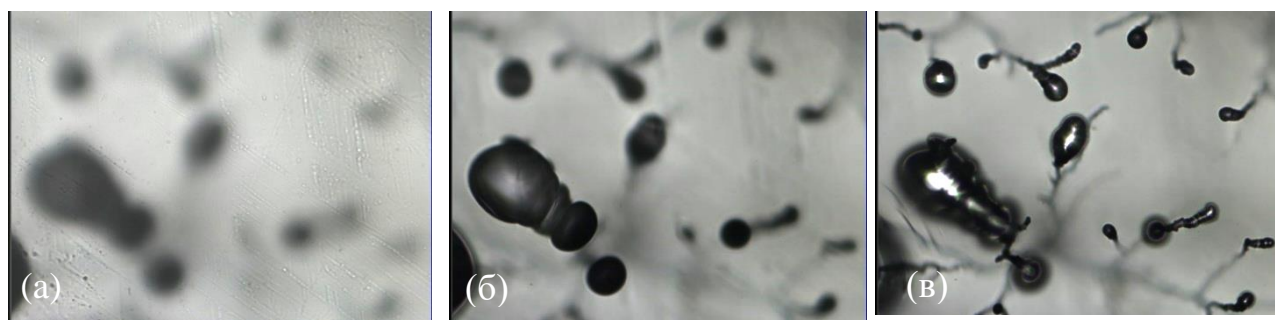


Рисунок 16 – Пространственное распределение микропоразрушений, образующихся в зоне расположения «лучей» в ПММА и зарегистрированных на различной глубине от облучаемой поверхности: а – 0; б – 40; в – 80

Изображение микропоразрушений, приведенное на рисунке 16, а имеет нерезкие очертания. Это связано с тем, что поле резкости объектива лежит на поверхности пластинки ПММА. Видно, что поверхность образца не разрушена. С увеличением глубины проникновения пучка регистрируются отдельные микропоразрушения округлой формы соединенные каналами электрического пробоя (рисунок 16, в). Анализ микрофотографий, приведенных на рисунке 16, в, свидетельствует о взаимосвязи двух физических процессов – электрического пробоя и вскипания полимера. Микропузырьки, как правило, располагаются на «ветвях дерева электрического пробоя».

Объяснить наблюдаемое явление можно следующим образом. Электрический пробой процесс быстровременной и развивается на фронте импульса СЭП. Образование микропузырьков – процесс инерционный, и протекает с запаздыванием, после того, как сформировались КЭП. По-видимому, вскипание на микро неоднородностях, роль которых выполняют КЭП, происходит с меньшими затратами энергии, что и проявляется в эксперименте. В поликарбонате плотность каналов

электрического пробоя в приповерхностной области значительно меньше и микропузырьки локализуются вдали от КЭП.

В пятой главе представлены результаты по электронно-пучковой абляции твердых тел различных классов – металлов, полимеров и полупроводников. Перспективность развития этого направления исследований определяется как потребностями фундаментальных исследований поведения вещества в условиях сверхмощных радиационных воздействий, так и многочисленными практически важными приложениями. Спектр излучения эрозионной плазмы, образующейся при испарении алюминия, приведен на рисунке 17.

Видно, что в спектре излучения абляционной плазмы регистрируются атомы и ионы алюминия. Длительность импульса свечения на полувысоте составляет ~ 2 мкс при длительности импульса ССЭП ~ 15 нс. Максимум интенсивности свечения достигается через ~ 1 мкс после импульса возбуждения, что объясняется разлетом ударно-сжатой плазмы и ее ударом о дно полого катода. Фотографии возбуждаемой и тыльной поверхностей образца ПММА, после однократного импульса облучения ССЭП в режиме абляции, приведены на рисунке 18, а, б.

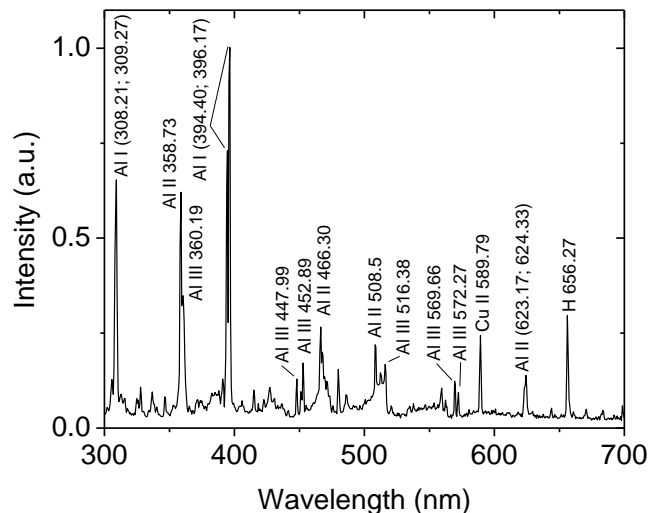


Рисунок 17 – Спектр излучения абляционной плазмы алюминия, измеренные при давлении 10^{-2} Торр. $\lambda = 394,4$ нм

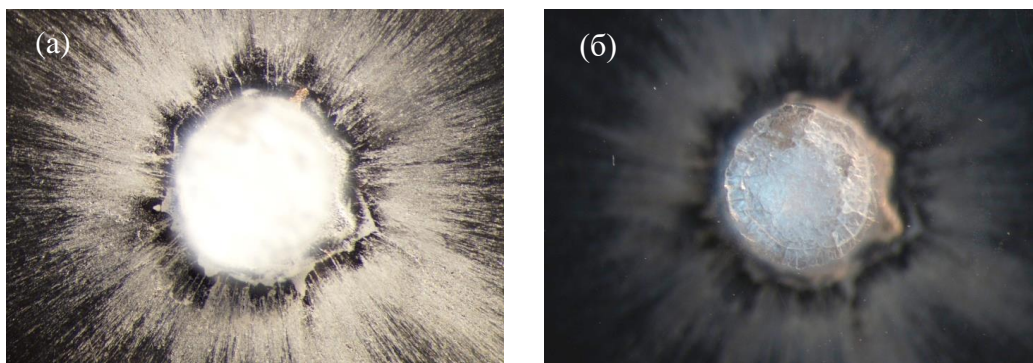


Рисунок 18 – Фотографии ПММА после однократного воздействия ССЭП: (а) – облучаемая поверхность; (б) – откол тыльной поверхности образца

Видно, что на облучаемой поверхности полимерной пластины в зоне самофокусировки электронного пучка образуется кратер, вокруг которого формируется корона из вещества, вынесенного из кратера, а на тыльной поверхности мишени формируется откол. Увеличенные изображения короны, образующейся в различных полимерах при облучении ССЭП, приведены на рисунок 19.

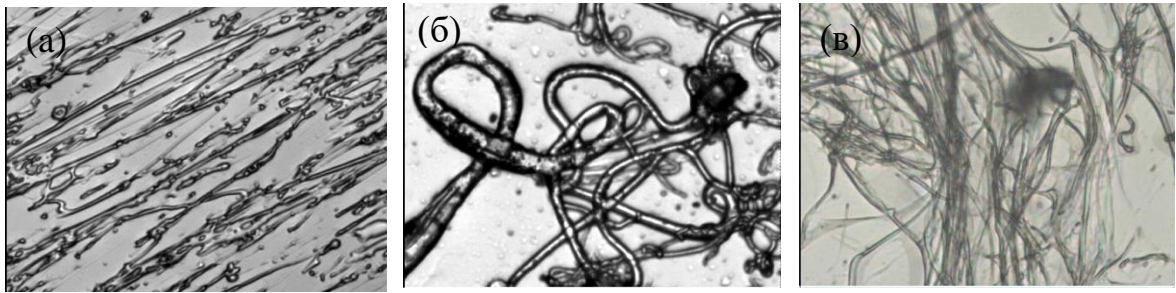


Рисунок 19 – Вид полимерных нитей (волокон), образующихся на периферии кратера в образцах полиметилметакрилата, поликарбоната и винипроза, облученных ССЭП в режиме абляции

Видно, что корона состоит из полимерных нитей, длина которых порядка $\sim (0,1-1)$ мм при средней толщине волокон $(3-10)$ мкм. Следует полагать, что при достижении плотности энергии электронного пучка пороговой для абляции, происходит взрывное вскипание материала, что сопровождается выбросом расплава и плазмы, как в радиальном направлении, так и в направлении катода. В результате этого процесса и формируется кратер и корона, состоящая из полимерных нитей. В отдельных экспериментах, при абляции винипроза, внутри полого катода формировалась тонкая полимерная пленка.

Проведены исследования по синтезу нанокристаллов селенида цинка из абляционной плазмы, полученной при испарении монокристалла ZnSe (O) ССЭП в диоде ускорителя ГИИ-600. Образец размерами $(10 \times 10 \times 5)$ мм помещался на тыльной поверхности анода, в котором имелось отверстие для вывода ССЭП и облучался серией из 5–10 импульсов. Абляционная плазма, образующаяся в катод - анодном зазоре, после взаимодействия с катодом, разлеталась в направлении перпендикулярном

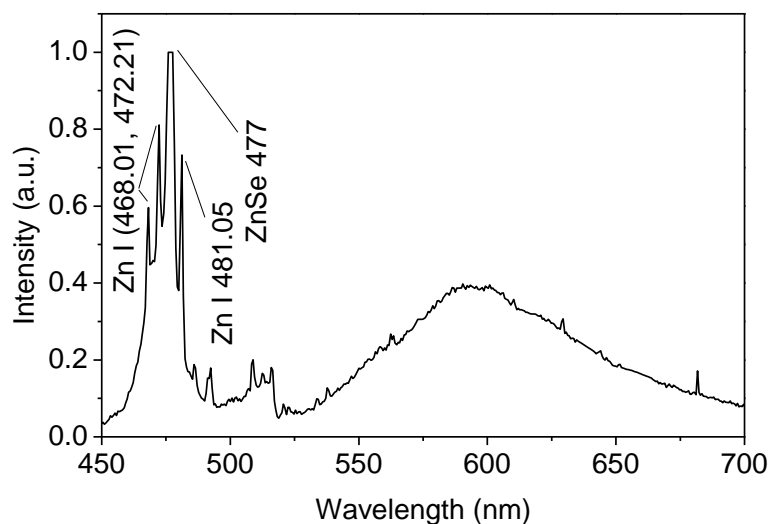


Рисунок 20 – Суммарный спектр излучения абляционной плазмы и импульсной катодолуминесценции кристалла ZnSe (O), испаряемого ССЭП

направлению распространения ССЭП и попадала на подложку из алюминиевой фольги, расположенную на расстоянии ~ 3 см от оси полого катода. Разлет абляционного факела сопровождался свечением, в спектре которого наблюдаются линии Zn I $(468,14; 472,21$ и $481,05$ нм) и полоса стимулированной катодолуминесценции ZnSe (O) с максимумом при $\lambda = 477$ нм (рисунок 20). Возможность регистрации спектра абляционной плазмы и люминесценции кристалла за однократный импульс возбуждения связана с неоднородностью пространственного распределения плотности энергии ССЭП. В центральном пятне самофокусировки плотность мощности пучка превышает теплоту сублимации кристалла $(1,1 \cdot 10^3$ Дж/г), а на его периферии и в глубине пробега электронного пучка температура значительно меньше. Это приводит к формированию двух видов свечения - им-

пульсной катодолюминесценции кристалла и абляционной плазмы цинка, которые регистрируются за один импульс облучения спектрометром AvaSpec-2048L. После конденсации продуктов абляции ZnSe (O) они переносились на медную решетку с полимерной пленкой, толщиной 30 нм и анализировались с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на электронном микроскопе JEOL JEM-2100F сотрудниками Научно-образовательного инновационного центра "Наноматериалы и нанотехнологии" ТПУ (ИШНПТ).

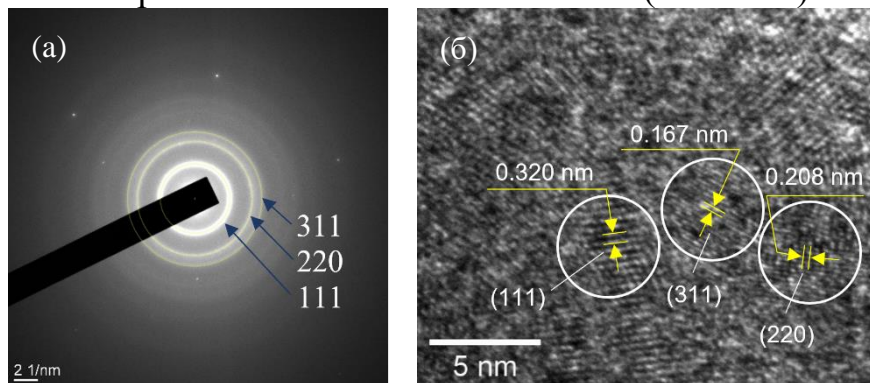


Рисунок 21 – Электронограмма (SAED-изображение) (а) и микрофотография высокого разрешения (HRTEM) (б) нанокристаллов ZnSe

На рисунке 21, а показана электронограмма (SEAD-изображение), а на рисунке 22, б - микрофотография высокого разрешения (HRTEM-изображение) нанокристаллов ZnSe (O).

На рисунке 21, а в дальнем поле наблюдается три концентрических дифракционных кольца с набором усредненных межплоскостных расстояний 0,320; 0,208 и 0,167 нм, соответствующих плоскостям отражения (111), (220) и (311) и относящиеся к кубической фазе селенида цинка. Результаты экспериментов по формированию наночастиц Pb с испарением образца ССЭП приведены на рисунке 22.

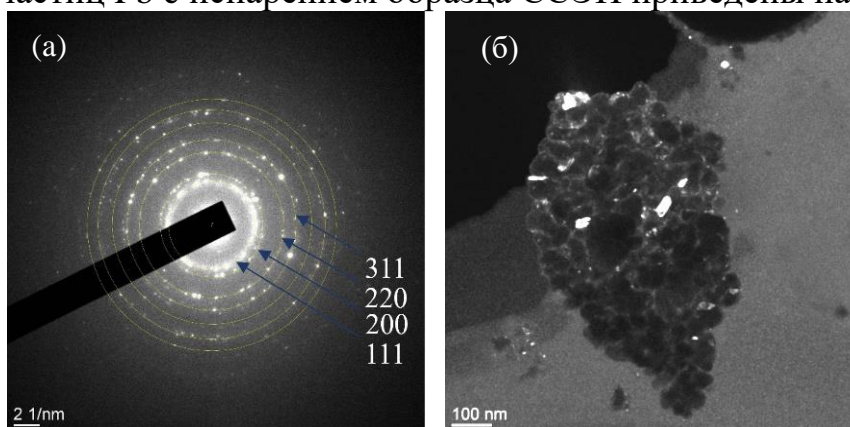


Рисунок 22 – Электронограмма (SAED-изображение) (а), микрофотография (TEM) (б) изображение наночастиц Pb

Проведенные исследования формирования наночастиц при электронно-пучковом воздействии на массивные образцы полупроводниковых кристаллов и металлов свидетельствуют о перспективности применения мощных самосфокусированных сильноточечных электронных пучков в нанотехнологии для создания новых материалов.

Основные результаты и выводы.

1. Показано, что в диоде ускорителя ГИН-600 (300 кВ, 2 кА, 12 нс) при малых (3–4) мм катод – анодных зазорах в форвакуумной области давлений (0,05–0,2) Торр в результате ускорения электронов на фронте ветвящегося анодонаправленного стримера в фазе перемикаания разрядного промежутка формируются филаментированные электронные микропучки (убегающие электроны) с энергией (50–100) кэВ и плотностью мощности до 10^{10} Вт/см². Применение полого цилиндрического катода приводит к самофокусировке электронных микропучков в центральное пятно диаметром ~ 1 мм со скоростью $\sim 1,5$ мм/нс, вследствие образования, вблизи катода, не скомпенсированного положительного заряда, который играет роль виртуального анода, фокусирующего электронные микропучки, распространяющиеся по направлению к аноду.

2. Определены параметры самософокусированного сильноточного электронного пучка, выведенного в пространство за анодом. Установлено, что за анодном регистрируются электронные пучки с различными параметрами: низкоэнергетический самософокусированный электронный пучок с плотностью мощности до 10^{10} Вт/см² и энергией (50–100) кэВ распространяющийся вдоль оси вакуумного диода и распадающийся на расстоянии $\sim (10-13)$ мм от поверхности анода и высокоэнергетический электронный пучок с плотностью мощности $\sim 2 \cdot 10^7$ Вт/см² и энергией электронов ~ 290 кэВ, расположенный на периферии электронного пучка.

3. Показано, что воздействие микроструктурированного самософокусирующегося электронного пучка на полиметилметакрилат с плотностью мощности вблизи порога абляции приводит к локальному нагреву среды и появлению газообразных веществ, давление которых вызывает упругопластическую деформацию, после релаксации которой остается необратимая пластическая деформация, проявляющаяся в виде микропузырьков, размерами (10–50) мкм, локализованных на каналах электрического пробоя в приповерхностной области образца на глубине (40–80) мкм. При плотности мощности электронного пучка выше порога абляции полиметилметакрилата происходит выброс плазмы и жидких капель из кратера с формированием на поверхности образца «короны» из полимерных нитей.

4. Обнаружено, что воздействие самософокусированного электронного пучка на монокристаллы ZnSe (O) и Pb с плотностью мощности превышающей порог режима абляции вещества, приводит к выбросу плазмы из кратера и формированию на алюминиевой подложке нанокристаллов селенида цинка со структурой сфалерита размерами (2–12) нм и наночастиц свинца размерами (25–60) нм.

5. Показано, что после облучения латуни интенсивным электронным пучком в режиме абляции отношение концентраций атомов меди и цинка в приповерхностной области изменяется, что может быть использовано для модификации свойств поверхности сплавов.

6. Воздействие мощных самософокусированных электронных пучков на конденсированные среды приводит к инициированию ряда пороговых физических процессов: взрывное вскипание, абляция, плазмообразование, генерация ударных волн, что представляет интерес для разработки методов контроля материалов и радиационных технологий.

Цитируемая литература:

1. Ковальчук Б.М. Сильноточный наносекундный ускоритель для исследования быстропротекающих процессов / Г.А. Месяц, Б.М. Семи́н, В.Г. Шпак / ПТЭ. – 1981. – № 4. – С. 15–18.
2. Вайсбурд Д.И. Высокоэнергетическая электроника твердого тела / С.Б. Семи́н, Э.Г. Таванов и др. // Новосибирск: Наука. – 1982. – С. 227.
3. Тарумов Э.Э. Получение и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков в диодах // Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков / под ред. Л.И. Рудакова. М. – 1990. – С. 122–181.
4. Соломонов В.И. Импульсная катодоллюминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ / С. Г. Михайлов // Екатеринбург: УрО РАН. – 2003. – 182 с.
5. Олешко В.И. Пороговые процессы в твердых телах при взаимодействии с сильноточными электронными пучками / Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н.: спец. 01.04.07 // ТПУ– 2009. – 317 с.

Публикации автора по теме диссертации:

1. Олешко В.И. Филаментация и самофокусировка электронных пучков в вакуумных и газовых диодах/ В.Ф. Тарасенко, А.Г. Бураченко, **V.V. Nguyen** // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45. – В. 7. – С. 3–7.

Переводная версия:

Oleshko V.I. Filamentation and Self-Focusing of Electron Beams in Vacuum and Gas Diodes / V.F. Tarasenko, A.G. Burachenko, **V.V. Nguyen** // Technical Physics Letters. – 2019. – V. 45. – No. 4. – P. 309–313.

2. Олешко В.И. Исследование параметров самосфокусированного электронного пучка, выведенного за анод вакуумного диода / **V.V. Nguyen** // Письма в ЖТФ. – 2022. – Т. 48. – В. 4. – С. 3–6.

Переводная версия:

Oleshko V.I. Investigation of the parameters of a self-focused electron beam outputted behind the anode of a vacuum diode / **V.V. Nguyen** // Technical Physics Letters. – 2022. – V. 48. – No. 2. – P. 53–56.

3. Oleshko V.I. Explosive Effervescence and Ablation of Polymethyl Methacrylate Under Irradiation with a Self-Focusing High-Current Electron Beam / V.F. Tarasenko, A.N. Yakovlev, **V.V. Nguyen** // Russian Physics Journal. – 2023. – V. 66. – No. 2. – P. 219–224.

4. Oleshko V.I. Morphology of destruction of solids when exposed to a high-current electron beam in the modes filamentation and self-focusing / V.F. Tarasenko, A.N. Yakovlev, **V.V. Nguyen** // Book Series: 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effect (EFRE). – 2020. – P. 906–910.

5. Нгуен В.В. Самофокусировка электронных пучков в вакуумных диодах импульсных сильноточных ускорителей электронов / Байсакова А.Р. // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУРа по материалам Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2019». - 22–24 мая 2019 г. - г. Томск. - С. 140–142.

6. Nguyen V.V., Oleshko V.I. Luminescence and radio emission from electric discharges induced by a high current electron beam in atmospheric pressure air // Pulsed lasers and laser applications - “AMPL-2019”: Abstracts of XIV International conference. - Tomsk. - 2019. - с. 141;

7. Нгуен В.В. Морфология разрушений в полиметилметакрилате при облучении сильноточным электронным пучком в режиме филаментации и самофокусировки / В.И. Олешко // Сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - 21–24 апреля 2020 г. - Россия, г. Томск. – с. 146–148.

8. Nguyen V.V. Morphology of destruction of solids when exposed to a high-current electron beam in the modes of filamentation and self-focusing modes / V.I. Oleshko, V.F. Tarasenko, A.N. Yakovlev // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online). – Abstracts. - September 14–25, 2020. - Tomsk, Russia. – с. 406.

9. Нгуен В.В. Влияние геометрических параметров вакуумного диода на самофокусировку сильноточного электронного пучка = Influence of geometric parameters of a vacuum diode on self-focusing of a high-current electronic / В.И. Олешко // Перспективы развития фундаментальных наук сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 27-30 апреля 2021 г., в 7 т. С. 247–249.