

V научно-технический Семинар  
по электронно-пучковому  
оборудованию и технологиям

10-14 июня 2024 г. | Новосибирск

# Обь-2024

Тезисы



ИЯФ СО РАН



ИСЭ СО РАН

**conf**  
**event**

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН  
Институт сильноточной электроники СО РАН

**V научно-технический Семинар  
по электронно-пучковому оборудованию  
и технологиям  
(Обь – 2024)**

*Тезисы*

10–14 июня, 2024

Новосибирск



«Академиздат»



АКАДЕМИЗДАТ

Новосибирск

2024

**Председатель Семинара**

Логачев Павел Владимирович

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

**Сопредседатели**

Коваль Николай Николаевич

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Брязгин Александр Альбертович

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

**Программный комитет**

Брязгин Александр Альбертович

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Толочко Борис Петрович

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

Коробейников Михаил Васильевич

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Старостенко Александр Анатольевич

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Коваль Николай Николаевич

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Беликов Олег Витальевич

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Купер Константин Эдуардович

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

---

**V научно-технический Семинар по электронно-пучковому оборудованию и технологиям (Обь – 2024):** Тезисы. — Новосибирск : Академиздат, 2024. — 60 с.

В настоящем сборнике опубликованы научные доклады, представленные на V научно-техническом Семинаре по электронно-пучковому оборудованию и технологиям. Опубликованные материалы свидетельствуют, насколько успешно решались научные задачи по фундаментальным и прикладным проблемам ускорительной техники и решаемым с ее помощью задач в ближайшие прошедшие годы. Публикации не претендуют на полный охват научных проблем, которыми занимаются специалисты-ученые-ускорительщики, но дают некоторое представление о научных направлениях, в которых идет развитие электронно-ионно-пучковых технологий как в России, так и за рубежом. Затронуты вопросы дальнейшего развития оборудования такого класса и моменты, его сдерживающие. Сборник полезен специалистам по источникам заряженных частиц; проектированию и созданию систем электропитания для различных узлов ускорителей; электронным, ионным и плазменным технологиям; физическому материаловедению; аспирантам и студентам-физикам.

---

## **Уважаемые коллеги!**

*Перед вами сборник тезисов докладов «V научно-технического семинара по электронно-пучковому оборудованию и технологиям», который посвящён исследованиям и разработкам в области электронных пучков и их применений как в научных, так и в технологических целях.*

*Формат мероприятия подразумевает очное участие специалистов для демонстрации последних достижений по электронным пучкам и их применениям, а также обсуждение проблем и перспектив развития этого важного направления современной науки и технологий.*

*Опыт проведения предыдущих семинаров свидетельствует о том, что электронные пучки, имея ряд преимуществ перед традиционными способами обработки материалов и изделий, стремительно расширяют сферу своих возможных применений, демонстрируя не только повышение качества электронно-пучковой обработки, но и повышения энергетической эффективности и экологичности технологических процессов.*

*Специалисты представляют результаты научных и научно-технических достижений в области электронно-пучкового оборудования и технологий, полученных в академических, вузовских и производственных коллективах в последнее время, а также обсудят перспективы их использования в реальном секторе экономики и в науке. В задачи семинара входит обмен опытом создания и усовершенствования ключевых элементов электронно-пучковых устройств, вопросы формирования и транспортировки электронных пучков, изучения процессов взаимодействия пучков с мишенями и обрабатываемыми изделиями, а также технологические аспекты использования пучков непрерывного, импульсного и импульсно-периодического действия с широким диапазоном достигнутых параметров. Вопросам разработки, создания и применения современных схем электропитания и управления электронно-пучковых систем также будет уделено должное внимания, так как от этого во многом зависит не только достижение требуемых параметров пучков, но и надежная и устойчивая работа электронно-пучковых устройств в целом.*

*Впервые в рамках семинара планируется рассмотреть и обсудить вопросы использования электронных пучков в исследованиях с использованием синхротронного излучения, а также некоторые аспекты разработки ионных имплантеров.*

*Семинар не ставит целью освещение всех направлений развития техники и технологий с использованием электронных пучков, а сосредотачивается лишь на отдельных особенностях и аспектах этих работ, уделяя пристальное внимание деталям проблем, от которых во многом зависит успех создания работоспособных электронно-пучковых энергокомплексов и установок, которые и определяют современный уровень развития этой техники и технологий.*

*Живое общение и наведение связей между специалистами и коллективами для долгосрочного и плодотворного сотрудничества – это одна из важных задач семинара, решение которой позволит продолжить создавать и развивать электронно-пучковое оборудование и технологии, расширяя области их возможных применений, в том числе, в современной индустрии.*

*Пожелаем Семинару всяческих успехов, а его организаторам и участникам решения всех поставленных задач в деле продвижения и развития электронно-пучкового оборудования и сопутствующих технологий.*

Сопредседатель Семинара,  
д.т.н., профессор

 Н.Н. Коваль



**НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ: РЕТРОСПЕКТИВА И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ\****А.А. ГРИШКОВ, М.С. ВОРОБЬЁВ, Н.Н. КОВАЛЬ, С.Ю. ДОРОШКЕВИЧ**Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический 2/3, Томск, 634055, Россия*

Различные технологии с использованием электронных ускорителей начали интенсивно разрабатываться с 1950-х годов, и с тех пор скорость внедрения электронных ускорителей в качестве промышленных или лабораторных инструментов неуклонно возрастает [1–3]. По разным оценкам в год по всему миру может вводиться в эксплуатацию до нескольких сотен электронных ускорителей. Поскольку лабораторный или промышленный электронный ускоритель может эксплуатироваться десятки лет, а география использования, разнообразность конструкций и спектр задач этих ускорителей охватывают многие смежные области физики и технологии, то это создаёт определённые трудности в классификации ускорителей и их отслеживании.

Настоящая работа посвящена отдельному сегменту электронных ускорителей, а именно анализу и классификации данных по истории развития и современному состоянию исследований в области создания и применения пучков большого сечения (ПБС) с их выводом в атмосферу при помощи низкоэнергетических ускорителей электронов. В работе проведён анализ электронных ускорителей, генерирующих электронные пучки большого сечения с их выводом в атмосферу, на основе различных типов эмиссии: источники, основанные на термоэлектронной эмиссии, на взрывной электронной эмиссии, на основе различных разрядов с плазменным катодом и на основе высоковольтного тлеющего разряда. На основе построенных диаграмм параметров таких ускорителей рассмотрена хронология развития и тенденции в их конструировании. На большом массиве экспериментальных данных впервые продемонстрирован «эффект больших площадей», который заключается в уменьшении максимальной плотности тока при увеличении площади источника для условий стабильной генерации электронного пучка. Для ускорителей, основанных на различных типах эмиссии, определены технологические барьеры и особенности перехода от лабораторного оборудования к промышленному. Ретроспективно работа охватывает временной промежуток от момента создания первых низкоэнергетических источников пучков большого сечения в начале 70-х годов до современных образцов лабораторного и промышленного оборудования. Значительная часть излагаемого в докладе материала основана на известных монографиях и сборниках статей, как отдельных авторов, так и авторских коллективов, специализированных аналитических отчётах по электронным ускорителям и их применению для радиационных технологий, в том числе из смежных научных областей, но относящихся к выбранной тематике [1–14] и других источниках.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.П. Черняев, «Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина», Москва: Издательство Московского университета, 2019.
- [2] Карпов Д.А., Косоголов С.Л., «Ускорители электронов с выводом пучка в атмосферу для радиационных технологий», Санкт-Петербург: АО «НИИЭФА», 2021.
- [3] А.А. Новиков, «Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой», Москва: Энергоатомиздат, 1983.
- [4] С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М.Щанин, «Электронные пучки большого сечения», Москва: Энергоатомиздат, 1984.
- [5] Г.А. Месяц (ред.), «Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков», Новосибирск: Наука, 1976.
- [6] Ю.Е. Крейндель, «Источники электронов с плазменным эмиттером», Новосибирск: Наука, 1983.
- [7] П.М. Щанин (ред.), «Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером», Екатеринбург: УИФ Наука. 1993.
- [8] С.И. Суминов, Л.В. Бандерова, «Радиационно-химические процессы и установки за рубежом. Серия “Радиационная химия и технология, радиационная стойкость”», Москва: НИИТЭХИМ, 1986.
- [9] А.А. Брызгин, Н.К. Куксанов, Р.В. Салимов, «Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН», УФН, 2018, Т.188, №6, С. 672-685.
- [10] Р.А. Салимов, «Мощные ускорители электронов для промышленного применения», УФН, 2000, Т.170, №2, С. 197–201.
- [11] E.A. Abramyan, «Industrial Electron Accelerators and Applications», New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [12] E. R. L. Gaughran, A. J. Goudie (Ed.), «Sterilization by ionizing radiation», Montréal: Johnson & Johnson Limited, 1974.
- [13] R.W. Hamm, «Industrial accelerators», IPAC2013: 4th International Particle Accelerator Conference, 12–17 May, Shanghai, China, 2013.
- [14] M.R. Cleland, «Industrial applications of electron accelerators», CERN CDS, 2006.

\* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-79-10015-П).

## ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА ПРОДУКЦИИ НА УСКОРИТЕЛЯХ ИЛУ

В.В. БЕЗУГЛОВ, А.А. БРЯЗГИН, Л.А. ВОРОНИН, М.В. КОРОБЕЙНИКОВ, В.М. РАДЧЕНКО, А.В. СИДОРОВ,  
В.О. ТКАЧЕНКО, Е.А. ШТАРКЛЕВ

ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия

В последние десятилетия приобрело большое значение внедрение эффективных, экологически чистых и экономичных методов стерилизации медицинской и сельскохозяйственной продукции. Традиционно применяемые для этих целей методы, такие как пар, этилен-оксид, а также изотопные источники ( $^{60}\text{Co}$  и др.) не позволяют полностью решить указанные задачи. В связи с этим, осуществляется постепенный переход на радиационную стерилизацию медицинской продукции электронным пучком, становится актуальной электронная пастеризация пищевых продуктов, животноводческих кормов и семян.

Импульсные линейные ускорители электронов (ИЛУ), выпускающиеся в ИЯФ СО РАН, способны работать как в режиме электронной обработки продукции, так и в режиме генерации тормозного рентгеновского излучения, обладающего более высокой проникающей способностью, и оптимально подходят для использования в качестве универсальных стерилизационных комплексов. Ускорители ИЛУ перекрывают диапазон энергий ускоренных электронов от 0.6 до 10 МэВ и обеспечивают выходную мощность пучка до 100 кВт.

В данной работе перечислены основные и перспективные области применения ускорителей ИЛУ. Рассмотрено их устройство и принцип работы на примере двух основных моделей: ускорителя ИЛУ-10 с вертикальным выпуском пучка, рассчитанного на энергию ускоренных электронов до 5 МэВ и среднюю мощность пучка до 50 кВт, и ускорителя ИЛУ-14 с горизонтальным выпуском пучка, энергией электронов до 10 МэВ и мощностью пучка до 100 кВт (рис.1).

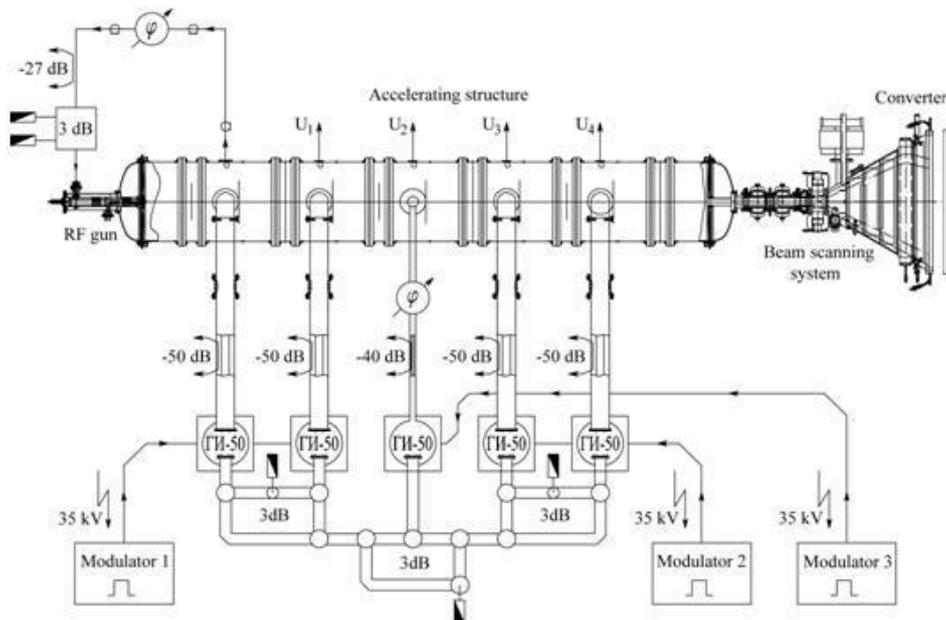


Рис.1. Блок-схема ускорителя ИЛУ-14.

В работе описаны механизмы взаимодействия электронного пучка с микробиологическими объектами, особенности распределения поглощённой дозы по глубине вещества. Также рассмотрено устройство конвертера электронного пучка в тормозное излучение, использование которого позволяет увеличить массовую толщину обрабатываемой продукции в несколько раз по сравнению с электронной модой. Приведены оценки производительности ускорителей ИЛУ при радиационной стерилизации и электронной пастеризации продукции.

## **СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ПУЧКА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ИЛУ**

*В.В. БЕЗУГЛОВ, А.А. БРЯЗГИН, Л.А. ВОРОНИН, М.В. КОРОБЕЙНИКОВ, В.М. РАДЧЕНКО, А.В. СИДОРОВ,  
В.О. ТКАЧЕНКО, Е.А. ШТАРКЛЕВ*

*ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия*

В данной работе представлены расчеты систем выпуска и поворота электронного пучка, разработанных для импульсных ускорителей электронов серии ИЛУ за последние годы. Стандартное выпускное устройство, обычно используемое в ускорителях ИЛУ, представляет собой вакуумную камеру-раструб треугольной формы. На верхнем фланце раструба расположена камера развертки пучка со сканирующим электромагнитом, на нижнем фланце – выпускное окно с титановой фольгой. При проектировании системы питания сканирующего электромагнита учитывалось влияние вихревых токов, возникающих в металлических стенках камеры развёртки пучка, на сканирующее магнитное поле.

В работе описана новая система сканирования пучка, отличительной особенностью которой от предыдущих аналогов является введение коррекции формы сканирующего магнитного поля. Благодаря этому, удалось заметно улучшить равномерность распределения выходного дозного поля на поверхности обрабатываемой пучком продукции: величина неравномерности достигает  $\pm 5\%$  при ширине сканирования до 80 см. Приведены результаты испытаний данной системы на ускорителе ИЛУ-10 (5 МэВ, 50 кВт).

Описана система выпуска пучка для ускорителя ИЛУ-14 (10 МэВ, 100 кВт), содержащая помимо описанной выше системы сканирования систему фокусировки пучка и коррекции его оси после выхода из ускоряющей структуры, а также выпускной раструб новой конструкции, позволяющий увеличить ширину сканирования пучка до 160 см без ухудшения равномерности распределения выходного дозного поля.

Также в работе приведено краткое описание электромагнитной системы для кругового облучения полиэтиленовых труб, которое осуществляется путём создания знакопеременного магнитного поля в зоне облучения за раструбом ускорителя. Описана система для поворота монохроматических электронных пучков, состоящая из двух магнитных зеркал, позволяющая компенсировать угловые расходимости пучка и получать после поворота электронный пучок с фазовыми характеристиками близкими к начальным. Приведен расчет такого поворотного устройства, общий вид установки, изготовленной для проверки предлагаемой системы поворота и экспериментальные данные поворота электронного пучка на  $180^\circ$ .

**ПРОГРЕСС В СОЗДАНИИ И ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВЫХ УСТАНОВОК С СЕТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ\***

*Н.Н. КОВАЛЬ, М.С. ВОРОБЬЁВ, В.Н. ДЕВЯТКОВ, П.В. МОСКВИН, С.Ю. ДОРОШКЕВИЧ, М.С. ТОРБА,  
М.А. МОКЕЕВ, Р.А. КАРТАВЦОВ*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Российская Федерация*

Развиваемая в течение последних лет концепция разработки плазменных источников электронов со стабилизацией эмиссионной границы плазмы мелкоструктурной металлической сеткой имеет ряд неоспоримых преимуществ перед традиционными термоэлектронными источниками: большие площади эмиссии (до долей квадратного метра) с относительно низкой (не хуже единиц-десятков процентов) неоднородностью плотности тока; высокая энергетическая эффективность, т.к. нет источника накала катода; малое (единицы, десятки микросекунд) время готовности; возможность малоинерционной модуляции тока эмиссии и, соответственно, тока пучка; широкий диапазон независимой регулировки всех основных параметров (тока, длительности, энергии, частоты) пучка. Перед источниками электронов со взрывоэмиссионными катодами можно выделить следующие достоинства: потенциально больший срок службы эмиттера; отсутствие микронеоднородностей по сечению электронного пучка связанных с функционированием взрывоэмиссионных центров; возможность генерации пучков с регулируемым энергетическим спектром, вплоть до моноэнергетического пучка; более широкий диапазон изменения длительности и частоты следования импульсов; практически отсутствие влияния собственных магнитных полей на формирование и транспортировку пучка. Всё вышеперечисленное делает перспективным создание источников электронов с сеточным плазменным эмиттером (СПЭ). В данной работе рассмотрены несколько электронных источников с СПЭ, разработанных и созданных в ИСЭ СО РАН в последние годы для генерации пучков различных конфигураций, которые использовались как для исследования принципов получения таких пучков, так и для применения их в ряде технологических процессов.

Во-первых, это модернизированный в течение последних четырёх лет источник электронов “SOLO-M”, отличающийся от предыдущего поколения таких источников [1] расширенным диапазоном основных параметров. Приведены характеристики пучка и примеры модификации поверхности материалов с применением такого пучка.

Во-вторых, это модифицированный широкоапертурный электронный источник “ДУЭТ” с выводом пучка с сечением (15x75) см<sup>2</sup> в атмосферу через фольговое выпускное окно [2], у которого была улучшена вакуумная система, переработаны и усовершенствованы системы электропитания и управления, а также создана система диагностики электронного пучка. Приведены примеры использования пучка для обработки полимеров и сельхозпродукции.

В-третьих, создан и представлен источник электронов с многодуговым плазменным катодом, на котором получен рекордный по основным параметрам (ток 700 А, начальное ускоряющее напряжение 22 кВ, длительность импульса 140 мкс) пучок диаметром до 75 мм, позволяющий проводить модификацию поверхности материалов путём импульсного расплава поверхностного слоя и сверхбыстрого охлаждения за счёт теплопроводности материала с возможностью управления мощностью пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности.

В-четвёртых, приведена конструкция и основные параметры созданного источника электронов с СПЭ с радиально-сходящимся пучком электронов, предназначенным для модификации образцов и изделий цилиндрической формы.

Приводятся также перспективные направления дальнейшего совершенствования созданного оборудования, а также возможные сферы его использования как в научных исследованиях, так и в технологических целях.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль / Импульсный электронный источник с плазменным сеточным катодом и продольным магнитным полем для модификации поверхности материалов и изделий // Известия ВУЗов. Физика. 2017, Т. 60, №9, С. 44–48.  
[2] М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин / Источник электронов с многоапертурным плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу // ПТЭ, 2015, №5, С. 112–120

\* Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 20-79-10015-П).

## 50 ЛЕТ УСКОРИТЕЛЯМ ЭЛВ

*Н.К. КУКСАНОВ, Д.С. ВОРОБЬЕВ, Е.В. ДОМАРОВ, Ю.И. ГОЛУБЕНКО, А.И. КОРЧАГИН, Р.А. САЛИМОВ,  
С.Н. ФАДЕЕВ, И.К. ЧАКИН, А.В. СЕМЕНОВ, А.В. ЛАВРУХИН, В.Г. ЧЕРЕПКОВ*

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

В конце 1960-х годов в России возникла неотложная потребность в применении электронно-лучевой модификации кабельной изоляции. Проблема связана с тем, что дешевые проводники с изоляцией из модифицированного полиэтилена могли заменить более дорогие термостойкие составы. Эти проводники широко использовались в авиационной, судостроительной и нефтедобывающей промышленности, а также в военных отраслях. Применение электронно-лучевой модификации позволило снизить затраты и улучшить качество производимых изделий.

Несмотря на то, что метод радиационной модификации был уже известен, существующие ускорители трансформаторного типа, включая те, которые использовались на опытном заводе всесоюзного научно-исследовательского института кабельной промышленности, оставались недостаточными для обеспечения требуемого объема производства и надежности. В связи с этим, в 1971 году Министерство электротехнической промышленности СССР обратилось в Институт ядерной физики имени Будкера с просьбой разработать более совершенные ускорители электронов для кабельных заводов, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками, такими как надежность, большая мощность пучка, простота ремонта и управления. Планировалось установить около 15 ускорителей в течение 15 лет.

Институт ядерной физики успешно справился с поставленной задачей, и к лету 1974 года завершил все испытания, проведенные как в Новосибирске, так и на опытном заводе всесоюзного научно-исследовательского института кабельной промышленности. Конструктивные решения ускорителей оказались эффективными и остаются актуальными и по сей день, несмотря на изменения в элементной базе за последние 50 лет. На сегодняшний день Институт ядерной физики в сотрудничестве с партнерами из Южной Кореи и Китая поставил более 230 ускорителей, из которых более 120 находятся в эксплуатации.

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГИИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛВ И СЛОЖНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ЭТИМ**

*Д.С. ВОРОБЬЕВ, Н.К. КУКСАНОВ, Е.В. ДОМАРОВ, С.Н. ФАДЕЕВ, А.И. КОРЧАГИН,  
В.Г. ЧЕРЕПКОВ, М.Г. ГОЛКОВСКИЙ*

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

В последние десятилетия промышленные ускорители серии ЭЛВ, разработанные в Институте Ядерной Физики (ИЯФ), остаются ключевым инструментом в процессах сшивки полимеров (например, полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид), производстве термоусаживаемых трубок, вспененного полиэтилена, а также в процессах стерилизации, обработки сточных вод и прочих промышленных операциях. Однако, необходимость в повышении максимальной энергии ускоренных электронов продолжает расти. Вплоть до 2019 года максимальной энергией 2.5 МэВ обладала модель ЭЛВ-8. Новая разработка, ЭЛВ-15, увеличила максимальную энергию до 3 МэВ, а сейчас ИЯФ активно разрабатывает модель ЭЛВ-16, которая обещает достичь 4 МэВ.

Статья обсуждает сложности, связанные с повышением максимальной энергии ускоренных электронов, и проблемы, такие как пробой в ускорительных трубках, броски тока, конструктивное увеличение размеров первичной обмотки и длины ускорительной трубки, а также изменение оптической системы электронного пучка с использованием электромагнитных линз и разверток.

Понимание и решение данных технических проблем является критически важным для дальнейшего развития промышленных ускорителей, способствуя улучшению производственных процессов и открывая новые возможности для промышленных приложений.

## **МЕТОДЫ РАСЧЕТА И СИМУЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛВ**

*В. В. ЖИВОТЯГИН, Д.С. ВОРОБЬЕВ, Е.В. ДОМАРОВ, Н.К. КУКСАНОВ.*

*Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск*

В Институте ядерной физики, начиная с 1971 года разрабатываются и производятся промышленные ускорители серии ЭЛВ. Они отличаются высоким КПД (порядка 70-80%), стабильностью во время работы, небольшими размерами и высокой мощностью. Благодаря этим достоинствам ускорители ЭЛВ находят широкий спектр применений в промышленности: модифицирование полимерных изделий, технологии для экологических целей и т.д.

Ускорители серии ЭЛВ покрывают диапазон энергий от 0.4 до 3 МэВ при максимальном токе пучка электронов до 500 мА.

Хотя ускорители серии ЭЛВ покрывают большой диапазон энергий, для промышленных целей, таких как, модификация полиэтиленовой изоляции, производство термоусадочных трубок и лент и т.д., возникла потребность разработать новый ускоритель с энергией от 1 до 2 МэВ, током пучка до 60 мА и мощностью 120 кВт. В связи с этим необходимо произвести анализ и расчет высоковольтного выпрямителя, обладающего высокой надежностью, высоковольтной прочностью и малым числом газовых пробоев, а также подходящего под заданные параметры. Для этих целей будет использоваться два метода расчета: первый исходя из магнитных полей в первичной обмотке и второй основывается на нахождении индуктивностей катушек, посчитанных по геометрическим размерам.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] В.Н. Зайцев, С.А. Кузнецов, Н.К. Куксанов, Р.А. Салимов, С.Н. Фадеев, В.Г. Черепков. «Высоковольтный источник питания мощного электронного ускорителя». *ИЯФ СО АН СССР. Препринт 90-50. Новосибирск 1990.*

## ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ИСТОЧНИКЕ ЭЛЕКТРОНОВ С РАДИАЛЬНО СХОДЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ\*

М.С. ТОРБА, С.Ю. ДОРОШКЕВИЧ, Р.А. КАРТАВЦОВ, М.С. ВОРОБЬЁВ, Н.Н. КОВАЛЬ, С.А. СУЛАКШИН

Институт сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), Томск, Россия

Проведение качественной обработки различных материалов и изделий с целью повышения функциональных и эксплуатационных свойств при помощи электронных пучков является актуальной и развивающейся темой [1, 2]. В данной работе приведены результаты экспериментов по определению параметров эмиссионной плазмы и их распределение в сеточном плазменном эмиттере на основе дуги низкого давления. Приведённые исследования направлены на определение степени неоднородности тока эмиссии при генерации электронного пучка.

Измерение параметров плазмы дугового разряда осуществлялось с помощью автоматизированной системы измерения [3]. В качестве зонда использовался одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра длиной 5 мм и диаметром 0,3 мм, подключенный относительно полого анода разряда.

На азимутальном распределении концентрация плазмы составила  $n_e = (5,7 \pm 0,4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  при токе разряда  $I_d = 120 \text{ А}$  и  $n_e = (3,6 \pm 0,2) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  при токе  $I_d = 90 \text{ А}$ . Температура электронов в среднем составила 40 эВ, а потенциал плазмы составил  $\sim 90 \text{ В}$ . Аксиальное распределение концентрации эмиссионной плазмы по длине плазменного эмиттера показало, что концентрация дуговой плазмы уменьшается с  $9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  по мере удаления от плазмогенератора, на оси которого располагался зонд. Потенциал плазмы при измерениях менялся незначительно.

Для оценки динамики параметров плазмы в течение импульса зонд располагался в центре плазменного эмиттера, как и в случае азимутального распределения, напротив одного из плазмогенераторов. Сравнение зондовых характеристик в различные моменты измерения в течение импульса показало, что параметры плазмы изменяются примерно до 60-ой мкс и практически не изменяются после этого, что, вероятно, связано с временем заполнения плазмой объема эмиттера.

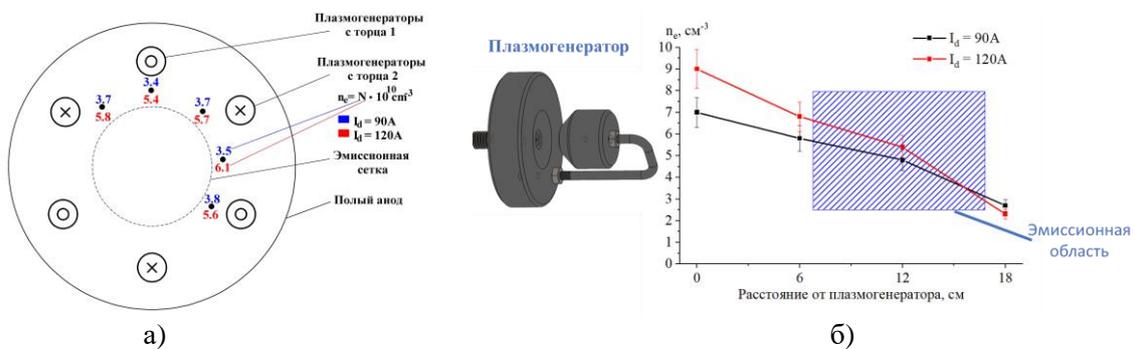


Fig.1. Графики распределения концентрации эмиссионной плазмы дугового разряда по азимуту (а) и длине плазменного эмиттера (б). Параметры:  $p = 5 \times 10^{-2} \text{ Па}$ ,  $t_{\text{и}} = 100 \text{ мкс}$ ,

Созданная многодуговая система обеспечивает достаточно однородную плазму в области отбора электронов, однако при генерации радиально сходящегося электронного пучка следует учитывать динамику разряда и локальное изменение концентрации плазмы, что крайне важно для качественной и однородной модификации поверхности изделий цилиндрической и более сложной формы.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Torba, M.S., Doroshkevich, S.Y., Vorobyov, M.S. et al. Electron Source with a Radially Converging Beam and a Multiarc Plasma Cathode. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 87 (Suppl 2), S318–S323 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1062873823704798>
- [2] Н. Н. Коваль, В. Н. Девятков, М. С. Воробьев, “Источники электронов с сеточным плазменным эмиттером: прогресс и перспективы,” Известия высших учебных заведений. Физика, Т. 63, №. 12, с. 7–16, Oct. 2020, doi: 10.17223/00213411/63/10/7.
- [3] Measurement of plasma parameters in an electron source with a plasma cathode based on a low-pressure arc discharge / S.Y. Doroshkevich, M.S. Vorobyov, S.S. Kovalsky [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. The proc. 14th Inter. Conf. "Gas Discharge Plasmas and Their Applications". – 2019. – 012006.

\* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-29-00939).

## НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ОРБИТРОННЫЙ ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД С ПОЛЫМ КАТОДОМ В УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВТР\*

*С.Ю. ДОРОШКЕВИЧ, А.А. ГРИШКОВ, М.С. ТОРБА, М.С. ВОРОБЬЁВ, Н.Н. КОВАЛЬ*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический 2/3, Томск, 634055, Россия*

В ускорителях электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) для генерации плазменного эмиттера ионов часто используют самостоятельный тлеющий разряд с полым катодом и тонкопроволочным анодом, так называемый орбитронный разряд [1]. Благодаря дополнительной осцилляции электронов вокруг анода малого диаметра в таком разряде можно создавать плазму в достаточно больших объемах (до  $\sim 0,1 \text{ м}^3$ ) с концентрацией  $10^8\text{--}10^9 \text{ см}^{-3}$ .

В исследуемом ускорителе (Рис.1.) орбитронный разряд устойчиво функционирует при давлении гелия 1–5 Па и токе орбитронного разряда 50–500 мА [2]. Столь узкий диапазон давлений гелия определяется снизу требованием устойчивого горения орбитронного разряда, а сверху – переходом ВТР в самостоятельную форму. При этом напряжение горения такого орбитронного разряда составляет сотни вольт (500–700 В) с примерно равными значениями как прианодного, так и прикатодного падения потенциала. Наше моделирование показало, что для наименьших потерь генерируемого электронного пучка на анодной и опорной решетках требуется переход к электродной системе, в которой прикатодное падение должно составлять около 50–100 В [3]. В этом случае энергию ионов, поступающих из эмиссионной плазмы в ускоряющий промежуток, можно считать оптимальной. К повышению эффективности вывода пучка в атмосферу также должен привести переход к электродной системе плазменного эмиттера, работающего при более низком давлении газа, но обеспечивающего его большую степень ионизации. В этом случае эффективность вывода пучка в атмосферу возрастает за счет снижения фонового тока в ускоряющем промежутке [3]. Обе эти задачи можно решить за счет введения термоэмиттера прямого накала в имеющуюся систему плазменного эмиттера, реализуя переход к несамостоятельному тлеющему разряду с полым катодом с дополнительным источником электронов. Термоэмиттер включался относительно полого катода и обеспечивал ток эмиссии сравнимый по порядку величины с током вспомогательного разряда ускорителя. Дополнительный термоэмиттер позволил снизить напряжение горения разряда до 200 В, а также расширить диапазон рабочего давления на полпорядка вниз, повысив, тем самым, электрическую прочность ускоряющего промежутка ускорителя.

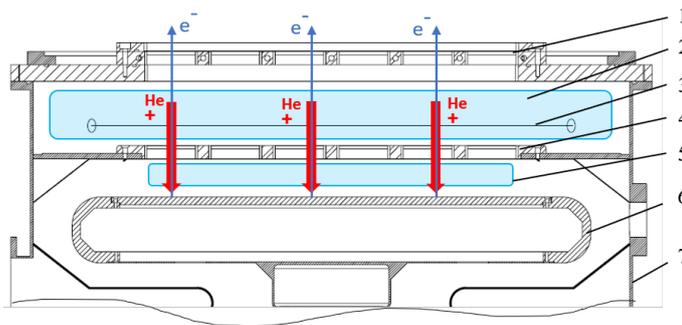


Рис.1. Схема конструкции ускорителя электронов с несамостоятельным ВТР: 1 – выводное фольговое окно; 2 – область вспомогательного разряда; 3 – проволочный анод; 4 – анодная решетка; 5 – область ВТР; 6 – высоковольтный катод; 7 – вакуумная камера.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] С. Л. Косоголов, Н. А. Успенский, В. Я. Шведюк, [и др.], «Широкоапертурные низкоэнергетичные ускорители электронов АО "НИИЭФА" на основе высоковольтного тлеющего разряда», Известия ВУЗов. Физика. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 41–47.
- [2] С. Ю. Дорошкевич, М. С. Воробьев, М. С. Торба, [и др.], «Эффективный способ генерации и вывода электронного пучка в атмосферу в широкоапертурном ускорителе на основе ионно-электронной эмиссии», ПТЭ. – 2023. – № 3. – С. 53 – 60.
- [3] A. A. Grishkov, M. S. Vorobyov, S. Yu. Doroshkevich, V. A. Shklyayev, «Simulation of a wide-aperture electron accelerator based on ion-electron emission in repetitively pulsed mode», Proc. of 8th Inter. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022). Congress Proceedings, Tomsk, 2022. – P. 118–127.

\* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00998).

**СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПРОБОЯ УСКОРЯЮЩЕГО ПРОМЕЖУТКА ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ \****П.В. МОСКВИН, В.Н. ДЕВЯТКОВ, Н.Н. КОВАЛЬ, М.С. ВОРОБЬЁВ**ИСЭ СО РАН, Томск, Россия*

Важные параметры источников электронов, такие как максимальные плотность энергии или плотность мощности пучка для вакуумного случая определяются как геометрией электродной системы, состоянием и свойствами катода, других электродов, так и условиями транспортировки пучка. Широко известны источники электронов с плазменными катодом и анодом, ускоряющий зазор в которых устанавливается самосогласованно с током пучка. Компенсация объемного заряда пучка электронов анодной плазмой и внешнее транспортирующее магнитное поле позволяют отодвинуть границу максимально достижимой амплитуды транспортируемого тока до значений, практически не реализуемых для субмиллисекундных пучков, создаваемых в традиционных электродных системах, из-за потери электрической прочности ускоряющего зазора между физическими электродами. Настоящая работа посвящена исследованию способов снижения вероятности пробоя ускоряющего промежутка источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе дуги низкого давления с открытой границей анодной плазмы, когда ускорение пучка происходит в слое между катодной и анодной плазмами.

Сеточная стабилизация эмиссионной границы катодной плазмы позволяет добиться достаточно устойчивой работы устройства в широком диапазоне основных параметров, когда размеры ячейки эмиссионной сетки источника электронов выбирают исходя из предполагаемых параметров катодной плазмы. Однако, как показано, поток ускоренных ионов в разрядный промежуток с границы анодной плазмы может существенно влиять на потенциал катодной плазмы и функционирование эмиттера. Кроме этого, в импульсном дуговом эмиттере может иметь место временная динамика распределения концентрации эмиссионной плазмы, при которой в первые микросекунды и даже десятки микросекунд наблюдается увеличенное к оси системы значение плотности плазмы относительно стационарной величины. Ситуация может усугубляться из-за переходных процессов в эмиттере, вызывающих увеличение тока на фронте импульса, но применение блоков электропитания катодного разряда с малой (порядка  $10^7$  А/с) скоростью роста тока позволяет успешно избежать этой проблемы.

Для пучков с длительностью импульса  $\leq 50$  мкс уменьшения вероятности пробоя с (18-20) % до (2-13) % достигли, специально создавая плазменный анод до момента генерации пучка. Это позволяет улучшить условия компенсации и транспортировки пучка на начальном этапе, выполнить ионно-плазменную очистку ускоряющего электрода и облегчить инициирование разряда в плазменном эмиттере.

Существенным фактором, провоцирующим пробой ускоряющего промежутка, является образующаяся коллекторная плазма, если она достигает ускоряющего зазора. Показано, что увеличение длины канала транспортировки с 30-и до 80 см приводит к увеличению максимальной мощности пучка в ускоряющем промежутке, ограниченной его электрическим пробоем, в 1,5 – 3 раза в диапазоне длительностей импульса тока пучка (50-150) мкс при его диаметре 2,6 см. Конструктивно выполненный поворот канала транспортировки пучка, длиной 80 см на 90 градусов позволяет дополнительно увеличить общую максимальную мощность 150-микросекундного пучка электронов при ускоряющего напряжения 20 кВ и давлении аргона 45 мПа в  $\approx 1,5$  раза с 2,7 до 4,1 МВт, а при давлении 25 мПа – в  $\approx 2$  раза с 2,6 до 5,5 МВт относительно прямопролетной транспортирующей магнитной системы той же длины. Удалось исключить или кардинально ослабить неуправляемые всплески тока пучка, в ряде случаев возникающие под влиянием коллекторной плазмы. Таким образом, разработанная и созданная поворотная магнитная система транспортировки пучка, генерируемого источником электронов с сеточным плазменным эмиттером, улучшает стабильность и управляемость током пучка при повышенном ускоряющем напряжении и рабочем давлении в условиях значительного газовыделения с коллектора или обрабатываемых пучком образцов и деталей, позволяя расширить диапазон физических исследований по материаловедению в области предельных плотностей мощности электронного пучка.

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 20-79-10015-П).

## КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕКТРОНОГО ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЯХ ТИПА ЭЛВ, ИХ ДИАГНОСТИКА И МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ

*Е.В. ДОМАРОВ, Д.С. ВОРОБЬЕВ, Ю.И. ГОЛУБЕНКО, А.И. КОРЧАГИН Н.К. КУКСАНОВ, Р.А. САЛИМОВ, С.Н. ФАДЕЕВ, В.Г. ЧЕРЕПКОВ, И.К. ЧАКИН*

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

В ускорителях типа ЭЛВ ускорительная трубка расположена внутри вторичной и первичной обмотках и может быть несоосна или наклонена относительно оси магнитных полей. С внешней стороны ускорительной трубки установлены экранирующие кольца, которые экранируют эти поперечные и продольные поля. Но незначительная часть этих полей проникает в ускорительную трубку, что и приводит к колебаниям электронного пучка. Для ускорителей с выпускным устройством раструбного типа данные колебания не критичны, т.к. электронный пучок выпускается в атмосферу через титановую фольгу и разворачивается в длину фольги на 1500 мм и в ширину на 70 мм. В ускорителях ЭЛВ которые способны выводить сфокусированный электронный пучок в атмосферу, колебания пучка приводят к разрушению диафрагм выпускного устройства. Минимальный диаметр отверстия в диафрагме составляет 2,5мм [1,2].

В работе необходимо было диагностировать эти колебания и научиться подавлять их, чтобы увеличить ресурс диафрагм.

В экспериментах мы использовали ускоритель ЭЛВ-8, рабочий диапазон энергий данного ускорителя составляет от 1,4-2,5 МэВ, максимальный ток пучка 50 мА и максимальная мощность в пучке 100 кВт. Для исследований колебаний и подавления их была собрана схема, показанная на рисунке 1

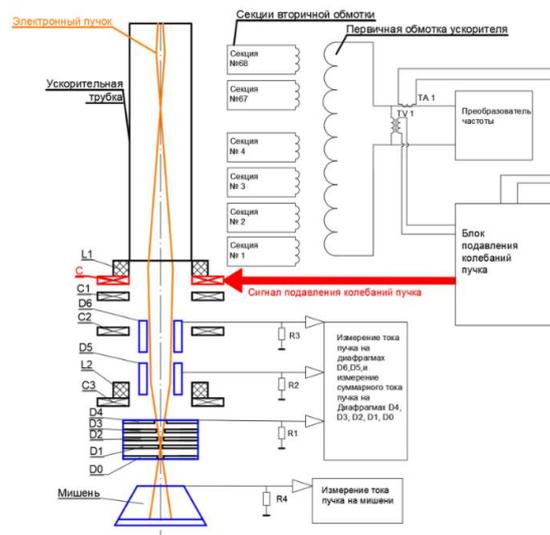


Рис. 1 Схема подавления колебаний. ТА1 – трансформатор тока, TV1 – трансформатор напряжения, С – катушки антиколебаний. D0, D1, D2, D3, D4 – диафрагмы с отверстиями 5,2,5; 3; 4 и 4,5 мм соответственно; D5- водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 10мм и длиной 200мм; D6- водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 12мм и длиной 100 мм. C1, C2, C3- катушки коррекции; L1, L2 – фокусирующие электромагнитные линзы.

Без подавления колебания пучка удалось выпустить в атмосферу пучок с током  $I_0 = 15$  мА и энергией пучка  $E = 2,5$  МэВ. При этом суммарная мощность оседаемого пучка на диафрагмах D0, D1, D2, D3, D4 составила 1,5 кВт, дальнейшее увеличение тока пучка приведет к разрушению этих диафрагм. С подавлением колебаний нам удалось выпустить электронный пучок с током 40 мА с энергией 2,5 МэВ. При этом суммарная мощность оседаемого пучка на диафрагмах D0, D1, D2, D3, D4 составила 0,2 кВт, что позволило увеличить ресурс диафрагм.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. V. Domarov, D. S. Vorobev, M. G. Golkovsky, et al., "Research of Parameters of the Powerful Electron Beam of Industrial Accelerator ELV," Sib. Fiz. Zh. 14 (2), 5–20 (2019); doi: 10.25205/2541-9447-2019-14-2-5-20.
- [2] E. V. Domarov, Yu. I. Golubenko, N. K. Kuksanov, R. A. Salimov, S. N. Fadeev, and I. K. Chakin, "DEVICE FOR CREATING A PRESSURE DIFFERENTIAL USING DIFFERENTIAL PUMPING" Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2022, Vol. 63, No. 1, pp. 41–46. doi: 10.1134/S0021894422010072

**МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОВОРОТА ПУЧКА В ПРОМЫШЛЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ ИЛУ-10**

*В. А. ПАВЛЮЧЕНКО, А. А. БРЯЗГИН, А. А. СТАРОСТЕНКО, Е. А. ШТАРКЛЕВ*

*<sup>1</sup>ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия*

В работе представлены результаты разработки магнитной системы для поворота электронного пучка в промышленном ускорителе ИЛУ-10 [1]. Ускоритель ИЛУ-10 генерирует пучок электронов с энергией от 3,5 до 5 МэВ и мощностью до 50 кВт. Имеющаяся конструкция позволяет инжектировать электроны только вертикально вниз. Существуют задачи, требующие горизонтальное направление электронного пучка. В связи с этим было необходимо разработать выпускное устройство для ускорителя ИЛУ-10, которое позволит работать осуществлять выпуск электронного пучка вертикально или, повернуть пучок на 90 градусов для выпуска горизонтально. В работе представлены два способа решения этой проблемы. Первая система состоит из двух дипольных магнитов. В качестве одного диполя был взят дипольный магнит, который уже разработан и используется в установке. Изменения тока в катушках 1-го диполя приводит к отклонению луча. Во втором диполе ток остается постоянным и пучок в нем доворачивается до угла 90 градусов для всех углов отклонения после первого диполя. Система может обеспечивать развертку пучка на мишени до 1500 мм. Другая система основана на использовании магнитного зеркала. Пучок из ускоряющей структуры попадает в магнитную линзу, а затем сфокусированный луч попадает в магнитное зеркало. Это устройство будет работать при одном значении тока и поворачивать частицы на один и тот же угол, независимо от величины их энергии. Для сканирования предполагается использовать дипольный магнит, используемый в работающей системе. В работе представлены результаты моделирования двух магнитных систем в программной среде OPERA, а также рассчитаны треки частиц в требуемом диапазоне энергий.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Брязгин А.А., Куксанов Н.К., Салимов Р.А. Ускорители электронов для промышленного применения разработанные в ИЯФ им Г.И. Будкера СО РАН // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 6. С. 672-685. DOI: 10.3367/UFN.2018.03.038344. Переводная версия DOI: 10.3367/UFN.2018.03.038344.

## ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИОННО-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ИЗ ПЛАЗМЫ В ИСТОЧНИКЕ ЭЛЕКТРОНОВ С СЕТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ\*

*Р.А. КАРТАВЦОВ, М.А. МОКЕЕВ, М.С. ВОРОБЬЁВ, А.А. ГРИШКОВ, Н.Н. КОВАЛЬ, П.В. МОСКВИН, М.С. ТОРБА*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

В источнике электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы ток в ускоряющем промежутке  $I_0$  определяется несколькими составляющими [1]:

$$I_0 = \alpha I_d + I_i (1 + (1 - \Gamma) \gamma_2 + \Gamma \gamma_1), \quad (1)$$

где  $I_d$  – ток разряда;  $\alpha$  – коэффициент извлечения электронов;  $I_i$  – ток ускоренных ионов из анодной плазмы;  $\gamma_2$  – коэффициент ионно-электронной эмиссии с эмиссионного электрода;  $\gamma_1$  – коэффициент ионно-электронной эмиссии из плазмы,  $\Gamma$  – эффективная геометрическая прозрачность эмиссионного электрода. Коэффициент  $\gamma_1$ , обусловленный попаданием ускоренных ионов в плазменный катод, был введен в [2]. Однако к настоящему моменту не было работ, посвящённых измерению данного коэффициента по причине сложности разделения друг от друга слагаемых тока  $I_0$ , заключающуюся в том, что при прекращении тока  $I_d$  в эмиттере всегда имеются электроды, подверженные бомбардировке ускоренными ионами из распадающейся анодной плазмы, в результате которой эти электроды приобретают положительный потенциал автосмещения относительно остальных электродов эмиттера. Компенсация этого потенциала плазменными электронами приводит к отсутствию извлечения электронов из плазменного эмиттера, т.е.  $(\alpha I_d + I_i \Gamma \gamma_1) = 0$ .

В данной работе представлен способ измерения коэффициента  $\gamma_1$  из плазмы дугового разряда в источнике электронов «СОЛЮ» с сеточным плазменным катодом [3]. Данный способ заключается в изменении системы электропитания разряда за счет включения дополнительных диодов VD1 и VD2 таким образом, чтобы в момент прекращения тока  $I_d$  ускоренные ионы из анодной плазмы не приводили к изменению потенциалов электродов эмиттера (рис. 1, а). Таким образом обеспечивается возможность выхода электронов из эмиттера при  $I_d=0$ . Сравнивая осциллограммы токов  $I_0$  до и после преобразования источника питания разряда (рис. 1, б) и принимая  $\Gamma=0,4$  и  $\gamma_2=2,3$ , можно оценить коэффициенты  $\gamma_1$  и  $\alpha$ .

Основываясь на проведенных экспериментах (рис. 1, б), оценочное значение коэффициента ионно-электронной эмиссии из плазмы составляет  $\gamma_1 \approx 1,25$ , а коэффициента извлечения электронов  $\alpha \approx 0,6$ , что важно для детального анализа процесса эмиссии электронов из плазменного катода и обоснования его динамических характеристик при управлении током пучка.

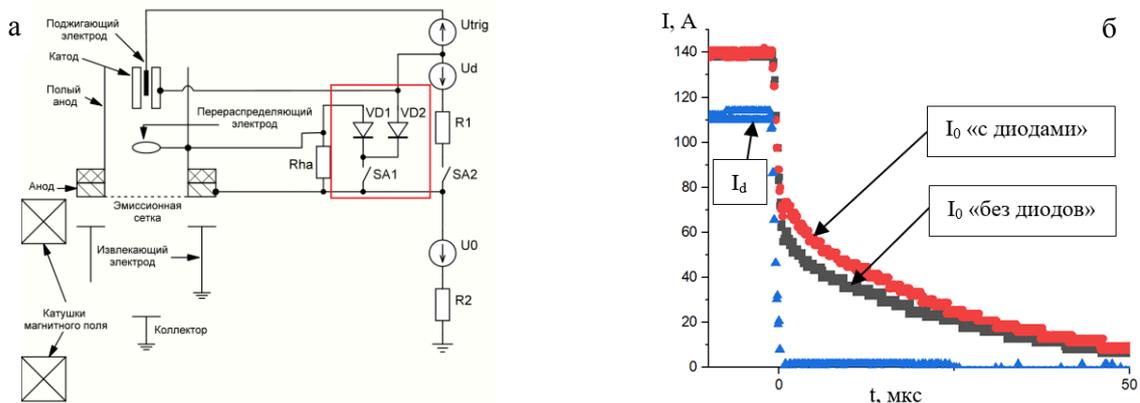


Рис. 1. а – схема экспериментальной установки, б – осциллограмма токов  $I_0$  с диодами VD1 и VD2 и без них при  $p=30$  мПа и  $U_0=8$  кВ

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] П. В. Москвин, М. С. Воробьев, А. А. Гришков [и др.]. Письма в Журнал технической физики, Т. 49, № 11. с. 43-46, 2023, doi: 10.21883/PJTF.2023.11.55538.19557.
- [2] В.А. Груздев, Ю.Е. Крейндел, Ю.М. Ларин, ТВТ, 11 (3), 482 (1973).
- [3] М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин, Т.В. Коваль, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Торба, В.А. Леванисов, ТВТ, 60 (4), 488 (2022). DOI: 10.31857/S0040364422040160

\* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №23-29-00939).

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКА ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА СИНУС-220М ДЛЯ АНТИМИКРОБНОЙ ОБРАБОТКИ КАКАО-ПОРОШКА\***

*К.В. АФАНАСЬЕВ<sup>1</sup>, В.В. РОСТОВ<sup>1</sup>, А.С. СТЕПЧЕНКО<sup>1</sup>, Р.Х. ГАЙСИН<sup>2</sup>, М.А. ДРОТИКОВ<sup>2</sup>, П.С. ПРОЗОРЕНКО<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), Томск, Россия

<sup>2</sup>ООО «НПП «Корад», Санкт-Петербург, Россия

Источник импульсного электронного пучка СИНУС-220М предназначен для использования в радиационных технологических процессах с использованием выведенного в атмосферу электронного пучка, таких как микробиологическая обработка пищевой порошковой продукции. Источник разработан и изготовлен Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) в 2023 году.

Технические характеристики ускорителя СИНУС-220М:

- максимальная энергия электронов в спектре 0,5 МэВ;
- средний ток пучка (при частоте следования импульсов 30 Гц) 1 мА;
- частота следования импульсов 10-30 Гц;
- средняя мощность пучка электронов до 0,5 кВт;
- размер поля облучения на расстоянии 100 мм от выпускного окна 90мм\*270мм;
- мощность, потребляемая от сети 1,5 кВт.

Молотое какао (продукт) при помощи шнекового транспортера подается в бункер вибропитателя. Вибропитатель с заданной производительностью ровным слоем подает какао-порошок на ленточный транспортер, продукт перемещается по транспортеру в зону облучения пучком электронов. В зоне облучения ленточный транспортер перемещает продукт со скоростью от 5 до 50 м/мин, для получения требуемой дозы облучения. После облучения какао-порошок собирается в накопительный бункер для фасовки в упаковочную тару (бумажные мешки).

При облучении электронным пучком с энергией электронов 0,5 МэВ толщина слоя какао-порошка должна быть не более 5 мм, при этом средняя насыпная плотность продукта составила  $\rho = 0,15 \text{ г/см}^3$ . Поглощенная доза может регулироваться в широких пределах от 1 до 20 кГр и зависит от скорости ленточного конвейера под пучком, и частоты работы ускорителя. Для проведения антимикробной обработки какао-порошка выбран диапазон поглощенных доз 1,5-3 кГр. Контроль дозы проводился в начале и в конце каждой смены для двух положений радиационно-чувствительной пленки СО ПД(Э)-1/10 – на поверхности и под слоем какао-порошка.

После антимикробной обработки проводился бактериологический анализ трех проб какао-порошка, одного не облученного образца и двух проб после облучения при поглощенной дозе 1,8 кГр, и 2,5 кГр. Обработка результатов проводилась в испытательном лабораторном центре ФБУЗ «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В ГОРОДЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ И ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ». По итогам одного из замеров (14.03.2024г.) получено:

1. Снижение количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов КМАФАнМ (КОЕ/г) от 130 перед облучением до 4 (при 1,8 кГр) и < 1 (при 2,5 кГр).
2. Снижение заражения плесенью (КОЕ/г) с 82 до 3,5 (при 1,8 кГр) и < 2,7 (при 2,5 кГр).

Данный способ антимикробной обработки какао-порошка является конкурентно способным в сравнении с использованием линейных ускорителей для отдельных сыпучих материалов. Описываемая установка прошла испытания и эксплуатируется на кондитерской фабрике ООО «ВЛАД» г. Волхов, Ленинградской области, входящей в группу компаний Невский кондитер являющихся одним из крупнейших производителей кондитерских изделий в России.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. В. Ростов, В. В. Бармин, В. Ф. Ландль, П. В. Выходцев, К. П. Артёмов, А. С. Степченко, “Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов «СИНУС-320»: формирование и диагностика широкоапертурного пучка” // Известия высших учебных заведений. Физика, Т. 62, No 7, с. 147–152, 2019, DOI: 10.17223/00213411/62/7/147

\* Работа выполнена при поддержке ООО «НПП «Корад».

## СИЛЬНОТОЧНЫЕ НАНОСЕКУНДНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ: ЗАДЕЛЫ И ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРОДВИЖЕНИЯ В РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ\*

*В.В. РОСТОВ, К.В. АФАНАСЬЕВ, В.Ф. ЛАНДЛЬ, А.С. СТЕПЧЕНКО*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

Сильноточные наносекундные ускорители семейства «СИНУС» способны работать в импульсно-периодическом режиме с частотой следования до сотен Гц, обеспечивая возможность вывода электронного пучка в атмосферу с энергией электронов в сотни кэВ [1]. Ресурсные испытания катода до  $10^8$  импульсов [2] показали одновременно надежность таких установок и целесообразность их продвижения в те радиационные технологии, где не требуется большой пробег электронов [3–5].



Рис.1. Фотография опытно-промышленного образца ускорителя СИНУС-220.

Показанный на Рис. 1 ускоритель электронов обеспечивает за анодной Al фольгой, 50 мкм средний ток 1 мА, на площади пучка 10см×25см, с максимальной энергией электронов в спектре до 500 кэВ. Такие параметры дают возможность радиационной обработки (1,5 – 3 кГр) какао-порошка толщиной до 5 мм на транспортной ленте с производительностью 400 кг/час (в стадии сертификации на Волховском заводе концентрата «Невский кондитер»).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. С. Ельчанинов, Ф. Я. Загулов, С. Д. Коровин, Г. А. Месяц, “Исследование стабильности высоковольтного разрядника с потоком газа между электродами” // Приборы и техника эксперимента, №4, с 162–164, 1976.
- [2] N. M. Vukov, V. P. Gubanov, A. V. Gunin, S. D. Korovin, O. P. Kutenkov, V. F. Landl, S. D. Polevin, V. V. Rostov, G. A. Mesyats and F. Ya. Zagulov, “Development of long-lifetime cold cathodes,” Proc. 10th IEEE Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, P. 71–74, 1995.
- [3] Н. В. Васильев, А. К. Горн, Г. Г. Качушкина, Н. И. Комяк, Г. А. Месяц, Е. С. Сахаров, В. Г. Шпак “Использование сильноточных наносекундных электронных пучков для целевой поверхностной стерилизации” // Доклады Академии Наук СССР, Т. 253, № 5, с. 1120–1122, 1980.
- [4] А. С. Ельчанинов., Ф. Я. Загулов, С. Д. Коровин, В. Ф. Ландль, В. В. Лопатин, Г. А. Месяц, «Ускорители сильноточных электронных пучков с высокой частотой следования импульсов» в кн. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии, Новосибирск: «НАУКА», с. 5–21, 1983.
- [5] В. В. Ростов, В. В. Бармин, В. Ф. Ландль, П. В. Выходцев, к. П. Артёмов, А. С. Степченко, “Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов «СИНУС-320»: формирование и диагностика широкоапертурного пучка” // Известия высших учебных заведений. Физика, Т. 62, № 7, с. 147–152, 2019, DOI: 10.17223/00213411/62/7/147

\* Работа выполнена при поддержке ООО «Корад», а в части исследований катодов в рамках субсидии Министерства науки и высшего образования РФ (FWRM-2021-0002).

**ФОРВАКУУМНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ОСНОВЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА С КАТОДНЫМИ ПЯТНАМИ И НА ОСНОВЕ КОНТРАГИРОВАННОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА\****А.В. КАЗАКОВ<sup>1</sup>, Е.М. ОКС<sup>1</sup>, Н.А. ПАНЧЕНКО<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия*

Проведены исследования генерации импульсных электронных пучков форвакуумными плазменными источниками на основе дугового разряда с катодными пятнами и на основе контрагированного дугового разряда в диапазоне давлений 3–30 Па. Данные источники обеспечивают генерацию импульсных электронных пучков с длительностью импульса 50 мкс – 10 мс сочетанием постоянного ускоряющего напряжения и импульсно-периодического формирования эмиссионной плазмы, а граница эмиссионной плазмы стабилизируется сеточным эмиссионным электродом. Давление и род газа ( $N_2$ ,  $O_2$ , Ar, He) оказывают существенное влияние на эмиссионные характеристики импульсных форвакуумных источников электронов, а также на предельные (максимальные) параметры электронного пучка. При давлении  $p$  газа менее некоторого порогового  $p_{th}$ , величина которого определяется родом использованного газа (например, для азота  $p_{th} = 7$  Па), увеличение тока  $I_d$  разряда (5–80 А) приводит к росту эффективности  $\eta$  эмиссии электронов. Эффективность  $\eta$  в условиях экспериментов оценивалась как отношение полного тока  $I_e$  в ускоряющем промежутке (величина которого близка к полному току эмиссии) к току  $I_d$  разряда, формирующего эмиссионную плазму, т.е.  $\eta = I_e/I_d$ . При давлениях более порогового ( $p > p_{th}$ ) характер зависимости меняется, и эффективность  $\eta$  эмиссии уменьшается по мере увеличения тока  $I_d$  разряда. Наибольшее пороговое давление  $p_{th}$  наблюдается для гелия, а наименьшее - для аргона. В целом эффективность  $\eta$  увеличивается с ростом давления газа, при этом использование газа с большим сечением ионизации (например, Ar) обеспечивает больший ток эмиссии и, соответственно, больший ток  $I_b$  электронного пучка при прочих одинаковых условиях. Однако увеличение давления приводит к уменьшению максимальных параметров пучка. Кроме того, с ростом давления газа скорость нарастания тока на фронте импульсов токов  $I_e$  эмиссии и  $I_b$  пучка увеличивается. При этом более существенное влияние давление оказывает на фронт импульса токов  $I_e$  и  $I_b$  при использовании для генерации эмиссионной плазмы контрагированного дугового разряда. При давлениях  $p > p_{th}$  для газов  $N_2$ ,  $O_2$  и He может наблюдаться монотонное увеличение тока эмиссии при увеличении ускоряющего напряжения  $U_a$ , однако для Ar может наблюдаться немонотонная зависимость тока эмиссии от  $U_a$ . Рост тока эмиссии при увеличении давления наблюдался и при меньших давлениях газа (до 0,1 Па) [1].

Наблюдаемое влияние давления и рода газа обусловлено ионизационными процессами в ускоряющем промежутке источника и области транспортировки пучка, а именно с формированием пучковой плазмы, которая образуется вследствие ударной ионизации газа ускоренными пучковыми электронами. Поток ионов из пучковой плазмы ускоряется напряжением  $U_a$ , и ускоренные ионы, попадая в разрядный промежуток через ячейки сеточного эмиссионного электрода, повышают положительный потенциал плазмы, что приводит к увеличению эмиссии электронов. Кроме того, бомбардировка эмиссионного электрода ускоренными ионами приводит к ионно-электронной эмиссии, что также увеличивает ток эмиссии электронов. Влияние давления  $p$  и рода газ обусловлено изменением плотности пучковой плазмы [1], а влияние ускоряющего напряжения  $U_a$  обусловлено зависимостью сечения ионизации газа от энергии электронов [3] и зависимостью коэффициента ионно-электронной эмиссии от энергии ионов [4].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. V. Kazakov, E. M. Oks, and N. A. Panchenko, "On the ion flux from beam plasma to a metal target irradiated by a pulsed electron beam in the forevacuum pressure range," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 51, No. 8, p. 2245–2251, Aug. 2023, doi: 10.1109/TPS.2023.3304058.
- [2] N. N. Koval, S. V. Grigoryev, V. N. Devyatkov, A. D. Teresov, P. M. Schanin, "Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 37, p. 1890–1896, Jun. 2009, doi: 10.1109/TPS.2009.2023412.
- [3] W. Hwang, Y. K. Kim, and M. E. Rudd, "New model for electron-impact ionization cross sections of molecules," *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 104, p. 2956–2966, Feb. 1996, doi: 10.1063/1.471116.
- [4] M. Kaminsky, *Atomic and Ionic Impact Phenomena on Metal Surfaces*. New York, USA: Academic, 1965.

\*Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FEWM-2023-0012.

## ВЛИЯНИЕ ВЕДУЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРАНСПОРТИРОВКУ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ИСТОЧНИКЕ «СОЛО»\*

*А.Д. ТЕРЕСОВ<sup>1</sup>, Т.В. КОВАЛЬ<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

В источнике электронов «СОЛО» с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления ( $\sim 10^{-2}$  Па) с сеточной стабилизацией границы катодной (эмиссионной плазмы) и открытой границей анодной (пучковой плазмы) процессы формирования и транспортировки субмиллисекундного (20 – 200 мкс) электронного пучка (с током до 300 А, энергией электронов до 25 кэВ) определяют эффективность воздействия его на мишень с целью поверхностной модификации металлических и металлокерамических материалов и изделий [1, 2].

В работе экспериментально и с применением численного моделирования исследуется влияние ведущего неоднородного магнитного поля ( $B_{\max} = 300$  Гс) на транспортировку импульсного электронного пучка до коллектора.

Численное исследование транспортировки электронного пучка к мишени рассмотрено методами огибающей и крупных частиц. При параметрах эксперимента движение электронов в неоднородном магнитном поле складывается из вращательного движения на циклотронной частоте с малым радиусом вращения вокруг ведущего центра и медленного вращения с частотой колебаний электронов в собственном магнитном поле вокруг оси пучка с радиусом, сравнимым с начальным радиусом инжекции. На рис. 1а показана огибающая пучка: ток пучка 100 А;  $B_{\max} = 300$  Гс, энергия электронов  $\varepsilon = 20$  кэВ, угловой разброс начальной скорости эмиссионных электронов 5 %. Показано, что с помощью неоднородного магнитного поля можно управлять сечением и распределением плотности энергии пучка на мишени. Численное исследование формирования пучковой плазмы на фронте тока и транспортировка пучка в трубе дрейфа электронного пучка (рис. 1б) проведено в самосогласованной модели (PIC кода KARAT) [3].

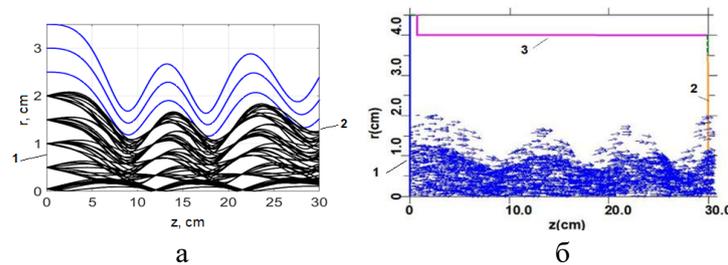


Рис.1. Траектории электронов, эмитируемых с разных начальных радиусов (а), конфигурационный портрет электронного пучка (б) 1 – эмиттер, 2 – коллектор, 3 – труба дрейфа.

С целью определения влияния режимов генерации электронного пучка на его транспортировку и оптимизации этих процессов были проведены calorиметрические измерения с использованием секционированного коллектора, закрывающего всю боковую поверхность трубы дрейфа. Показано, что в сильных магнитных полях (300 Гс) потери энергии электронного пучка на трубу дрейфа распределяются таким образом, что максимальные их значения приходятся на минимальные значения внешнего аксиального магнитного поля. Потери в слабом магнитном поле (36 Гс) и низком давлении ( $1,4 \cdot 10^{-2}$  Па) имеют выраженный максимум, находящийся на расстоянии около 17 см от эмиссионного электрода.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.Б. Марков, А.В. Миков, Г.Е. Озур, А.Г. Падей, “Установка РИТМ-СП для формирования поверхностных сплавов”, Приборы и техника эксперимента, № 6, с. 122-126, 2011.
- [2] V.N. Devyatkov, Yu.F. Ivanov, O.V. Krygina, N.N. Koval, E.A. Petrikova, V.V. Shugurov, “Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering”, Vacuum, V. 143, pp. 464-472, 2017, doi: 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.
- [3] V.P. Tarakanov, User’s Manual for Code KARAT. VA: Berkley Research Associates, 1992.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СИСТЕМЕ ПОЛОГО КАТОДА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА \*

*А.О. ЕГОРОВ, В.В. ДЕНИСОВ, В.В. ЯКОВЛЕВ, Е.В. ОСТРОВЕРХОВ, А.Д. ТЕРЕСОВ, В.С. АРТАМОНОВ, Л.В. НАЙЛОВЕЦ*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Российская Федерация*

Данная работа выполняется в продолжении исследований [1]. В рамках создания системы плазменного эмиттера импульсного электронного пучка с длительностью до 1 мс и частотой до 1 Гц были исследованы зависимости параметров несамостоятельного тлеющего разряда в квазистационарных режимах горения в полном цилиндрическом катоде с площадью поверхности около 0,3 м<sup>2</sup> и с площадью сетчатого анода 20 см<sup>2</sup> (5 см в диаметре). В результате эксперимента были получены стабильное импульсное горение тлеющего разряда с током до 300 А при напряжении до 150 В, а также получены основные характеристики двухразрядной системы.

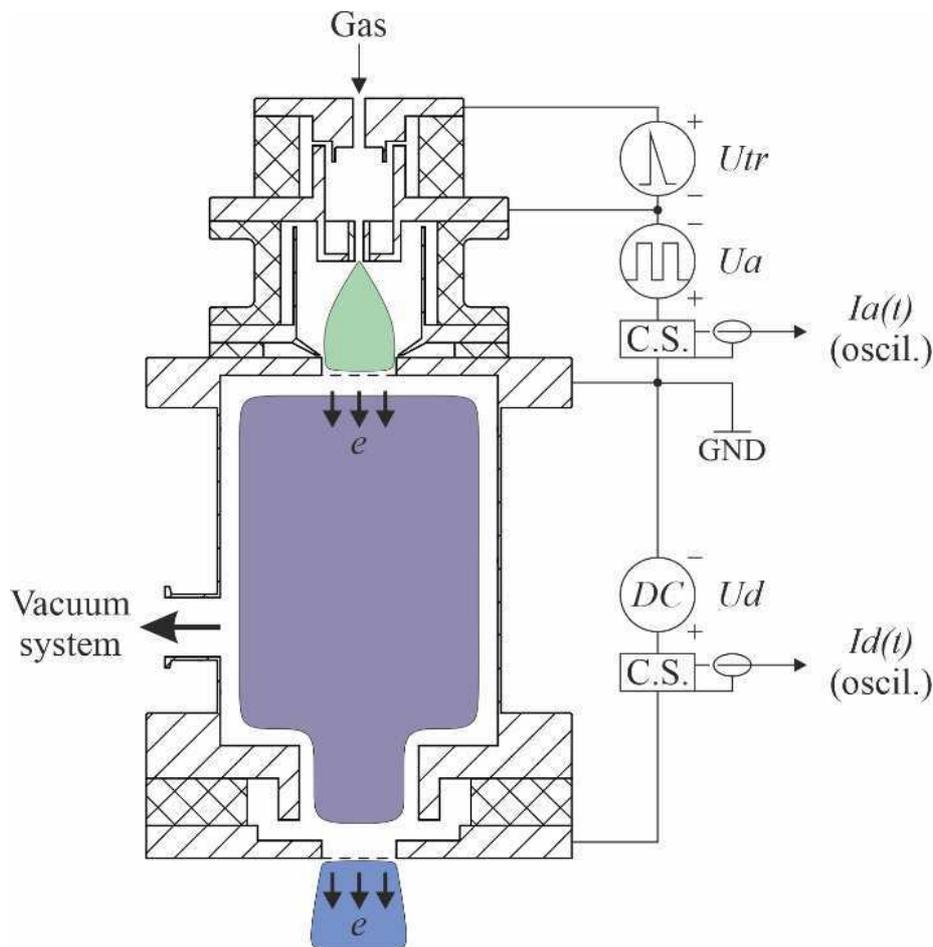


Рис. 1. Схема проведения экспериментов.

На рис. 1 представлена схема эксперимента. Рабочее давление в области откачной системы варьировалось в диапазоне от 0,05 до 0,5 Па.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.В. Яковлев, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, С.С. Ковальский, Е.В. Островерхов, А.О. Егоров, М.В. Генерация плазмы с повышенной степенью ионизации в импульсном сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полным катодом. ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА. Основатели: Национальное исследование Государственного университета Томска ISSN: 0021-3411. DOI: 10.17223/00213411/63/10/109.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер проекта FWRM-2022-0001).

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СИНТЕЗ ТЕРМОБАРЬЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОРВАКУУМНОГО ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ\*

*А.А. АНДРОНОВ, А.В. ТЮНЬКОВ, Ю.Г. ЮШКОВ*

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

Термобарьерные покрытия играют важную роль в повышении рабочей температуры и эффективности газотурбинных двигателей благодаря своим характеристикам. Покрытия на основе стабилизированного оксидом иттрия оксида циркония (YSZ) являются предпочтительными из-за их низкой теплопроводности, столбчатой структуры и повышенной стойкости к окислению и коррозии [1]. Благодаря этому, такие покрытия обеспечивают снижение термического воздействия на подложку при термоциклировании, что делает их особенно привлекательными для использования в условиях высоких температур.

В работе представлен оригинальный метод синтеза термобарьерных покрытий, особенность которого заключается в использовании уникального форвакуумного плазменного источника электронов, генерирующего электронный пучок в ранее не доступной области давлений (1-100 Па). Процесс формирования покрытия происходил в результате осаждения паров мишени на основе циркониевой керамики частично стабилизированной оксидом иттрия ( $ZrO_2-Y_2O_3$ ) [2]. Этот метод позволяет получать покрытия со свойствами и характеристиками, не уступающими при использовании широко известных методов EB-PVD и APS [3].

Экспериментальные исследования показывают, что на морфологию покрытия могут влиять технологические параметры, которые изменяют угол падения и подвижность конденсированных частиц на границе раздела покрытие/подложка. Один из таких параметров является скорость вращения подложки при осаждении из паро-плазменной фазы, образованной при испарении материала мишени и ионизации паров пучком форвакуумного плазменного источника электронов, на поверхность образцов. В работе представлены экспериментальные результаты влияния различных скоростей и режимов вращения подложки на равномерность нанесения покрытия и определение оптимальной скорости вращения, при которой покрытие получается наиболее равномерным и оптимальным по толщине. Представлены результаты растровой электронной микроскопии полученных покрытий, определена равномерность распределения покрытия по площади подложки при переменном вращении.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Thermal barrier coatings for thermal insulation and corrosion resistance in industrial gas turbine engines. Vogan, J.W., Hsu, L., Stetson, A.R. Surf Coat Technol, 30 (1984), p. 1
- [2] Electron-beam synthesis of ceramic- and boron-based coatings. A.V. Tyunkov, A.A. Andronov, Yu.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin. Physica Scripta, Volume 98, Number 6 DOI: 10.1088/1402-4896/acd08d.
- [3] Электронно-лучевое осаждение покрытий из циркониевой керамики форвакуумным плазменным источником электронов. А.А. Андронов, Д.Б. Золотухин, А.Ю. Назаров, Е.М. Окс, К.Н. Рамазанов, А.В. Тюньков, Ю.Г. Юшков. Прикладная физика, – 2023. – Т. 19, № 5. – С. 91-96. DOI:10.51368/1996-0948-2023-5-91-96.

\* Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса в 2023 году «FEWM-2023-0012»

## СОВМЕСТНЫЙ СТЕРИЛИЗАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ИЯФ СО РАН – НГУ, СОЗДАННЫЙ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ИЛУ-10 И РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ

*В.О. ТКАЧЕНКО<sup>1</sup>, А.А. БРЯЗГИН<sup>1</sup>, В.В. БЕЗУГЛОВ<sup>1</sup>, Л.А. ВОРОНИН<sup>1</sup>, М.В. КОРОБЕЙНИКОВ<sup>1</sup>, Е.А. ШТАРКЛЕВ<sup>1</sup>,  
В.М. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, Л.В. АНТОНОВА<sup>2</sup>, А.САМОХИН<sup>3</sup>, М.Е.ТКАЧЕНКО<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний, Кемерово, Россия*

<sup>3</sup>*Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, Россия*

<sup>4</sup>*Новосибирский Государственный Университет, Россия*

В докладе представлена работа стерилизационного комплекс ИЯФ СО РАН-НГУ созданного на территории ИЯФ СО РАН. Приводятся технические решения и параметры облучаемой продукции и дозные распределения. Так же представлены работы по отработке технологии стерилизации медицинских изделий.

Затронуты вопросы обработки пищевых продуктов ионизирующим излучением. Представлены совместные с медиками новые разработки в области имплантологии [1] и разработки нового биорезорбируемого гелевого носителя на основе хитозана [2].

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Л.В. Антонова, Е.О. Кривкина, М.А. Резвова, В.В. Севостьянова, В.О. Ткаченко, Т.В. Глушкова, Т.Н. Акентьева, Ю.А. Кудрявцева, Л.С. Барбараш. Разработка технологии формирования атромбогенного лекарственного покрытия для биодеградируемых сосудистых протезов малого диаметра. Разработка технологии формирования атромбогенного лекарственного покрытия для биодеградируемых сосудистых протезов малого диаметра. 2020, том 12, номер 6, стр. 6. DOI: <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.6.01>.
- [2] Alexander Samokhin, Anastasia Korel, Elena Blinova, Alexander Pestov, Galina Kalmykova, Nadezhda Akulova, Viktoria Betz, Vadim Tkachenko and Ekaterina Litvinova, Delivery of *B. subtilis* into Animal Intestine Using Chitosan-Derived Bioresorbable Gel Carrier: Preliminary Results Gels 2023, 9, 120. <https://doi.org/10.3390/gels902012011>.

**РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО НЕГАЗЯЩЕГО ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВАКУУМНЫХ ОБЪЕМАХ УСКОРИТЕЛЕЙ\****А.В. ВАРАНД<sup>2</sup>, Б.П. ТОЛОЧКО<sup>1,2</sup>, М.А. МИХАЙЛЕНКО<sup>1,2</sup>, А.А. БРЯЗГИН<sup>2</sup>*<sup>1</sup>*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*<sup>2</sup>*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

Облучение электронным лучом может инициировать полимеризацию метилметакрилата.

Полимеризацию метилметакрилата инициировали электронным пучком, генерируемым мощным импульсным радиочастотным (РЧ) ускорителем ИЛУ-6. Результаты исследований показали нестабильность процесса полимеризации – некоторые образцы в одной партии могут иметь нулевое содержание полимера даже при дозе 100 кГр. Возможной причиной нестабильности реакции также может быть влияние магнитных полей, генерируемых электронным пучком.

Процесс полимеризации проводился при различных мощностях дозы и с магнитным экранированием образцов или без него. Нагрев образцов электронным лучом и магнитное экранирование обеспечивают стабильное протекание реакции.

Рабочая частота ускорителя 118 МГц. Импульсы пучка имеют длительность 0,5 мс и имеют тонкую структуру коротких пиков длительностью около  $10^{-9}$  с – это особенность всех ВЧ-ускорителей. Эта тонкая деталь особенно выражена возле окна вывода луча. Рассеяние луча в веществе постепенно сглаживает эту тонкую наносекундную структуру. Характерное время этой структуры имеет тот же наносекундный порядок, что и характерное время радикальных взаимодействий. Условия облучения были следующими: Импульсный ток луча – 200-320 мА, Частота повторения импульсов – 5 Гц, Толщина слоя метилметакрилата – 4 мм, Диапазон изученных доз составлял от 10 до 100 кГр.

После многочисленных экспериментов был получен сверхвысокомолекулярный полиметилметакрилат (СВМ-ПММА) с молекулярной массой  $15 \cdot 10^6$ . Это мировой рекорд для полимеров группы метакрилатов. Например, молекулярная масса полиметакрилата, произведенного фирмой Evonic (Германия) на превышает  $10^4$  Да. Процесс полимеризации был реализован без дополнительных химических реагентов и позволил получить сверхчистый, негазющий в вакууме (получен вакуум  $10^{-7}$  торр) полиметилметакрилат с высокими механическими свойствами. Определены механические свойства: предел прочности 120 МПа и предел текучести 50 МПа, что превышает аналогичный показатель ПММА, изготовленного по обычной технологии. Выпускаемый ПММА является перспективным материалом прецизионных деталей механики и высокопрозрачных оптических элементов.

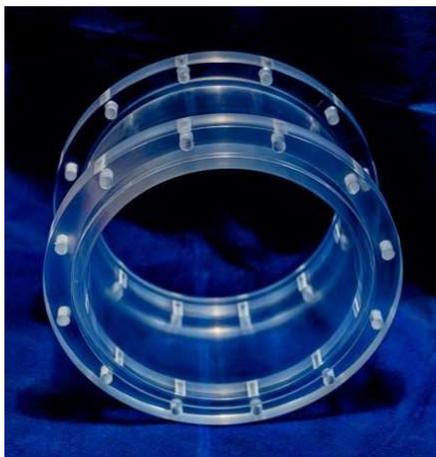


Рис.1. Экспериментальный образец изолятора для ускорителя ИЛУ-6. Внешний диаметр 420 мм. Полученный вакуум  $10^{-6}$  торр.



Рис.2. Форма полимеризации экспериментального образца вакуумного транспортного канала для новых ускорителей, разрабатываемых в ИЯФ СО РАН

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-72-00060.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЗОРБЦИИ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛИЛАКТИДА И ЕГО КОМПАКТОВ\***

*М.А. МИХАЙЛЕНКО<sup>1</sup>, М.Р. ШАРАФУТДИНОВ<sup>1,3</sup>, К.Э. КУПЕР<sup>2,3</sup>, Б.П. ТОЛОЧКО<sup>1,2</sup>, А.С. УЛИХИН<sup>1</sup>,  
В.К. ПОПОВ<sup>4</sup>, М.В. КОРОБЕЙНИКОВ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>ЦКП "Сибирский кольцевой источник фотонов" Института катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

Поли (молочная кислота) (PLA) представляет собой биоразлагаемый полимер заменитель пластиков на нефтяной основе с широким спектром применения [1]. Основная особенность PLA - это его внутренняя медленная скорость кристаллизации, которая обычно обуславливает аморфную структуру при получении изделий [2]. Ранее малоугловое рентгеновское рассеяние применялось для исследования структурных характеристик пористых матриц на основе полилактида [3], которые являются перспективными биорезорбируемыми материалами. Также на основе полилактида можно получать прочные и жесткие, но также биорезорбируемые материалы для эндопротезирования с большим, чем у пористых матриц временем распада. Одним из способов получения подобного рода изделий является компактирование полилактида. Воздействия импульсов высоких давлений приводит к аморфизации полилактида и получению компактов с высокой плотностью [4].

Для практического применения получаемых материалов необходима разработка способов их стерилизации. Термические и химические способы стерилизации в случае полимеров имеют малую применимость ввиду очевидных изменений формы и свойств изделий [5].

Целью работы было исследование изменения внутренней структуры компактов ПЛА при резорбции, а также термических превращений компактированного ПЛА с использованием синхротронного излучения и исследование влияния ионизирующего излучения на термические превращения на кристаллического и аморфного ПЛА.

Методом рентгеновской томографии с использованием синхротронного излучения показано появление крупных (до 200 мкм) пор в объеме образца и формированию ажурной структуры вблизи поверхности без заметного изменения геометрических размеров образцов. после выдержки компактов в физиологическом растворе. Сравнительное *in situ* исследование термических превращений компакта и аморфного ПЛА, полученного плавлением, показало, что в образцах компактов не происходит значительной кристаллизации при нагревании свыше 100°C в отличие от аморфного ПЛА. Возможными причинами может являться наличие напряжений в образцах компактов. Электронно-лучевая обработка образцов аморфного ПЛА приводит к уменьшению теплового эффекта стеклования. *In situ* исследование нагревания показало, что радиационная обработка аморфного ПЛА способствует затруднению его кристаллизации и может рассматриваться в дальнейшем не только как способ стерилизации, но и как способ дополнительного регулирования резорбции.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Ratner B.D., Hoffman A.S., Schoen F.J., Lemons J.E. Eds.; Biomaterials science. An introduction to materials in medicine. 3rd ed.; Academic Press: Boston, MA, USA, 2012. DOI: 10.1016/C2009-0-02433-7
- [2] Lim, L.T., Auras, R. and Rubino, M. Processing Technology for Poly(lactic acid) // Progress in Polymer Science. 2008. 33, 820-852. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004
- [3] Buzmakov A.V., Dunaev A.G., Krivosov Y.S. et al.//Polymers. 2021. 13(7). Article number 1021; <https://doi.org/10.3390/polym13071021>
- [4] Дунаев А.Г., Мариянац А.О., Сячина М.А., Трифанова Е.М., Попов В.К. Физико-химические методы повышения гидрофильности поверхности алифатических полиэфилов для тканеинженерных конструкций // Физика и химия обработки материалов. 2019. № 6, 72-78. DOI: 10.30791/0015-3214-2019-6-72-78
- [5] Chernonosova V.S., Kuzmin I.E., Shundrina I.K. et al. . Effect of Sterilization Methods on Electrospun Scaffolds Produced from Blend of Polyurethane with Gelatin // Journal of Functional Biomaterials. 2023. 14(2). Article number 70. DOI: 10.3390/jfb14020070

\* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

## **ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ВЫВЕДЕННОГО В АТМОСФЕРУ СУБМИКРОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ШИРОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ\***

***М.А.СЕРЕБРЕННИКОВ, И.С.ЕГОРОВ, Г.Е.РЕМНЕВ***

*Научно-производственная лаборатория импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия  
e-mail: mas48@tpu.ru*

В работе представлены результаты исследования закономерностей распространения импульсного пучка электронов с широким энергетическим спектром в объёме реакционной камеры заполненной воздухом при нормальном атмосферном давлении. Исследования выполнены на субмикросекундном импульсном электронном ускорителе Астра-М (до 450 кВ ускоряющее напряжение, до 0,5 кА ток пучка, 150 нс длительность импульса пучка на полувысоте) [1]. Диагностика параметров пучка при его транспортировке в реакционной камере проводилась на штатном диагностическом оборудовании ускорителя (пояса Роговского, дозиметрические пленки, калориметр, цилиндр Фарадея) и на оригинальном разработанном устройстве измерения характеристик пучка в сечении [2,3]. Анализ результатов работы позволил выявить ключевые закономерности и факторы, определяющие распространение импульсного пучка электронов с широким энергетическим спектром в воздушной среде, что может быть использовано при обработке газовых объемов и в системах воздухоподготовки.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] I. Egorov, V. Esipov, G. Remnev, M. Kaikanov, E. Lukonin, A. Poloskov. "A high-repetition rate pulsed electron accelerator", 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, San Diego, June 3-7, 2012, [S.1]: IEEE, pp. 716-719, 2012, doi: 10.1109/IPMHVC.2012.6518845
- [2] I. Egorov, M. Serebrennikov, Y. Isakova, A. Poloskov. "Sectioned calorimeter for quick diagnostic of the electron beam energy distribution", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 875, pp. 132-136, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.09.002>
- [3] Serebrennikov, E. Adamov, A. Poloskov, X. Yu, I. Egorov. "A calorimetric system for charge and kinetic energy characterizations of pulsed electron beams", Radiation Measurements, Vol. 143, Article number 106569, pp. 1-6, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2021.106569>

\* Работа выполнена при поддержке Госзадания «Наука» №2.0001.ГЗБ.2023

## ПРОЦЕССЫ РАДИАЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ТИПА ИЛУ

*М.В. КОРОБЕЙНИКОВ<sup>1</sup>, В.В. БЕЗУГЛОВ<sup>1</sup>, А.А. БРЯЗГИН<sup>1</sup>, Л.А. ВОРОНИН<sup>1</sup>, М.А. МИХАЙЛЕНКО<sup>1,2</sup>,  
А.В. СИДОРОВ<sup>1</sup>, В.О. ТКАЧЕНКО<sup>1</sup>, Е.А. ШТАРКЛЕВ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

Мощные импульсные линейные ускорители электронов типа ИЛУ используются для проведения исследовательских работ и модификации различных материалов и изделий в промышленности. ИЯФ СО РАН разрабатывает и изготавливает ускорители типа ИЛУ с середины 70-х годов XX века. Эти ускорители работают на промышленных предприятиях России и других стран.

В ИЯФе постоянно ведутся работы по исследованию воздействию интенсивных электронных пучков на различные вещества, материалы и изделия. Первый отработанный на ускорителе ИЛУ и впоследствии внедрённый в промышленность процесс – радиационная сшивка полиэтиленовой изоляции проводов. Этот процесс увеличивает электрическую прочность изоляции и повышает максимальную рабочую температуру. Впоследствии была отработана радиационная сшивка и других полимеров (кроме полиэтилена) для получения термоусаживаемых трубок, плёнок, кабельных перчаток и других электротехнических изделий. Эти процессы широко используются в промышленности. В частности, высоковольтные провода систем зажигания двигателей внутреннего сгорания выпускаются с радиационно-модифицированной изоляцией.

На ускорителе ИЛУ-6 в ИЯФе постоянно проводится радиационная обработка различных образцов. Основные направления работы: стерилизация и деконтаминация медицинской продукции, обработка пищевой и сельскохозяйственной продукции, исследование радиационной стойкости материалов, облучение биологических объектов, модификация органических соединений, в том числе энергонасыщенных, радиационная инициация полимеризации, радиационно-термическое воздействие на органические и неорганические соединения. На этой установке были отработаны процессы стерилизации имплантатов позвоночных дисков и радиационной модификации матриц для имплантатов кровеносных сосудов.

Диапазон рабочей энергии ускорителя ИЛУ-6 – от 1,8 до 2,5 МэВ, мощность электронного пучка до 20 кВт, в ряде экспериментов обработка производилась тормозным излучением генерируемым конвертором. Диапазон рабочей дозы в экспериментах варьировался от 7 Гр при облучении мышей до 500 МГр при исследовании радиационной стойкости композитных материалов. При проведении радиационно-термических экспериментов максимальная температура в реакционной зоне достигла 1400°C.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.В. Безуглов, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин, Е.В. Дрогунов, М.В. Коробейников, С.А. Максимов, А.В. Пак, В.М. Радченко, А.В. Сидоров, В.О. Ткаченко, Е.А. Штарклев. Промышленные ускорители ИЛУ для радиационной обработки продукции электронным пучком и тормозным излучением, Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве: сборник докладов I международной молодежной конференции, Обнинск, 18-21 октября 2022 г. - Обнинск : ВНИИРАЭ, 2022. - С. 111-115.
- [2] И.М. Антонов, М.А. Михайленко, Т.П. Шахтшнейдер, С.А. Мызь, М.В. Зеликман, И.В. Ельцов, С.А. Кузнецова, А.А. Брызгин, «Порошковый сополимер хитозана с акриламидом: электронно-лучевой синтез, структура и свойства», Химические технологии функциональных материалов: материалы IX Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции, Новосибирск, 25-27 мая 2023 г. - Новосибирск : НГТУ, 2023. - С. 210-211.
- [3] V.A. Sadykov, E.M. Sadovskaya, Yu.N. Bepalko, N.F. Ereemeev, M.A. Mikhailenko, A.A. Bryazgin, M.V. Korobeynikov, «Radiation Thermal Sintering of Oxide and Composite Materials for Hydrogen Energy», ASAM-8: The 8th Asian Symposium on Advanced Materials, Novosibirsk, 3-7 July 2023 : book of abstracts. - Novosibirsk : Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, 2023. - P. 403-404. EDN OJKPQY.

## **ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ПОЛОМ КАТОДЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА\***

*В.В. ДЕНИСОВ, Т.В. КОВАЛЬ, Н.Н. КОВАЛЬ, Е.В. ОСТРОВЕРХОВ, С.С. КОВАЛЬСКИЙ, В.В. ЯКОВЛЕВ*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

Пучково-плазменные образования (ППО), генерируемые в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда при низком ( $\approx 1$  Па) давлении, характеризуются сравнительно небольшой, до нескольких десятков процентов, неоднородностью распределения плотности заряженных частиц в больших ( $>0,1$  м<sup>3</sup>) вакуумных объемах [1].

Свойства ППО, генерируемого в полом катоде тлеющего разряда, определяются параметрами пучка электронов, инжектируемого из плазмы вспомогательного дугового разряда.

В работе представлено сравнение результатов экспериментальных исследований процессов генерации ППО в полом катоде большого объема ( $\approx 0,3$  м<sup>3</sup>) и результатов моделирования в дрейфово-диффузионном приближении - модифицированной модели тлеющего разряда и модели полого катода. Компьютерное моделирование процессов генерации БПФ проводилось в рамках дрейфово-диффузионного представления с использованием программного пакета Comsol Multiphysics.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.V. Denisov, Yu. N. Akhmadeev, N.N. Koval, S.S. Kovalsky, I.V. Lopatin, E.V. Ostroverkhov, N.N. Pedin, V.V. Yakovlev, P.M. Schanin, "The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode", Phys. Plasmas, V. 26, P. 123510, 2019, doi: 10.1063/1.5126485.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWRM-2022-0001).

## ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЙ И ДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ БОРА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКЕ В ВАКУУМЕ\*

*У.Л. МИШИГДОРЖИЙН, Б.А. ДЫШЕНОВ, К.А. ДЕМИН, Н.С. УЛАХАНОВ, А.П. СЕМЕНОВ*

*Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*

Исключительная стойкость диффузионных слоев и покрытий на основе бора абразивному, коррозионному и эрозионному износу является причиной их широкого применения в качестве защитных покрытий на деталях высокотехнологичных изделий энергетического и уникального машиностроения, а также при производстве ответственного технологического оборудования [1,2]. Несмотря на очевидные преимущества, упомянутые покрытия и слои обладают рядом серьезных недостатков, таких как высокая хрупкость, недостаточная толщина модифицированного слоя, недостаточное качество морфологии поверхности, что часто требует последующей механической обработки. Использование концентрированных источников энергии, таких как электронные пучки, для изменения свойств поверхности деталей машин и инструментов позволяет гибко регулировать структурно-фазовое состояние материалов в широком диапазоне [3,4]. Настоящее исследование направлено на создание функциональных слоев и покрытий на основе бора на поверхности легированных сталей путем последовательного применения технологий химико-термической (ХТО) и электронно-лучевой обработки (ЭЛО) в вакууме. Ожидается, что предлагаемый метод улучшит физические и механические свойства боридных слоев, в частности пластичность. Диффузионные боридные слои получали с помощью одно- и двухкомпонентной ХТО, такими методами как борирование, боромеднение, бороалитирование, борохромирование и бороникелирование [5]. Толщина слоя после ХТО составляет 150–250 мкм. Последующая ЭЛО приводит к быстрому переплавлению поверхности и полной трансформации микроструктуры приповерхностных зон слоя. Толщина слоя увеличивается в 2–3 раза за счет смешивания бора и металла (Cu, Al, Cr, Ni) со стальной основой, прилегающим к слою. Исходная игольчатая микроструктура боридного слоя полностью устраняется методом ЭЛО. Сверхбыстрое затвердевание жидкой фазы уменьшает размер зерен в верхней зоне слоя, что приводит к измельчению зерен и получению субмикронной структуры.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] С. Г. Цих, А. А. Красуля, А. С. Помельникова, А. А. Пермитина, А. Ф. Медников, О. С. Зилова, Г. С. Севальнёв, К. О. Базалева, “Исследование характеристик изнашивания в условиях сухого трения скольжения стали 08X18H10T после безэлектролизного борирования,” *Заготовительные производства в машиностроении*, Т. 20, №. 8, с. 369–375, 2022, doi: 10.36652/1684-1107-2022-20-8-369-375.
- [2] А. А. Красуля, А. А. Пермитина, А. С. Помельникова, С. Г. Цих, “Химико-термическая обработка стали 08X18H10T для повышения ее эксплуатационных характеристик,” *Заготовительные производства в машиностроении*, Т. 19, №. 9, с. 419–421, 2021, doi: 10.36652/1684-1107-2021-19-9-419-421.
- [3] A. S. Klimov, I. Y. Bakeev, A. V. Dolgova, A. V. Kazakov, N. S. Korablev, A. A. Zenin, “Features of Electron Beam Processing of Mn-Zn Ferrites in the Fore-Vacuum Pressure Range in Continuous and Pulse Modes,” *Coatings*, Vol. 13, p. 1766, 2023, doi: 10.3390/coatings13101766.
- [4] Я. Гэн, И. А. Панченко, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов, С. Чен, “Влияние электронно-пучковой обработки на структуру аддитивного сплава Al – Mg,” *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*, Т. 44, № 2, с. 13–19, 2023, doi: 10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19.
- [5] U. Mishigdorzhijn, Z. Samaev, V. Mosorov, N. Ulakhanov, “Fe-Me-B diffusion layers for surface modification of carbon steels,” *Defect and Diffusion Forum*, Vol. 403, p. 47–56, doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.403.47.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-10163-П).

## МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ \*

*Н.С. УЛАХАНОВ<sup>1</sup>, У.Л. МИШИГДОРЖИЙН<sup>1</sup>, А.П. СЕМЕНОВ<sup>1</sup>, М.С. ВОРОБЬЕВ<sup>2</sup>, Н.Н. КОВАЛЬ<sup>2</sup>, П.В. МОСКВИН<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*

<sup>2</sup> *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Рассматривается процесс модификации свойств диффузионных слоев на основе бора и алюминия на поверхности инструментальных штамповых сталей 3Х2В8Ф и 5ХНМ импульсной электронно-пучковой обработкой с использованием источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления. Электронно-пучковую обработку проводили в экспериментальной установке «СОЛО» [1,2], входящей в перечень уникальных электрофизических установок России в среде аргона при давлении в вакуумной камере 35 мПа в магнитном поле величиной до 100 мТл. Энергия электронов в процессе обработки достигала 25 кэВ, диаметр пучка электронов 3 см. Ток пучка изменялся течение импульса длительностью 950 мкс в пределах 20 – 120А для обеспечения и удержания температуры ~2000°С на поверхности образца через 150 мкс. Поверхность образцов подвергали двенадцати импульсам воздействия, интервал времени между которыми составлял 3 секунды.

В результате обработки диффузионных слоев, максимальная микротвердость на поверхности стали 5ХНМ повышается с 800 HV до 1400 HV, на стали 3Х2В8Ф наоборот снижается с 1900 HV до 1700 HV. Электронно-пучковая обработка диффузионных слоев приводит к формированию на поверхности стали 5ХНМ следующих фаз: Fe<sub>2</sub>B, FeAl, Fe<sub>2</sub>AlCr, CrSi<sub>2</sub> и на поверхности стали 3Х2В8Ф: Fe<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>Al, Fe<sub>2</sub>AlCr. Шероховатость поверхности образцов значительно снижается по сравнению с исходной (до семи раз).

Подход, реализуемый в работе, предполагает электронно-пучковое тепловое воздействие на поверхность с высокой плотностью энергии до 0,5 МВт/см<sup>2</sup>, вызывая быстрое плавление и рекристаллизацию. Длительность импульса электронного пучка составляет несколько сотен микросекунд, что позволяет распространить термический эффект на указанную глубину, не затрагивая основной объем диффузионного слоя, сформированного на этапе химико-термической обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н. Н. Коваль, В. Н. Девятков, М. С. Воробьев, “Источники электронов с сеточным плазменным эмиттером: прогресс и перспективы,” Известия высших учебных заведений. Физика, Т. 63, №. 12, с. 7–16, Oct. 2020, doi: 10.17223/00213411/63/10/7.
- [2] Vorobyov M., Koval T., Shin V., Moskvina P., Tran M.K.A., Koval N., Ashurova K., Doroshkevich S., Torba M. Controlling the Specimen surface temperature during irradiation with a submillisecond electron beam produced by a plasma-cathode electron source // IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, Т. 49, № 9, С. 2550-2553. DOI: 10.1109/TPS.2021.3089001

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-10163-П)

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ $\text{CrB}_2$ НА ПОВЕРХНОСТИ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ ХВГ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ВАКУУМЕ\*

*А.С. МИЛОНОВ<sup>1</sup>, У.Л. МИШИГДОРЖИЙН<sup>1</sup>, С.А. ЛЫСЫХ<sup>1</sup>, Ю.И. СЕМЕНОВ<sup>2</sup>, М.Ю. КОСАЧЕВ<sup>2</sup>,  
Д.Э. ДАШЕЕВ<sup>1</sup>, К.А. ДЕМИН<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ИФМ СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup>ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия

В данной работе было выполнено формирование защитных покрытий на основе  $\text{CrB}_2$  для повышения эксплуатационных свойств стали Х12МФ, полученных методом электронно-лучевого синтеза реакционной смеси  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-В-С}$  и наплавки продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) на поверхность стали. Эксперименты проводились в Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН г. Новосибирск на установке электронно – лучевой сварки (ЭЛС-В–60/500). Диаметр пучка 1,5 мм, ускоряющее напряжение 50 кВ, Давление в камере было  $4,6 \cdot 10^{-3}$  Па, ток накала 18,5 мА. Время обработки 12 секунд. Слои получились толщиной около 300 мкм. На рис. 1 видно, что структура слоя неоднородна, присутствуют серые включения, который содержат карбиды и бориды хрома.



Рис.1. Слой на основе  $\text{CrB}_2$  на стали Х12МФ.

Неоднородность слоев объясняется тем, что в процессе образования происходит оплавление поверхности стали. Частицы продуктов СВС в ходе кристаллизации стали находятся в мягкой металлической матрице, что способствует образованию слоя с существенно пониженной хрупкостью. Полученные результаты дают нам возможность рассматривать применение электронно-лучевого синтеза продуктов СВС и наплавки на поверхность инструментальных штамповых сталей.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-10163-П)..

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПОДОГРЕВА КАТОДА В СВАРОЧНЫХ ПУШКАХ

*О.Н. АЛЯКРИНСКИЙ, М.Ю. КОСАЧЕВ, П.В. ЛОГАЧЕВ, Ю.И. СЕМЕНОВ, А.А. СТАРОСТЕНКО, А.С. ЦЫГАНОВ*

*ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия*

В сварочных пушках используют катоды с термоэлектронной эмиссией. Такой катод должен быть разогрет до рабочей температуры, чтобы с его поверхности мог быть извлечен достаточный ток. Различают прямой и косвенный подогрев. При прямом накале нагрев катода осуществляется протеканием по нему электрического тока. Недостатками прямого накала являются магнитное поле тока накала, которое искажает пучок и изменение условий нагрева при испарении материала катода. При косвенном накале нагрев осуществляется потоком электронов или лазерным излучением, падающими на поверхность катода. До сих пор катод нагревался целиком, а эмиссионная область определялась геометрией катода. В своей работе мы рассматриваем возможность формирования эмиссионной области путем локального нагрева малого участка поверхности катода.

Демонстрация возможности формирования эмиссионного пятна проведена с помощью эмиссионной фотографии. На поверхность катода подавался сфокусированный лазерный луч, на катод подавалось ускоряющее напряжение 60 кВ и эмитируемый катодом ток фокусировался на поверхность люминофора. Изображение эмиссионного пятна регистрировалось с помощью видеокамеры. Видно, что даже на малых температурах, при которых определяющими являются процессы теплопроводности, формируется четко очерченное эмиссионное пятно.

При нагреве малого участка катода до температуры термоэмиссии, в нем возникают напряжения, превосходящие предел прочности. Исследование танталовых и вольфрамовых фольг показало, что в танталовых фольгах возникает существенная пластическая деформация, которая увеличивается при циклах нагрев/охлаждение. Вольфрамовые фольги демонстрируют малую пластическую деформацию за счет высокой твердости материала и срок их службы определяется испарением материала. Это позволяет использовать известные литературные данные [1] для определения срока службы катода в разных режимах.

На основе полученных данных подготовлен технический проект прототипа сварочной пушки. Показано, что возможно существенное упрощение конструкции пушки и катода, что ведет к снижению себестоимости и стоимости эксплуатации. С помощью электронно-оптических расчетов показана возможность формирования пучков в широком диапазоне характеристик. Также возможность управления размером эмиссионного пятна добавляет уникальную возможность регулировки эмиттанса электронного пучка, которая может быть использована в различных прецизионных процессах.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] The Rates of Evaporation and the Vapor Pressures of Tungsten, Molybdenum, Platinum, Nickel, Iron, Copper and Silver. Howard A. Jones, Irving Langmuir, and G. M. J. Mackay, Phys. Rev. 30, 201 – Published 1 August 1927

## ЛЕГИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ Ti И Al МОДУЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ИСТОЧНИКЕ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ\*

*Д.А. ШПАНОВ, П.В. МОСКВИН, Е.А. ПЕТРИКОВА, Ю.Ф. ИВАНОВ, М.С. ВОРОБЬЁВ*

*Институт сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), Томск, Россия*

Аустенитные стали, в том числе нержавеющая сталь 12X18H10T, широко распространены в промышленности, благодаря хорошим механическим свойствам в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Однако стали данного класса, как правило, имеют низкую износостойкость. Наиболее дешевым и технологичным способом повышения триботехнических свойств деталей узлов трения является упрочнение поверхности трения [1], например, путём сверхбыстрой закалки из расплава Ti и Al в поверхностном слое стали с образованием твердых интерметаллидов. Электронно-пучковое легирование лидирует над другими способами ввода энергии в поверхность образца по КПД до 90%, по малому отражению электронов, по контролю и однородности теплового потока [2] и неоднократно применялось для модификации механических свойств металлов и сплавов [3].

Задачи работы: облучить систему «пленка (Ti) / пленка (Al) / (12X18H10T) подложка» модулированным пучком электронов субмиллисекундной длительности в источнике с плазменным катодом; исследовать структурно-фазовое состояние модифицированной стали.

Пленки Ti и Al толщиной 5 мкм нанесены электродуговым плазменно-ассистированным способом [4]. При облучении в установке «СОЛО» [2] поверхностный слой прогревается импульсами тока пучка до 500 мкс с поддержанием температуры около 1000°C (при плотности энергии электронного пучка от 10 до 50 Дж/см<sup>2</sup>) – необходимые зависимости тока и мощности пучка от времени в течение импульса предсказаны на основании численного моделирования в Comsol Multiphysics [3].

Показано, что микротвёрдость поверхности образцов, облученных модулированным электронным пучком, превышает микротвёрдость исходного образца  $\approx$  на 20%, а скорость износа снижается  $\approx$  в 1300 раз и составляет  $5,3 \cdot 10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/(Н\*м) при постоянном коэффициенте трения, равном 0,73. По результатам исследований структурно-фазового состояния модифицированной стали, методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, повышение микротвёрдости и параметра износа системы «пленка (Ti и Al)/(12X18H10T) подложка» обусловлено формированием субмикронанокристаллической многофазной структуры столбчатого (ячеистого) типа, содержащей включения интерметаллидных фаз типа Al<sub>5</sub>NiFe, NiTi, Al<sub>6</sub>Fe, Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>, CrNiTiFe.

Объем ячеек кристаллизации слоя подложки, контактирующего с пленкой, обогащен атомами Fe, Cr и Ni. Ячейки разделены прослойками, обогащенными атомами Al и Ti. Обратная картина наблюдается при анализе распределения элементов в слое покрытия: объем ячеек кристаллизации обогащен атомами Ti и Al, прослойки, разделяющие ячейки, обогащены атомами Fe, Ni и Cr.

Данный метод повышения износостойкости стали 12X18H10T отличается низкими затратами легирующих элементов и электроэнергии, а также стоимостью, поскольку легирование можно использовать как постобработку готовых изделий. Из модифицированной стали можно изготавливать детали почвообрабатывающих машин для сельского хозяйства, пары трения для тяжело нагруженных узлов сухого трения, как альтернативу металлокерамическим фрикционным материалам.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Смолькова М. Ю. Исследование влияния низкотемпературного азотирования на коррозионную стойкость и триботехнические свойства стали 12X18H10T // Перспективные материалы. – 2013. – №. 10. – С. 63-69. [in Russian]
- [2] М.С. Воробьёв, П.В. Москвин, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова, С.Ю. Дорошкевич, В.Н. Девятков, М.С. Торба, В.А. Леванисов. Динамическое управление мощностью мегаваттного электронного пучка субмиллисекундной длительности в источнике с плазменным катодом. Письма в ЖТФ, 2021, том 47, вып. 10, с. 38-42 DOI: <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.10.50972.18719> [in Russian]
- [3] Vorobyov, M.S.; Petrikova, E.A.; Shin, V.I.; Moskvina, P.V.; Ivanov, Y.F.; Koval, N.N.; Koval, T.V.; Prokopenko, N.A.; Kartavtsov, R.A.; Shpanov, D.A. Steel Surface Doped with Nb via Modulated Electron-Beam Irradiation: Structure and Properties. *Coatings* 2023, 13, 1131. <https://doi.org/10.3390/coatings13061131>
- [4] Shugurov, V.V.; Koval, N.N.; Krysinina, O.V.; Prokopenko, N.A. QUINTA equipment for ion-plasma modification of materials and products surface and vacuum arc plasma-assisted deposition of coatings. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1393, 012131–012141.

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 20-79-10015-П)

## МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ И ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ\*

*А.С. КЛИМОВ<sup>1</sup>, И.Ю. БАКЕЕВ<sup>1</sup>, А.А. ЗЕНИН<sup>1</sup>, А.В. КАЗАКОВ<sup>1</sup>, Е.М. ОКС<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

Электронно-лучевая обработка низкоэнергетичными пучками электронов позволяет изменять структуру, фазовый состав, механические, оптические и электрические свойства материалов. Этот метод основан на использовании интенсивного пучка электронов высокой энергии от десятков до сотен кэВ, который воздействует на поверхность образца в вакуумной камере. При этом происходят различные физические и химические процессы, такие как нагревание, плавление, испарение, ионизация, возбуждение, рассеяние, диффузия, рекомбинация и т.д. [1]. Электронно-лучевая обработка может увеличивать твердость, износостойкость, коррозионную стойкость и диэлектрическую проницаемость Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керамики. Недостаток существующих методов электронно-лучевой обработки в необходимости обеспечения низкого давления в области генерации и транспортировки электронного пучка, что приводит к проблеме снятия отрицательного заряда с облучаемой не проводящей поверхности. Повысить эффективность и качество электронно-лучевой обработки возможно за счет использования форвакуумных плазменных источников электронов. Такие источники способны формировать электронный пучок в условиях повышенных давлений в диапазоне 5-20 Па [2, 3]. При таких давлениях этом за счет потока ионов из пучковой плазмы, создаваемой в области транспортировки электронного пучка, обеспечивается практически полная нейтрализация зарядки поверхности облучаемого диэлектрика [4].

В настоящей работе представлено влияния режимов электронно-лучевой обработки в форвакуумной области давлений на структуру поверхности (рис. 1), прочностные, электрические и тепловые свойства различных керамик и ферромагнитных материалов. В зависимости от свойств материала результат обработки может значительно отличаться.

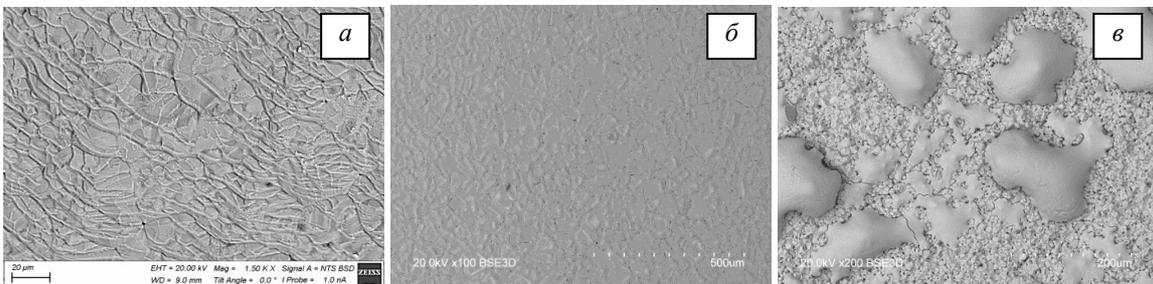


Рис.1. Поверхность Mn-Zn феррита – а, алюмооксидной керамики – б, в, после обработки непрерывным электронным пучком - а, б и импульсным – в.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sreedevi A. et al. Influence of electron beam irradiation on structural and optical properties of  $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> nanoparticles //Micron. – 2016. – Т. 88. – С. 1-6. doi.org/10.1016/j.micron.2016.05.003.
- [2] Kazakov A.V., Medovnik A.V., Oks E.M., Panchenko N.A. Broad-beam plasma-cathode electron beam source based on a cathodic arc for beam generation over a wide pulse-width range // Review of Scientific Instruments. – 2020. – V. 91. – Art. No. 093304. doi.org/10.1063/5.0023172.
- [3] Klimov A. et al. Forevacuum plasma source of continuous electron beam //Laser and Particle Beams. – 2019. – Т. 37. – No. 2. – С. 203-208. doi.org/10.1017/S0263034619000375
- [4] Burdovitsin V. A. et al. Electron beam treatment of non-conducting materials by a fore-pump-pressure plasma-cathode electron beam source //Plasma Sources Science and Technology. – 2010. – Т. 19. – No. 5. – С. 055003. DOI 10.1088/0963-0252/19/5/055003.

\* Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2024-0006.

## ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАКОВЫЕ КЛЕТКИ ГЛИОБЛАСТОМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА КИЛОГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ\*

*Д.Б. ЗОЛОТУХИН<sup>1</sup>, М. КЕЙДАР<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

<sup>2</sup>Университет Джорджа Вашингтона, Вашингтон, США

Изучение воздействия химических и физических факторов, генерируемых источниками холодной равновесной плазмы атмосферного давления, на раковые клетки, в настоящее время является активной областью исследования источников газоразрядной плазмы применительно к задачам онкологии [1]. Ранее было показано, что холодная плазменная струя килогерцового диапазона способна оказывать губительное воздействие на раковые клетки даже в случае, если раствор с ними защищен от непосредственного воздействия плазмы тонким диэлектрическим барьером [2]. При генерации плазмы в замкнутом диэлектрическом объеме, излучение из нее повышает чувствительность клеток к лекарственному препарату – темозоломиду, и тем самым снижает их жизнеспособность [3].

Данная работа посвящена, с одной стороны, изучению степени дальнего действия электромагнитного излучения из изолированной плазмы на раковые клетки, с другой, оценке соотношения вкладов теплового и электромагнитного воздействия на клетки на различных расстояниях от газоразрядного источника. На рис. 1 изображен предварительный результат эксперимента – процентное содержание клеток в разных состояниях (жизнеспособные, находящиеся в апоптозе, некротические и с проницаемой мембраной), подвергнутых различным воздействиям.

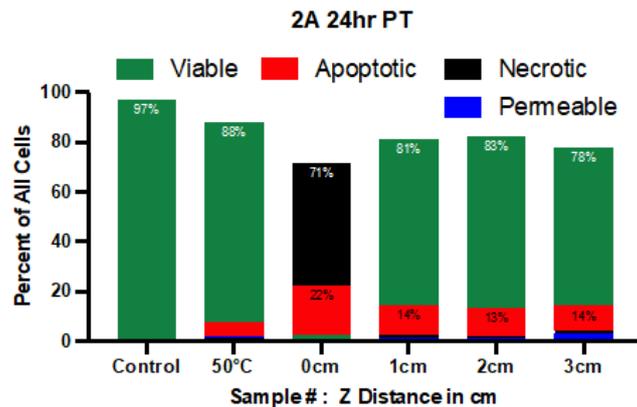


Рис.1. Результат воздействия на раковые клетки глиобластомы *in vitro*: контрольная популяция, клетки после нагрева до 50 °С в течение 12 минут, и после электромагнитного облучения из диэлектрического объема с газоразрядной плазмой на разном от нее расстоянии (0-3 см) в течение 12 минут. Клетки исследованы через 24 часа после воздействия на них.

Из рис. 1 видно, что простой нагрев клеток приводит к меньшему проценту апоптотических клеток, чем воздействие излучения плазмы. Повышенный процент клеток в состоянии апоптоза наблюдается на расстояниях до 3 см, что свидетельствует о наличии эффекта на дистанциях как минимум в несколько сантиметров. Вместе с тем, высокий процент некротических клеток при их размещении непосредственно на поверхности газоразрядного объема свидетельствует о значимости и необходимости учета фактора теплового воздействия на клетки.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Keidar, D. Yan and J. Sherman «Cold Plasma Cancer Therapy». San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2019.
- [2] D. Yan, Q. Wang, M. Adhikari, A. Malyavko, L. Lin, D. B. Zolotukhin, X. Yao, M. Kirschner, J. H. Sherman and M. Keidar, “A physically triggered cell death via transbarrier cold atmospheric plasma cancer treatment,” ACS Appl. Mater. Interfaces, V. 12, № 31, p. 34548–34563, Jul. 2020, doi: 10.1021/acsami.0c06500.
- [3] X. Yao, D. Yan, L. Lin, J. H. Sherman, K. B. Peters, S. T. Keir, and M. Keidar, “Cold plasma discharge tube enhances antitumoral efficacy of temozolomide,” ACS Appl. Bio Mater., V. 5, № 4, p. 1610–1623, Mar. 2022, doi: 10.1021/acsbm.2c00018.

\* Работа Д.Б. Золотухина была поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2023-0012.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОГО (БЕЗГАЗОВОГО) МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА\*

*М.В. ШАНДРИКОВ<sup>1</sup>, А.А. ЧЕРКАСОВ<sup>1</sup>, Е.М. ОКС<sup>1</sup>, В.О. ОСКИРКО<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, г.Томск, Россия*

Представлены результаты экспериментального исследования непрерывной формы магнетронного разряда в вакуумном (безгазовом режиме). В работе использовалась разрядная система планарной геометрии с медной мишенью диаметром 100 мм прямого охлаждения. Предельное рабочее давление в камере при функционировании магнетронного разряда составило  $4 \cdot 10^{-3}$  Па. Минимальное значение тока для перехода разряда в безгазовый режим самораспыления составило 8.5-9 А. При переходе из газового в вакуумный режим функционирования, напряжение разряда увеличивалось на несколько десятков вольт.

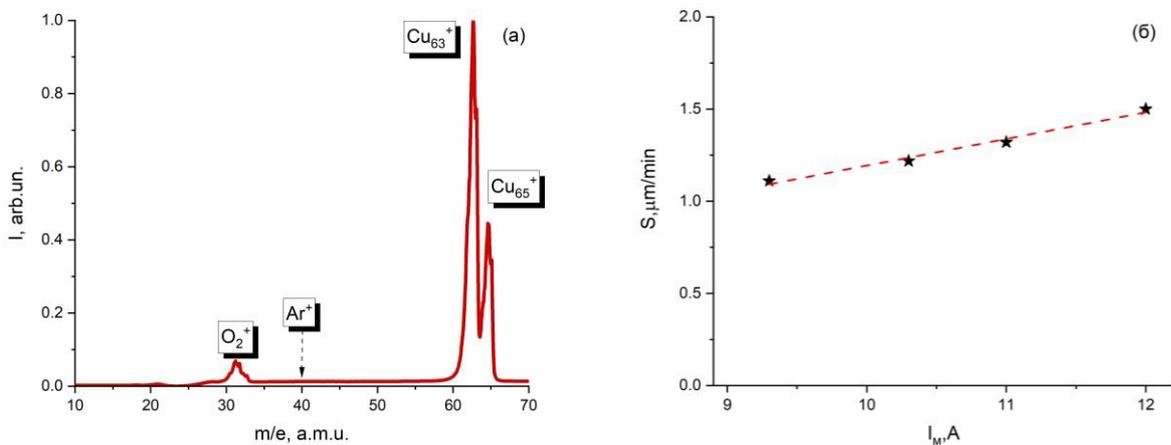


Рис.1. Спектр ионов плазмы магнетронного разряда в безгазовом (вакуумном) режиме при токе разряда 10А (а) и зависимость скорости напыления от тока разряда (б).

Полученный режим функционирования магнетронной распылительной системы без рабочего газа характеризуется высокой скоростью напыления (1-2 мкм/мин) и представляет практический интерес в качестве альтернативы вакуумно-дуговым методам осаждения, но в отсутствие микрокапельного загрязнения плазмы. При этом низкое давление в процессе осаждения способствует бесстолкновительному (балластическому) режиму пролета распыленных атомов от мишени до подложки без снижения их энергии.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 24-19-00031).

## **ВЛИЯНИЕ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА РАБОЧИЕ РЕЖИМЫ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА\***

*А.А. ЧЕРКАСОВ, М.В. ШАНДРИКОВ, Е.М. ОКС*

*Институт сильноточной электроники, СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Представлены результаты исследования параметров сильноточного импульсного магнетронного разряда с инъекцией электронов из плазмы вакуумно-дугового разряда. Эмиттерный разряд располагался с обратной стороны мишени магнетрона. Анодом эмиттерного разряда служила мишень магнетронного разряда. Электроны из эмиттера поступали в область основного магнетронного разряда через апертуру в центре мишени, ускорялись в катодном слое магнетронного разряда и осуществляли дополнительную ионизацию как атомов рабочего газа, так и распыленных атомов материала мишени. Использование дополнительной инъекции электронов позволяло стабилизировать сильноточный (до 100 А) импульсный (200-1000 мкс) магнетронный разряд в области низких значений рабочего давления (вплоть до 0.2 мТорр).

Показано, что в зависимости от величины тока инжектированных электронов, определяющего напряжение функционирования магнетронного разряда, возможно создание плазмы с доминированием в ней как металлического, так и газового ионного компонентов. В области предельно низкого давления при относительно небольших значениях тока инъекции (0.5-1.5 А), высокое напряжение магнетронного разряда обеспечивает интенсивное распыление и ионизацию материала мишени магнетрона. При этом для ряда материалов катода с низким коэффициентом распыления (Ti, Ta) в плазме преобладают многозарядные ионы металла. При увеличении тока инжектированных электронов и, соответственно, снижении напряжения магнетронного разряда до величины 150-250 В при токе разряда 20-30 А реализуется т.н. нераспыляющий режим магнетрона с долей ионов рабочего газа в плазме до 95-100 %. Такой режим представляет интерес для генерации объемной плазмы реактивных газов и водорода.

\* Исследование выполнено по теме государственного задания ИСЭ СО РАН, проект FWRM-2021-0006).

**ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ: ТЕПЛОВАЯ ЭРОЗИЯ, ИЗЛУЧЕНИЕ, НАНОЧАСТИЦЫ\***

*К.П. САВКИН<sup>1</sup>, Д.А. СОРОКИН<sup>1</sup>, Д.В. БЕЛОПЛОТОВ<sup>1</sup>, А.Г. НИКОЛАЕВ<sup>1</sup>, М.А. ШАНДРИКОВ<sup>1</sup>, А.В. НИКОНЕНКО<sup>1</sup>,  
К.А. ЩЕГЛОВ<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия*

Представлены результаты исследования процессов функционирования газового разряда атмосферного давления в режиме тлеющего разряда. Общепринятым подходом к генерации низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении является применение коронных разрядов [1] и барьерных разрядов [2], в которых хотя бы один из электродов закрыт диэлектриком или погружен в жидкую неметаллическую среду [3].

В настоящей работе показано, что при обеспечении совокупности условий, связанных с геометрической конфигурацией разрядной системы, газовым питанием, и импульсно-периодическим электропитанием разряда, обеспечивается его стабильное функционирование в достаточно сильноточном режиме по сравнению с коронным разрядом без применения диэлектрических барьеров. При этом не наблюдаются переходы в режим дугового разряда с катодными пятнами [4].

Характерной особенностью разряда такого типа является локализация мощности в непосредственной близости от поверхности катода. Тем самым обеспечивается его тепловая эрозия в виде потока атомов металлов, поступающих в разрядный промежуток. Присутствие в разрядной плазме ионов и возбужденных атомов металлов идентифицируется по характеристикам оптического излучения. Таким образом, тлеющий разряд при атмосферном давлении может применяться в качестве источника спонтанного излучения открытого типа.

Атомы металлов, прошедшие через плазму разряда, выносятся за пределы разрядной системы струей рабочего газа, остывают, слипаются в агломераты, которые образуют нанокристаллиты с характерными размерами на уровне от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров.

При сохранении в инертной среде, полученные наночастицы формируют металлический ультрадисперсный порошок. При обеспечении доступа атмосферного воздуха происходит взаимодействие с кислородом, в результате которого формируются нанопорошки оксидов металлов. Это подтверждается результатами исследования морфологии, химического и фазового состава отдельных порошковых частиц и покрытий, сформированных на их основе.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] E. Sysolyatina, A. Mukhachev, M. Yurova, M. Grushin, V. Karalnik, A. Petryakov, N. Trushkin, S. Ermolaeva, Yu. Akishev, "Role of the Charged Particles in Bacteria Inactivation by Plasma of a Positive and Negative Corona in Ambient Air", *Plasma Processes and Polymers*, vol. 11(4), p. 315–334, Apr. 2014, doi: 10.1002/ppap.201300041.
- [2] Д.Г. Коренюгин, А.М. Марциновский, "Асимметричный барьерный разряд в пульсирующем режиме", *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, Т. 11. № 2. с. 73–83, Фев. 2018, doi: 10.18721/JPM.11207.
- [3] Ю.А. Баринов, С.М. Школьник, "Разряд с жидким неметаллическим катодом (водопроводная вода) в потоке воздуха атмосферного давления", *Журнал технической физики*, Т. 86, № 11, с. 155–158, Окт. 2016, doi: 10.21883/jtf.2016.11.43833.1833.
- [4] Д.В. Белоплотов, А.С. Бугаев, В.И. Гушенец, А.Г. Николаев, А.В. Никоненко, К.П. Савкин, Д.А. Сорокин, А.А. Черкасов, М.В. Шандриков, "Слаботочный разряд в потоке аргона при атмосферном давлении в условиях образования атомов металлов: электрические и оптические характеристики", *Изв. вузов. Физика*, Т. 65, № 11, с. 11–18, Нояб. 2022, doi: 10.17223/00213411/65/11/11.

\* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00265, <https://rscf.ru/project/22-19-00265/>.

## ГЕНЕРАЦИЯ МОДУЛИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ИСТОЧНИКЕ С МНОГОДУГОВЫМ СЕТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ\*

В.Н. ДЕВЯТКОВ, М.А. МОКЕЕВ, М.С. ВОРОБЬЁВ, Н.Н. КОВАЛЬ, П.В. МОСКВИН, Р.А. КАРТАВЦОВ,  
С.Ю. ДОРОШКЕВИЧ, М.С. ТОРБА

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Российская Федерация*

В работе представлена конструкция многодуговой разрядной системы и принцип построения её многоканального источника электропитания для источника электронов типа СОЛО с многодуговым сеточным плазменным эмиттером [1] с учетом опыта, полученного в рамках работы [2]. Катодный узел выполнен на основе открытого (без контрагирования) дугового разряда с его инициированием электрическим пробоем по поверхности диэлектрика. По сравнению с одноканальной системой с перераспределяющим электродом большого размера, многодуговая система позволяет не только увеличить диаметр генерируемого электронного пучка, но и эффективно управлять мощностью пучка в течение субмиллисекундной длительности импульса, а также распределением плотности энергии (как интегральной, так и в течение импульса тока пучка) [3].

Приведены основные характеристики и особенности работы разрядной системы, предназначенной для создания плазмы в плазменном катоде в условиях проникновения в разрядную систему продольного магнитного поля, используемого для транспортировки электронного пучка и результаты по генерации сильноточного (до 400 А) модулированного низкоэнергетического (до 18 кэВ) электронного пучка. Напряжение горения разрядов, измеряемое на одном из катодов, изменяется в интервале  $\sim 20-40$  В, увеличиваясь при снижении давления газа и увеличении магнитного поля, проникающего в плазменный катод (рис. 1а).

Представлены результаты по генерации модулированного электронного пучка диаметром 30–60 мм, который транспортируется до коллектора в продольном магнитном поле на расстояние около 600 мм (рис. 1б) с удовлетворительной для технологических применений неоднородностью. Развиваемый подход по генерации интенсивных модулированных электронных пучков в системах источников электронов с плазменными катодами существенно расширяет возможности столь уникального оборудования как в научных целях, так и для решения задач в промышленности.

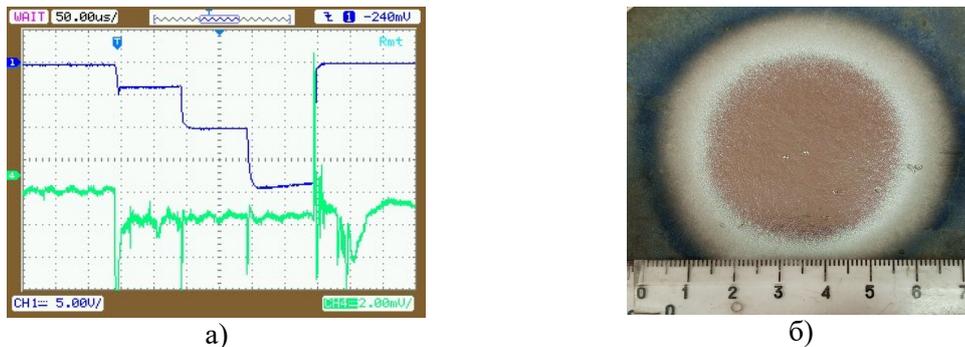


Рис. 1. а – ток разряда и напряжение горения на одном из катодов при:  $p=5 \cdot 10^{-4}$  тор и поле соленоида  $B=20$  мТ.  
Масштаб: 100 А/дел, 40 В/дел., 50 мкс/дел.  
б – Автограф электронного пучка на коллекторе из Ti.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin, V.P. Grigoryev, T.V. Koval, *Laser Particle Beams*, 21 (2), 243 (2003). DOI: 10.1017/S026303460321212X
- [2] М.С. Воробьёв, С.А. Гамермайстер, В.Н. Девятков [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т.40, №12. – С. 24–30.
- [3] М.С. Воробьёв, П.В. Москвин, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова, С.Ю. Дорошкевич, В.Н. Девятков, М.С. Торба, В.А. Леванисов, Письма в ЖТФ, 47 (10), 38 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50972.18719

\* Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 20-79-10015-П).

**РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ В  
ООО «НПК ТЭТА»**

*Г.В. СЕМЕНОВ<sup>1</sup>, И.В. ОСИПОВ<sup>1</sup>, М.П. МОТОРИН<sup>1,2</sup>, Н.Н. КОВАЛЬ<sup>2</sup>, М.С. ВИНКУРОВ<sup>1</sup>, Р.Г. НОВГОРДОВ<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ООО «НПК «ТЭТА», Томск, Россия*

*<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского  
отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), Томск, Россия*

Рассмотрены новые разработки ООО «НПК ТЭТА» в области электронно-лучевой сварки, наплавки и термообработки для передовых отраслей российской промышленности.

Решена важная задача разработки и создания катодных узлов для прямонакальных электронных пушек, что позволяет оперативно производить замену катодов при их износе или в аварийных случаях, сократив до минимума время простоя действующего сварочного оборудования. Для действующих импортных установок электронно-лучевой сварки в рамках программы по импортозамещению проведена работа по замене прямонакальных вольфрамовых катодов на отечественные: выбран материал для изготовления катода, определены оптимальные параметры работы катода и критерии его износа для своевременной замены для исключения брака свариваемых соединений.

Рассмотрена конструкция, основные параметры и технологические возможности разработанной и созданной в ООО «НПК ТЭТА» установки электронно-лучевой наплавки ТЭТА 30E1500-3D для реализации аддитивной технологии проволоочной электронно-лучевой наплавки для изготовления изделий аэрокосмической техники. Внутри вакуумной камеры с размерами 2500x2500x2500 мм на пятиосевом (три координаты X,Y,Z и два угла наклона) портале размещена электронно-лучевая пушка собственного производства и стол-манипулятор на котором выращивается изделие по «проволоочной» технологии. Манипулятор с использованием специально разработанной программы обеспечивает вращение выращиваемого изделия с изменяемым наклоном его оси. Таким образом, сочетание программируемого перемещения электронной пушки и стола-манипулятора позволяют создавать изделия достаточно сложной формы. В установке имеется возможность независимой подачи двух наплавляемых проволок, бобины с которыми находятся вне вакуума и проволоки через специальное уплотнение в стенке вакуумной камеры подаются к месту наплавки.

Специально разработанная программа TetaCEW обеспечивает автоматизированное управление как всей установкой, так и технологическим процессом, что позволяет загрузив 3D-модель изделия получать на выходе готовое изделие сложной формы. В качестве примера приведён процесс изготовления шар-баллона ёмкостью 58 литров из сплава ВТ6 с использованием проволоки диаметром 2 мм, что позволило сократить время изготовления и расход материала по сравнению с традиционной технологией.

Ещё одной из новых разработок ООО «НПК ТЭТА» является установка для автоматизированной электронно-лучевой сварки пластинчатых решёток из сплавов циркония с системой поиска свариваемых стыков по анализу сигнала тока электронов, отражённых от места сварки. Приведён пример работы такой установки при сварке двух тонкостенных решёток, когда электронный луч в автоматическом режиме наводится на место сварки и производит сварку более чем 1000 швов, поддерживая заданный оптимальный режим работы пушки мощностью  $\approx 6$  кВт.

Промышленная реализация вышеперечисленных возможностей электронно-лучевой техники и технологии позволяет обеспечивать технологический суверенитет России в этом важном направлении развития для передовых отраслей индустрии.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ МОЩНОСТЬЮ ДО 300 кВт***М.П. МОТОРИН<sup>1,2</sup>, Н.Н. КОВАЛЬ<sup>2</sup>, А.В. ЦЫКАЛОВА<sup>1</sup>*<sup>1</sup>ООО «НПК «ТЭТА», Томск, Россия<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), Томск, Россия

Современная металлургия тугоплавких материалов и будущие высокотоннажные химическая, горнодобывающая и строительная индустрии в качестве перспективного эффективного инструмента для передачи и утилизации энергии подразумевает использование мощных электронных пучков, обладающих непревзойденными коэффициентами полезного действия (К.П.Д.) по передаче энергии пучка в вещество. Учитывая также потенциально высокие К.П.Д. по передаче энергии «от розетки» в пучок представляется весьма перспективным развитие техники получения и технологии использования мощных субмегаваттных электронных пучков в технологических целях.

Задача создания мощных электронно-лучевых энергокомплексов и технологических установок на их основе является многоплановой и комплексной, включающей как научную проработку, разработку конструкций и технологии их изготовления, так и испытания с отработкой технологических режимов. В этом плане настоящая работа является первым этапом создания мощной пушки, а именно, анализу и расчетам конструкции с учетом известной литературы [1-9].

В работе представлены результаты компьютерного моделирования по созданию и транспортировке электронных пучков с энергией 35 кэВ и мощностью до 300 кВт в непрерывной диодной термоэмиссионной пушке. Приведены: траектории электронных пучков для различных материалов катода, распределение эквипотенциальных линий в ускоряющей промежутке, распределения плотности тока, аксиальное распределение магнитного поля, огибающие пучков. Проведена оптимизация электродной системы магнитного поля для характерных режимов работы пушки.

По результатам моделирования была разработана и изготовлена электронно-лучевая пушка мощностью до 300 кВт, конструкция и основные эксплуатационные параметры которой также приведены и описаны. Источником электронов в пушке является катод косвенного накала из тантала с формированием луча в электродной системе на основе электростатической системы по принципу диода Пирса. Формирование и фокусировка луча осуществляется системой магнитной фокусировки.

Описанная электронно-лучевая пушка разработана для решения различных технологических задач: электронно-лучевое нанесение функциональных покрытий методом осаждения из парогазовой фазы, например для получения термобарьерного покрытия; для рафинирования, плавки и переплава тугоплавких и активных металлов и других технологических операций, требующих электронные пучки большой и средней мощности. Приведены примеры использования созданной электронно-лучевой пушки с мощностью пучка до 150 кВт для сварки и поверхностного оплавления массивных заготовок из тугоплавких металлов. Показано, что разработанная пушка является прототипом для создания нового класса электронно-лучевого технологического оборудования для передовых отраслей промышленности.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] С.И. Молоковский, А.Д. Сушков «Интенсивные электронные и ионные пучки». Москва: Энергоатомиздат, 1991.
- [2] С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейнфельд, П.М. Щанин «Электронные пучки большого сечения». Москва: Энергоатомиздат, 1984.
- [3] Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко «Эмиссионная электроника». Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
- [4] А.А. Кайдалов «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. 2-е изд., перераб. и доп». Киев: Экотехнология, 2004.
- [5] И.В. Алямовский «Электронные пучки и электронные пушки». Москва: Советское радио, 1966.
- [6] P.W. Hawkes, E. Kasper «Principles of Electron Optics: Applied Geometrical Optics». Elsevier Science, 1989.
- [7] Л.Г. Шерстнев «Электронная оптика и электроннолучевые приборы: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений». Москва: Энергия, 1971.
- [8] Б.А. Мовчан, К.Ю. Яковчук «Электронно-лучевые установки для испарения и осаждения неорганических материалов и покрытий.» Современная электрометаллургия. 2004, № 2, с. 10.-15.
- [9] С.В. Хомутский, О.Н. Козловец, В.В. Ищенко «Получение слитков меди высокого качества из отходов промышленности электронно-лучевым переплавом с промежуточной емкостью», Современная электрометаллургия. 2004, №2, с. 19.-20.

## ПОЛУЧЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ АДДИТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

*А.В. ЧУМАЕВСКИЙ, В.Е. РУБЦОВ, С.Ю. ТАРАСОВ, Е.А. КОЛУБАЕВ*

*<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

На настоящее время технологии аддитивного производства представляют широкий спектр возможностей для производства изделий с различными характеристиками, габаритами, формой и функциональным назначением. Такое положение обусловлено возрастающими требованиями промышленности к повышению качества изделий, снижению затрат ресурсов на их изготовление, формированию в деталях нестандартного сочетания структуры, механических свойств и эксплуатационных характеристик. Для авиационной, ракетно-космической, криогенной и иных областей промышленности имеется ряд важных задач по производству крупногабаритных моно- и полиметаллических деталей и конструкций на основе титановых, никелевых, медных сплавов и сталей. К ним относятся гомогенные изделия в виде баков, емкостей, кронштейнов, лопаток турбин и иных элементов из сталей, титановых или никелевых сплавов, и полиметаллические детали типа емкостей, сопел, валов или втулок с сочетанием медных, никелевых сплавов или сталей.

Благодаря получению многокомпонентных элементов возможно совмещение в одном изделии высокой коррозионной стойкости, жаропрочности или жаростойкости с высокой эффективностью отвода тепла из рабочей зоны. Также подобные сочетания материалов могут иметь актуальность в криогенной технике. Для емкостей криогенной техники и химических аппаратов возможно использование сочетания нержавеющей стали и меди, для сопел ракетных двигателей типично совмещение никелевого сплава и меди/медного сплава. При этом, именно в данном направлении аддитивные технологии, наряду с наплавкой, являются одними из немногих, способных выпускать изделия биметаллического или полиметаллического типов. Но, в то время как наплавка преимущественно позволяет наносить покрытия, 3D-печать дает возможность изготавливать сложноорганизованное многокомпонентное объемное изделие в течении одного производственного цикла. В то же время и печать изделий типа лопаток или емкостей из никелевых или титановых сплавов из-за значительной сложности формы, расхода ресурсов и временных затрат на производство ставит задачи для применения аддитивных технологий в области получения гомогенных изделий.

Методы 3D-печати значительно отличаются по способу введения материала и источнику нагрева. К технологиям с использованием порошкового материала относятся селективное лазерное (SLM) или электронно-лучевое (EBM) сплавление и направленной подачи порошка со сплавлением лазерным лучом (DED). К технологиям, основанным на подаче проволок в зону печати, относятся электронно-лучевая (EBAM), лазерная (WLAM) и электродуговая (WAAM). В целом, возможно выделить значительно большее количество технологий аддитивного производства, но наиболее широко представлены в области печати металлических изделий, указанные выше. Основным преимуществом технологий порошковой 3D-печати является точность размеров, возможность печати миниатюрных изделий, получения пространственных конструкций и метаматериалов. К преимуществам проволочных технологий относятся производительность, значительно меньшая стоимость расходных материалов и возможность получения наиболее крупногабаритных изделий. Проволочная аддитивная электронно-лучевая технология имеет ряд преимуществ над аналогами, так как позволяет получать в материалах крупнокристаллическую структуру с направленным ростом зерна, плавно управлять структурно-фазовым состоянием при печати, использовать материалы, труднодоступные или недоступные для работы с проволочной дуговой или лазерной аддитивных технологий (медь, низколегированные медные сплавы, тугоплавкие сплавы, высоколегированные никелевые сплавы и др.). В связи с вышеперечисленной целью настоящей работы является выявить особенности организации структуры и свойств крупногабаритных изделий из титанового сплава ВТ6св, биметаллических элементов «никелевый сплав Inconel625 – медь М1», «сталь 06Х19Н9Т – медь М1» и «сталь 09Г2С – бронза БрАМц9-2» в процессе печати методом проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии с различной конфигурацией и стратегией нанесения материала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00578, <https://rscf.ru/project/22-19-00578/>.

**ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СИЛУМИНА АК12М2МГН ТИТАНОМ\****Е.А. ПЕТРИКОВА, Ю.Ф. ИВАНОВ, П.В. МОСКВИН, Н.А. ПРОКОПЕНКО**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия*

Силумины в настоящее время являются одним из перспективных современных легких материалов, проявляющих хорошее сопротивление износу, высокую жидкотекучесть и термическую стабильность. Явным недостатком данных сплавов является плохая обрабатываемость давлением из-за склонности к образованию трещин. Наличие легирующих элементов (железа, магния, марганца, меди и др.) способствует, с одной стороны, повышению прочности, а с другой стороны, формируя интерметаллиды пластинчатой морфологии, снижает трещиностойкость силумина. Снижению пластических свойств силуминов также способствует присутствие пластин кремния, формирующихся в процессе кристаллизации.

Формирование в поверхностном слое дополнительных уровней структурно-фазового состояния в субмикро- и наноразмерной области их существования позволяет существенным образом изменять физико-механические свойства металлов и сплавов, в том числе и силумина.

Одним из способов повышения служебных характеристик деталей машин и механизмов является поверхностное легирование, при котором специальные свойства поверхности достигаются сплошным или локальным формированием на ней сравнительно тонких легированных слоев, свойства которых соответствуют эксплуатационным требованиям. Использование в качестве инструмента концентрированных потоков энергии (мощные ионные и электронные пучки, потоки плазмы, лучи лазера и т.д.) позволяет формировать в поверхностных слоях металлов и сплавов неравновесные структурно-фазовые состояния, содержащие наноструктурную составляющую. В результате в поверхностном слое формируется многоуровневая структура, обладающая повышенной способностью к релаксации упругих напряжений при высоких физических и прочностных свойствах.

В данной работе формирование поверхностных сплавов осуществляли методами импульсного электронно-пучкового плавления и последующего высокоскоростного охлаждения путем отвода тепла в объем интегрально холодного материала систем пленка/подложка. В качестве подложки использовали силумин эвтектического состава АК12М2МгН. На поверхность подложек наносили вакуумно-дуговым методом с плазменным ассистированием пленку титана ВТ1-0 толщиной 0,7 мкм.

Обработка сочетала в одном цикле формирование системы «пленка (титан) / (силумин) подложка» и последующее облучение поверхности интенсивным импульсным электронным пучком на установке «КОМПЛЕКС». Параметры пучка электронов: энергия электронов  $eU = 18$  кэВ; плотность энергии пучка электронов  $E_s = (10 - 30)$  Дж/см<sup>2</sup>; длительность импульса  $\tau = (20, 50, 100, 200)$  мкс; количество импульсов  $N = 3-30$ . В зависимости от режима облучения в поверхностном слое силумина формировался легированный слой толщиной не менее 5 мкм, концентрация основных элементов (выявлено методами микрорентгеноспектрального анализа) в котором изменялась в следующих пределах: (7...10) вес. % Si; (3...17) вес. % Ti (остальное алюминий).

Устойчивое плавление системы «пленка (Ti) / (силумин) подложка» фиксируется в интервале плотностей энергии пучка электронов (12-25) Дж/см<sup>2</sup> при длительности воздействия пучка электронов 50 мкс и 100 мкс.

Определены твердость, износостойкость и коэффициент трения системы пленка/подложка до и после электронно-пучкового воздействия, выявлены режимы комбинированной (напыление пленки и формирование поверхностного сплава) обработки сплава АК12М2МгН, обеспечивающие кратное повышение трибологических и прочностных свойств поверхностных слоев. Для системы «(Ti) / АК12М2МгН» кратное увеличение твердости, превышающее твердость исходного силумина в  $\approx 2,5$  раза, снижение коэффициента трения в  $\approx 1,5$  раза; увеличение износостойкости в  $\approx 9,4$  раза получено при облучении электронным пучком по режиму 20 Дж/см<sup>2</sup>, 100 мкс, 10 имп.

\* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-69-00074, <https://rscf.ru/project/24-69-00074/>.

## АЗРАБОТКА НОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСКОРИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОНОВ ИЛУ-12 И ИЛУ-14

*В.В. БЕЗУГЛОВ, А.А. БРЯЗГИН, А.В. ПАК, Л.А. ВОРОНИН, М.В. КОРОБЕЙНИКОВ, А.В. СИДОРОВ, В.О. ТКАЧЕНКО, Е.А. ШТАРКЛЕВ*

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Доклад посвящен разработке новой системы управления высокочастотными многорезонаторными ускорителями электронов ИЛУ-12 и ИЛУ-14 [1], которые генерируют пучок электронов с энергией 7,5-10 МэВ и мощностью до 75-100 кВт. Ускоритель является главным элементом промышленного облучательного комплекса, осуществляющего обработку одноразовых медицинских изделий и пищевых продуктов. В докладе приводится описание новой системы управления ускорителями серии ИЛУ на базе универсального встраиваемого контроллера National Instruments CompactRIO. Современные быстрые встраиваемые контроллеры на базе микропроцессоров в среде реального времени со встроенной матрицей FPGA позволяют создавать устройства такого типа с недостижимой ранее гибкостью настройки, точностью измерения параметров и расстановки управляющих импульсов системы управления ускорителем. Контроль такого устройства посредством промышленного компьютера из программы управления ускорительным комплексом в среде LabView 2013 и CVI 2013 совместимой с Windows 7\10\11 позволяет полностью автоматизировать систему управления ИЛУ. Также уделено внимание разработке дополнительных электронных и программных средств, позволивших расширить области применения мощных ускорителей электронов с энергией до 7.5-10 МэВ в промышленности [2].

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. А. Брязгин, В. И. Безуглов, Е. Н. Кокин, М. В. Коробейников, Г. И. Кузнецов, И. Г. Макаров, Г. Н. Острейко, А. Д. Панфилов, В. М. Радченко, Г. В. Сердобинцев, А. В. Сидоров, В. В. Тарнецкий, М. А. Тиунов, Б. Л. Факторович, К. Н. Чернов, В. Г. Ческидов // Промышленный линейный ускоритель электронов модульного типа ИЛУ-14. Приборы и техника эксперимента, 2011, No 3, с. 5–21.
- [2] Брязгин А.А., Куксанов Н.К., Салимов Р.А. Ускорители электронов для промышленного применения разработанные в ИЯФ им Г.И. Будкера СО РАН // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. No 6. С. 672-685. DOI: 10.3367/UFNr.2018.03.038344. Переводная версия DOI: 10.3367/UFNe.2018.03.038344.

## МЕХАНИЗМЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКА В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ С НАНОСЕКУНДНЫМИ ФРОНТАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Р. А. БОХАН, П. П. ГУГИН, М. А. ЛАВРУХИН, Д. Е. ЗАКРЕВСКИЙ, И. В. ШВЕЙГЕРТ

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия

Одним из важных преимуществ наносекундных импульсных разрядов является способность генерировать большого количества высокоэнергетических электронов во время пробоя. Интерес к данным плазменным источникам обусловлен также перспективными возможностями их использования, в частности, в приборной реализации в качестве коммутационных устройств, в процессах диссоциации химических соединений для нейтрализации вредных соединений, для накачки газовых лазеров высокого давления и в плазмохимических процессах.

В эксперименте и в численном моделировании с использованием кинетического подхода (2D PIC MCC метод) мы исследовали характеристики барьерного газового разряда в гелии при атмосферном давлении. Газовый разряд инициировался импульсами напряжения с фронтами нарастания менее 5 нс и частотой повторения импульсов 5-100 кГц. Объемный режим горения наблюдался при значении импульсного тока до 80 А с пиковой мощностью до 1,5 МВт.

Результаты эксперимента и численного моделирования показывают, что ограничение тока емкостными слоями катодного диэлектрического барьера позволяет обеспечить контролируемый и объемный характер протекания тока, что было бы невозможно при использовании металлических электродов. В то же время увеличение толщины диэлектрического барьера приводит к уменьшению тока разряда. Физическим механизмом ограничения тока разряда является накопление заряда на поверхности диэлектрика, который увеличивает плавающий потенциал поверхности относительно плазмы. Падение потенциала на катодном слое и, как следствие, уменьшение напряженности электрического поля приводит к снижению скорости ионизации. Конкурирующие процессы роста ионизации с увеличением электронного тока от катода за счет ионно-электронной эмиссии и зарядки поверхности диэлектрика определяют величину максимального тока разряда.

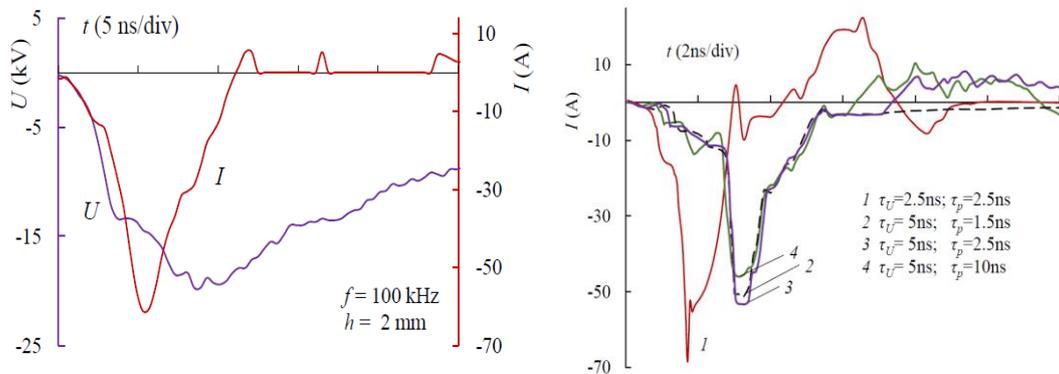


Рис.1. Осциллограммы напряжения разряда  $U$  и тока  $I$ :  $f = 100$  кГц,  $h = 2$  мм, эксперимент (слева) и численный расчет (справа). В численном расчете варьировались длина фронта напряжения  $\tau_U$  и длина импульса напряжения  $\tau_p$ .

На рисунке 1 показаны измеренные и рассчитанные токи разряда во время пробоя для  $U=20$  кВ и ширины диэлектрика на катоде  $h=2$  мм. Радиус камеры 8 мм и расстояние между электродами 8 мм. Ток протекает в объемной моде, без шнурования.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-19-00037.

## ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ВЧ-500-20

*Ю.С. АКТЕРШЕВ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия*

Рассматривается принцип действия разработанного прецизионного регулируемого источника постоянного тока 0–500 А. В источнике использован инверторный принцип преобразования постоянного напряжения в напряжение с частотой 20 кГц с последующим синхронным выпрямлением. Нестабильность выходного тока за 8 ч непрерывной работы составляет менее 0,01 % от номинального значения тока. Примененные схемотехнические решения позволяют уменьшить коммутационные потери в полупроводниковых силовых элементах и повысить КПД источника.

Основные параметры ВЧ-500:

Выходное напряжение	0-20 В
Выходной ток	0-500 А
Напряжение питания	380 В (3 фазы)
Нестабильность выходного тока	0,05% (при Ином.)
Пульсации выходного напряжения	Не более 10мВ в полосе 0-300 Гц
Коммутационные пульсации	Не более 300 мВ в полосе 0 - 40 кГц
Охлаждение	Водяное
Габариты	547*550*133 мм
Масса	Не более 28 кг

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Веремеенко В. Ф. Прецизионные элементы систем питания магнитных структур накопителей заряженных частиц: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1989.
- [2] Мизинцев А. В. Прецизионные источники тока с высокими динамическими характеристиками для питания электромагнитов ускорителей заряженных частиц: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2002.
- [3] Козак В. Р., Купер Э. А. и др. Семейство контроллеров СЕАС для управления источниками питания ускорительно-накопительных комплексов // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2012. Т. 7, № 4 С. 43–48.

## **ПРОЕКТ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЕРМИНАЛА СИСТЕМЫ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

*Д.Н. РУДНЕВ\*, Д.В. СЕНЬКОВ*

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия  
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия,*

*\* e-mail: d.rudnev@g.nsu.ru*

В докладе представлена концепция построения 50кВт системы питания высоковольтного терминала установки ионной имплантации. Система построена по модульному принципу на основе синхронизированных по фазе параллельно включенных обратимых трехфазных преобразователей мощностью 10кВт и секционированного развязывающего трансформатора с рабочей частотой 50кГц. Представлены результаты испытаний прототипа обратимого управляемого трехфазного преобразователя силового модуля на основе на высокоскоростных ключах, управляемых микроконтроллером Piccolo серии C2000 TI. Показана стабилизация выходного напряжения с точностью 0,5% ( $\Delta V/V$ ) и работа в обратном потоке в качестве генератора трёхфазного напряжения 220/380В 50Гц. В алгоритме управления реализована следящая ФАПЧ, позволяющая отслеживать входную фазу сети с обеспечением высокого уровня помехоустойчивости и ремонтпригодности всей системы питания, что является важным для работы в составе высоковольтной установки. На аппаратном уровне ФАПЧ реализован на системе оптопар, сигнал с которых поступает на аналоговые измерительные выходы микроконтроллера. Показаны диаграммы работы системы синхронизации, полученные разработанным в целях отладки алгоритмов программным обеспечением для визуализации спектров сигналов, формирующихся на всех этапах ФАПЧ.

Ключевые слова: Обратимый трехфазный преобразователь, модульная система питания, система развязанного питания высокой мощности, помехоустойчивая система синхронизации силовых преобразователей, следящая ФАПЧ.

[1] Yu. E. Kreindel', Plasma Electron Sources. Moscow: Atomizdat, 1977 [in Russian].

## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ НАСОСОВ НА ОСНОВЕ НЕРАСПЫЛЯЕМЫХ ГЕТТЕРОВ В ИЯФ СО РАН\*

А.А. КРАСНОВ<sup>1,2</sup>, А.М. СЕМЕНОВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Вакуумные системы в современных ускорителях заряженных частиц невозможно представить без применения высоковакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров (НГ), например, в коллайдере SuperKEK-B и синхротроне 4-ого поколения MAX-IV применяются вакуумные камеры с напыленным геттером на внутреннюю поверхность в качестве распределенных средств откачки; в синхротроне 4-ого поколения ESRF-EBS используются как сосредоточенные, так и распределенные средства откачки на базе НГ.

В настоящее время приобретение зарубежных высоковакуумных сосредоточенных НГ насосов представляется большой проблемой, поэтому создание вакуумных насосов на основе нераспыляемых геттеров российского производства из отечественных материалов не хуже зарубежных является первостепенной задачей.

В ИЯФ СО РАН были созданы НГ насосы из нераспыляемых геттеров производства АО «Полема» (г. Тула). На сегодняшний день изготовлены и протестированы сосредоточенные НГ насосы с быстротой откачки 300 л/с, 600 л/с, 800 л/с, 1000 л/с и 1300 л/с по водороду (Рис.1а) [1] и комбинированный насос, объединяющий в себе магниторазрядный насос и насос на базе нераспыляемого геттера, с быстротой откачки 1300 л/с по водороду. На основании полученных результатов АО «Катод» (г. Новосибирск) изготавливает серийно сосредоточенные насосы с быстротой откачки 800 л/с и 1300 л/с по водороду для накопителя ЦКП «СКИФ» [2].

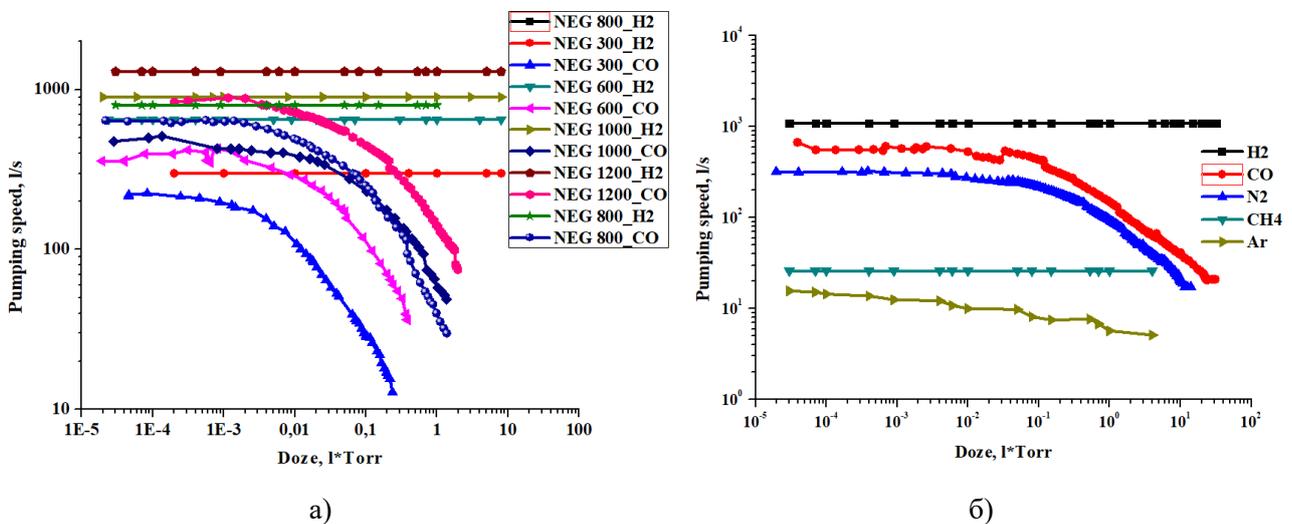


Рис.1. Сорбционная емкость геттеров для водорода и монооксида углерода.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.А. Краснов, А.М. Семенов. Сосредоточенные сверхвысоковакуумные насосы на базе нераспыляемых геттеров, Известия РАН. Серия физическая, 2023, том 87, № 5, с. 646–651.
- [2] Анашин В.В., Гусев Г.А., Жуков А.А., Краснов А.А., Кузьминых В.С., Пиминов П.А., Семенов А.М. Вакуумная система источника синхротронного излучения ЦКП "СКИФ". // Вакуумная наука и техника: Материалы XXIX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, Судак, 16-21 сентября 2022 г. - Москва : Электровакуумные технологии, 2022. - с. 163-176. - EDN PNBXWF.

**ПРОЕКТ ВАКУУМНОГО ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО СТЕНДА «ВЭИПС» С ЭЛЕКТРОННЫМ ИСТОЧНИКОМ «СОЛО» ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ IN SITU СИНХРОТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ\****А.Д. ТЕРЕЦОВ, Н.Н. КОВАЛЬ, В.В. ДЕНИСОВ, С.С. КОВАЛЬСКИЙ, Е.В. ОСТРОВЕРХОВ, А.О. ЕГОРОВ**<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

Интенсивные импульсные электронные пучки широко используются для модификации поверхности различных металлических и металлокерамических материалов и изделий с целью улучшения их физико-механических свойств [1]. Разработанный для решения этих задач в Институте сильноточной электроники СО РАН источник электронов «СОЛО» с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной и открытой границей анодной плазмы позволяет генерировать импульсный электронный пучок с длительностью импульса 20–200 мкс, током пучка до 300 А, энергией электронов до 25 кэВ, частотой следования импульсов 0,3–15 Гц и плотностью энергии до 80 Дж/см<sup>2</sup> [2].

Исследования модифицированных материалов и покрытий рентгеновскими дифракционными методами являются одним из самых распространенных и относительно простых способов для определения качественного и количественного фазового состава, напряжений первого порядка и размера областей когерентного рассеяния (ОКР) объемных материалов, тонких слоев и покрытий. Обычно все исследования проводятся ex-situ на образцах при комнатной температуре, когда все процессы фазообразования завершены. Одним из перспективных методов выявления фазового состава и структуры поверхностного слоя материала во время импульсного электронно-пучкового воздействия (in-situ) является рентгенофазовый анализ с использованием синхротронного излучения. Его высокая яркость и интенсивность позволяют за единицы секунд получать информацию, достаточную для интерпретации фазового состава модифицированного слоя [3].

Для реализации новых методик in situ синхротронных исследований был создан вакуумный электронно-ионно-плазменный стенд («ВЭИПС»), установленный на канале №6 источника СИ ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск). Впервые для целого ряда структур, формируемых на поверхности материалов различными методами пучково-плазменной инженерии, непосредственно в процессе синтеза получены картины изменения структуры и фазового состава с течением времени, включая момент зарождения первых фаз, а также продемонстрирована in situ возможность мониторинга изменения фазового состава формируемых структур при изменении рабочих условий синтеза.

В докладе представлены результаты разработки проекта запуска электронного источника «СОЛО» в составе стенда «ВЭИПС» для реализации новых методик in situ синхротронных исследований материалов в процессе импульсного электронно-пучкового воздействия. Использование in situ методик исследований позволит установить закономерности модификации поверхности материалов и формирования поверхностных сплавов при облучении образцов находящихся как при комнатной температуре, так и в условиях отрицательных (вплоть до криогенных) температур. В результате будут разработаны методики и узлы оборудования для проведения с использованием синхротронного излучения неразрушающего контроля изменения фазового состава и напряжений в поверхностных слоях материалов для определения динамики их поведения в условиях, приближенных к реальным условиям жесткого термоциклирования.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, Ю.А. Денисова, О.В. Крысина и др., Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки. Томск: Изд-во НТЛ, 2016.
- [2] V.N. Devyatkov, Yu.F. Ivanov, O.V. Krygina, N.N. Koval, E.A. Petrikova, V.V. Shugurov, "Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering", Vacuum, V. 143, pp. 464-472, 2017, doi: 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.
- [3] M. Kaufholz, B. Krause, S. Kotapati, M. Kohl, M.F. Mantilla, M. Stuber et al. "Monitoring the thin film formation during sputter deposition of vanadium carbide", Journal of Synchrotron Radiation, V. 22, No 1, pp. 76-85, 2015, doi: 10.1107/S1600577514024412.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348).

## ОБЗОР СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ УСТАНОВКИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

*В.А. ДОКУТОВИЧ<sup>1</sup>, И.А. ГУСЕВ<sup>1</sup>, Д.Н. ПУРЕСКИН<sup>1</sup>, Д.Н. РУДНЕВ<sup>1,2</sup>, Д.В. СЕНЬКОВ<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск*

*<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

В докладе представлена концепция построения системы питания разрабатываемой в ИЯФ совместно с НИИТМ установки ионной имплантации, предназначенной для ионного легирования материалов. Ионное легирование материалов широко применяется создания микросхем и других полупроводниковых изделий. Система питания ионного имплантера – это сложно устроенный комплекс нескольких подсистем: подсистема питания ионного источника, подсистема питания магнитного тракта, развертка ионного пучка, подсистема обеспечивающая развязанное питание высоковольтного терминала, в котором находятся все перечисленные подсистемы и, наконец, высоковольтное питание, задающее энергию имплантируемых ионов. В докладе показаны подходы к созданию всех перечисленных элементов и требования к ним предъявляемые. Приводится анализ возможности, преимуществ и недостатков использования как узлов собственной разработки, так и коммерчески доступных на рынке. Так же описано устройство планируемой системы управления питанием.

В докладе разберем каждый элемент в отдельности с его особенностями и требованиями, предъявляемыми к нему.

Ключевые слова: Высоковольтный источник напряжения, стабилизированный источник тока, система питания установки ионной имплантации, система управления питанием.

## **ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ЗАЗОР СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ДЛЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

*Т.А. ДЕВЯТАЙКИНА*

*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

В статье выполнен обзор факторов, влияющих на прохождение ионного пучка через высоковольтный зазор имплантера, представлены результаты моделирования динамики пучка, предложены методы компенсации его aberrаций. Расчеты выполнены как для разных типов имплантируемых ионов, так и для разных энергий ионного пучка. Представлен обзор способов реализации ускоряющего/замедляющего зазора для различных ионных имплантеров в мировой практике.

**РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЗАЗОРА СИСТЕМЫ  
ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ПУЧКА ДЛЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

*А.В. БЕРДЮГИНА<sup>1,2</sup>, Т.А. ДЕВЯТАЙКИНА<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

*<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

Современное производство полупроводниковых систем требует применения пучков ионов как с высокими, так и с низкими энергиями. В данной работе приведены результаты моделирования многоэлектродной системы, позволяющей замедлить пучок ионов бора с током 50 мкА с начальной энергии 80 кэВ до 4 кэВ и с 10 кэВ до 500 эВ. Потенциалы на электродах системы подбираются таким образом, чтобы на выходе из зазора разброс плотности тока пучка не превышал 1%, отклонение от параллельности луча не превышало 0.5°. Моделирование динамики пучка выполнялось в программных комплексах SAM и CST.



## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Актершев Ю.С.	47	Кейдар М.	36	Рубцов В.Е.	43
Алякринский О.Н.	33	Климов А.С.	35	Руднев Д.Н.	48, 51
Андронов А.А.	23	Коваль Н.Н.	5, 8, 12, 13, 14, 17, 29, 31, 40, 42, 50	Савкин К.П.	39
Антонова Л.В.	24			Салимов Р.А.	9, 15
Артамонов В.С.	22	Коваль Т.В.	17, 29	Самохин А.	24
Афанасьев К.В.	18, 19	Ковальский С.С.	29, 50	Семенов А.В.	9
Бакеев И.Ю.	35	Колубаев Е.А.	43	Семенов А.М.	49
Безуглов В.В.	6, 7, 24, 28, 45	Коробейников М.В.	6, 7, 24, 26, 29, 45	Семенов А.П.	30, 31
Белоплотов Д.В.	39			Семенов Г.В.	41
Бердюгина А.В.	53	Корчагин А.И.	9, 10, 15	Семенов Ю.И.	32, 33
Бохан Р.А.	46	Косачев М.Ю.	32, 33	Сеньков Д.В.	48, 51
Брызгин А.А.	6, 7, 16, 24, 25, 28, 45	Краснов А.А.	49	Серебренников М.А.	27
Варанд А.В.	25	Куксанов Н.К.	9, 10, 11, 15	Сидоров А.В.	6, 7, 28, 45
Винокуров М.С.	41			Сорокин Д.А.	39
Воробьев Д.С.	9, 10, 11, 15	Купер К.Э.	27	Старостенко А.А.	16, 33
Воробьев М.С.	5, 8, 12, 13, 14, 17, 31, 34, 40	Лаврухин А.В.	9	Степченко А.С.	18, 19
Воронин Л.А.	6, 7, 24, 28, 45	Лаврухин М.А.	46	Сулакшин С.А.	12
Гайсин Р.Х.	18	Ландль В.Ф.	19	Тарасов С.Ю.	43
Голковский М.Г.	10	Логачев П.В.	33	Тересов А.Д.	21, 22, 50
Голубенко Ю.И.	9, 15	Михайленко М.А.	25, 26, 28	Ткаченко В.О.	6, 7, 24, 28, 45
Гришков А.А.	5, 13, 17	Мишигдоржийн У.Л.	30, 31, 32	Ткаченко М.Е.	24
Гугин П.П.	46	Мокеев М.А.	8, 17, 40	Толочко Б.П.	25, 26
Гусев И.А.	51	Москвин П.В.	8, 14, 17, 31, 34, 40, 44	Торба М.С.	8, 12, 13, 17, 40
Девятайкина Т.А.	52, 53			Тюньков А.В.	23
Девятков В.Н.	8, 14, 40	Моторин М.П.	41, 42	Улаханов Н.С.	30, 31
Денисов В.В.	14, 29, 50	Найловец Л.В.	22	Улихин А.С.	26
Докутович В.А.	51	Николаев А.Г.	39	Фадеев С.Н.	9, 10, 15
Домаров Е.В.	9, 10, 11, 15	Никоненко А.В.	39	Цыганов А.С.	33
Дорошкевич С.Ю.	5, 8, 12, 13, 40	Новгородов Р.Г.	41	Цыкалова А.В.	34
Дротики М.А.	18	Окс Е.М.	20, 35, 37, 38	Чакин И.К.	9, 15
Егоров А.О.	22, 50	Осипов И.В.	41	Черепков В.Г.	9, 10, 15
Егоров И.С.	27	Оскирко В.О.	37	Черкасов А.А.	37, 38
Животягин В.В.	11	Островерхов Е.В.	22, 29, 50	Чумаевский А.В.	43
Закревский Д.Е.	46	Павлюченко В.А.	16	Шандриков М.А.	39
Зенин А.А.	35	Пак А.В.	45	Шандриков М.В.	37, 38
Золотухин Д.Б.	36	Панченко Н.А.	20	Шарафутдинов М.Р.	26
Иванов Ю.Ф.	34, 44	Петрикова Е.А.	34, 44	Швейгерт И.В.	46
Казаков А.В.	20, 35	Попов В.К.	26	Шпанов Д.А.	34
Картавцов Р.А.	8, 12, 17, 40	Прозоренко П.С.	18	Штарклев Е.А.	6, 7, 16, 34, 28, 45
		Прокопенко Н.А.	44	Щеглов К.А.	39
		Пурескин Д.Н.	51	Юшков Ю.Г.	23
		Радченко В.М.	6, 7, 24	Яковлев В.В.	22, 29
		Ремнев Г.Е.	27		
		Ростов В.В.	18, 19		

Научное издание

**V научно-технический Семинар по электронно-пучковому  
оборудованию и технологиям  
(Обь – 2024)**

Тезисы

**Опубликовано в авторской редакции**

Верстка: Валерий Шкляев

Подписано в печать 4.06.2024 Заказ № 756  
Тираж 100 экз. Формат 60x84 1/8. Уч. печ. л. 7,0. Бумага офсетная.

Отпечатано в типографии издательства «Академиздат»  
(ООО «Агентство маркетинга инноваций»)  
630033 Новосибирск, ул. Мира, 62, оф. 115  
Тел. +7 (383) 263-24-88, +7-903-900-24-88  
[www.academizdat.ru](http://www.academizdat.ru)