

## Особенности использования разрядно-эмиссионной системы вакуумно-дугового источника ионов Mevva-5.Ru для генерации низкоэнергетичных электронных пучков

*К.П. Савкин\*, Г.Ю. Юшков, А.Г. Николаев, К.А. Щеглов*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*savkinkp@mail2000.ru*

**Аннотация.** Исследованы особенности функционирования источника ионов Mevva-5.Ru на основе вакуумно-дугового разряда в режиме генерации электронного пучка. Такая возможность была реализована при минимальных изменениях в конфигурации системы извлечения заряженных частиц. Разряд функционировал в импульсно-периодическом режиме с амплитудой тока от 50 до 150 А, при длительности импульса до 250 мкс и частоте их следования 1 Гц. Эмиссионная поверхность плазмы вакуумной дуги стабилизировалась мелкоструктурной сеткой, расположенной на многоапертурном электроде, закрывающем торец полого анода. В результате смещения разрядной системы до потенциала – 2 кВ относительно заземленного извлекающего электрода, генерировался пучок электронов с амплитудой тока в импульсе до 600 мА. Функционирование источника осуществлялась при давлении  $3 \cdot 10^{-4}$  Па без подачи газа и без создания вспомогательной плазмы и магнитного поля в области извлечения и транспортировки пучка. Продемонстрированы возможности источника заряженных частиц на основе вакуумного дугового разряда применительно к модификации поверхности материалов с низкой температурной стойкостью в условиях высокого вакуума.

**Ключевые слова:** вакуумный дуговой разряд, плазменный эмиттер, адаптация ионного источника, электронный пучок.

### 1. Введение

Источники электронов с плазменным эмиттером являются эффективным инструментом для энергетического воздействия на различные объекты. Традиционно при разработке таких источников значительное внимание уделялось обеспечению высокой плотности мощности электронного пучка, для таких процессов как электронно-лучевая сварка, резка, испарение различных материалов [1]. Современный уровень развития физики твердого тела требует создания новых материалов и разработки различных методов модификации их поверхности. Значительный интерес представляют полимерные материалы, которые находят применение в биомедицине и микроэлектронике [2]. Несмотря на их высокую востребованность, основным недостатком этих материалов является низкая температурная стойкость. Вместе с тем, привлекательной является возможность применения электронно-пучковых технологий для придания поверхности полимерных материалов полезных функциональных свойств. Для этого необходимо обеспечить воздействие электронов со щадящими температурными и энергетическими параметрами на поверхность этих материалов. Существующие в настоящее время электронные пушки и источники широкоапертурных электронных пучков способны генерировать электронные пучки со стабильно воспроизводимыми параметрами, при средней плотности мощности на уровне, не превышающем несколько десятков ватт на квадратный сантиметр [3]. В связи с этим актуальным является решение научно-технической задачи по созданию электронного источника, способного генерировать слаботочные пучки электронов с низкой энергией в стабильном режиме с удовлетворительным воспроизведением параметров электронного пучка для модификации поверхности полимерных материалов. Для решения этой задачи привлекательным является подход, основанный на адаптации имеющегося экспериментального оборудования для генерации таких пучков. Так в работе [4] были исследованы процессы генерации электронного пучка на основе вакуумно-дугового источника ионов металлов Mevva-V. Переключение широкоапертурного ионного имплантера в режим электронного источника осуществлялось

при простой смене полярности ускоряющего напряжения. В настоящей работе исследовались особенности функционирования российской версии источника ионов металлов Mevva-5.Ru в режиме генерации слаботочного (до 1 А) низкоэнергетичного (уровня 1 кВ) электронного пучка без существенных изменений в конструкции и схеме электропитания применительно к дальнейшему развитию электронно-пучковых методов модификации материалов с низкой температурной стойкостью.

## 2. Постановка эксперимента

Для проведения исследований использовался экспериментальный стенд ионного источника на основе вакуумной дуги Mevva-5.Ru (Рис. 1), детальное описание устройства и принцип функционирования которого представлены в [3]. Штатный источник ускоряющего высокого напряжения положительной полярности в данной работе не применялся. В качестве источника ускоряющего напряжения применялся источник отрицательного напряжения до 2 кВ, которое в ионном источнике прикладывалось к многоапертурному отражающему электроду. Трехэлектродная ионно-оптическая система трансформировалась в двухэлектродную, в которой роль эмиссионного электрода выполнял штатный отражающий электрод, а штатный эмиссионный электрод мог находиться под его потенциалом (до  $-2$  кВ) путем установки между ними перемычки (Рис. 1) или под плавающим потенциалом, если перемычка отсутствовала. В некоторых экспериментах многоапертурный электрод с торца полого анода – экспандера демонтировался, тем самым увеличивалась геометрическая прозрачность извлекающей системы. Протяженность ускоряющего промежутка составляла 6 мм.

Для измерения полного тока извлеченного пучка электронов применялся коллектор, который при необходимости размещался непосредственно за извлекающим электродом. Для исследования профиля распределения плотности тока по сечению электронного пучка применялся перемещаемый цилиндр Фарадея. Для измерения тока вакуумного дугового разряда, а также тока электронов на экспандер, находившийся под потенциалом извлекающего электроны напряжения применялись калиброванные трансформаторы тока Pearson с чувствительностью 100 А/В и 10 А/В, соответственно.

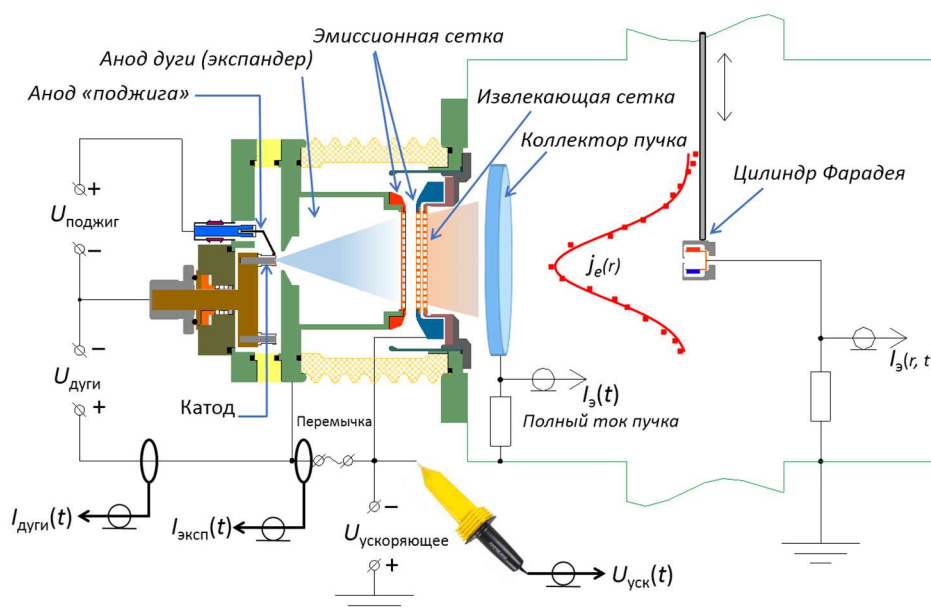


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

Ускоряющее напряжение во время импульса тока вакуумной дуги измерялось при помощи высоковольтного щупа Pintek HVP-28HF. Регистрация и запись зависимостей измеряемых параметров от времени производилась с применением осциллографа Rigol MSO5204.

Предельное остаточное давление в вакуумной системе обеспечивалось турбомолекулярным насосом Pfeiffer HiPace 700 и составляло  $2 \cdot 10^{-4}$  Па. При функционировании вакуумного дугового разряда давление повышалось до  $3 \cdot 10^{-4}$  Па. Для измерения давления применялся широкодиапазонный вакуумметр Micro-Ion Plus.

В исследовании результатов воздействия электронного пучка на термолабильный полимерный материал применялись образцы из тонкого прозрачного полипропилена. Исследование поверхности выполнялось методом растровой электронной микроскопии с применением сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Bruker XFlash 4010/5010.

### 3. Полученные результаты их обсуждение

При использовании модифицированной конфигурации разрядной системы источника заряженных частиц Mevva-5.Ru, когда плазма генерировалась при функционировании между катодом и анодом иницирующего разряда с применением единственного штатного источника питания иницирующего разряда, а полый анод – экспандер соединялся с кольцевым анодом через сопротивление 10 МОм, были выполнены измерения тока разряда  $I_p$  и ускоряющего напряжения  $U_{уск}$  (см. Рис. 2). Показано, что одновременно с возрастанием тока разряда происходило уменьшение ускоряющего напряжения, что является косвенным признаком проникновения плазмы разряда в ускоряющий промежуток между эмиссионным и извлекающим электродами, приводило к замыканию выводов источника питания ускоряющего напряжения и частичной разрядке буферной емкости, подключенной параллельно ускоряющему промежутку, и, как следствие, падению ускоряющего напряжения примерно на 18%. Ток электронного пучка  $I_p$  на фронте импульса возрастал в течение 15 мкс, несмотря на уменьшение ускоряющего напряжения, а затем уменьшался практически синхронно с ускоряющим напряжением, вплоть до момента времени, когда  $U_{уск}$  начинало восстанавливаться на фоне плавного спада тока разряда. Ток пучка достигал максимального за импульс значения при достижении ускоряющим напряжением значения уровня 95% от первоначально установленного. Измерение тока  $I_{эксн}$  в цепи полого анода – экспандера, когда он был подключен к источнику питания  $U_{уск}$  и находился под потенциалом эмиссионного электрода (см. Рис. 1) показало, что форма его импульса практически идентична импульсу тока разряда  $I_p$ , и амплитуда определяется амплитудой тока разряда и не зависит от ускоряющего напряжения. Следовательно,  $I_{эксн}$  являлся индикатором потерь на экспандере заряженных частиц из плазмы вакуумного дугового разряда. Эти потери были обусловлены конструктивными особенностями экспандера и многоапертурного электрода, расположенного на его торце, обращенного в сторону эмиссионного электрода. Следует отметить, что функционирование электронного источника без этого электрода с открытым торцом экспандера приводило к увеличению геометрической прозрачности извлекающей системы вследствие уменьшения потерь заряженных частиц из разрядной плазмы.

Исследование зависимости плотности тока электронов в центре пучка от ускоряющего напряжения (Рис. 3) показало, что наблюдались практически одинаковые формы импульсов тока, а их амплитуды увеличивались с возрастанием ускоряющего напряжения. Зависимость плотности тока от ускоряющего напряжения в данном исследовании не достигала насыщения, поскольку дальнейшее увеличение  $U_{уск}$  приводило к возникновению электрических пробоев ускоряющего промежутка в результате возникновения катодных

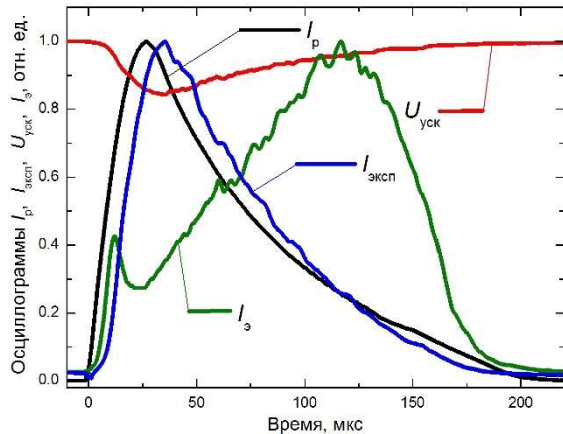


Рис. 2. Осциллограммы параметров электронного источника:  $I_p$  – ток вакуумного дугового разряда;  $I_{\text{экс}}$  – ток экспандера;  $U_{\text{уск}}$  – ускоряющее напряжение;  $I_3$  – ток электронного пучка, нормированные на максимальные значения:  $I_p^{\text{max}} = 50$  А;  $I_{\text{экс}}^{\text{max}} = 2.4$  А;  $U_{\text{уск}}^{\text{max}} = 1.9$  кВ;  $I_3^{\text{max}} = 3.5$  мА/см<sup>2</sup>.

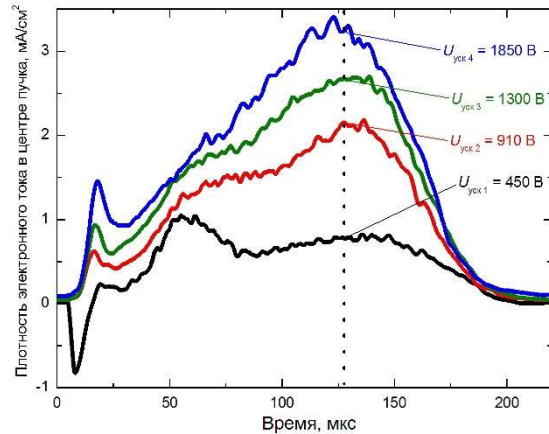


Рис. 3. Динамика плотности электронного тока в центре пучка при различных значениях ускоряющего напряжения и тока вакуумного дугового разряда  $I_p^{\text{max}} = 50$  А. Вертикальной линией показано время, приблизительно 128 мкс после инициирования разряда, которому соответствуют указанные значения  $U_{\text{уск}}$ .

пятен на эмиссионном электроде, и уменьшению ускоряющего напряжения более чем на 60%.

При использовании типичной конфигурации генератора плазмы источника заряженных частиц Mevva-5.Ru, когда ток разряда функционировал между катодом и полым анодом, а источник питания разряда на основе искусственной формирующей линии обеспечивал импульс тока амплитудой приблизительно 150 А, при длительности 250 мкс (Рис. 4). В этом режиме была исследована динамика тока электронов, приходящих на коллектор, расположенный на расстоянии 10 см за извлекающим электродом, в зависимости от ускоряющего напряжения. Диаметр коллектора составлял 25 см, что обеспечивало полное перекрытие извлекаемого электронного пучка. Очевидно, что при постоянном токе вакуумного дугового разряда, с увеличением ускоряющего напряжения происходило возрастание тока коллектора.

Для исследования распределения плотности тока электронов по сечению пучка на расстоянии 45 см от извлекающего электрода применялся подвижный цилиндр Фарадея, который располагался на штоке с возможностью линейного перемещения перпендикулярно оси электронного пучка. Полученные распределения представлены на Рис. 5. В зависимости от конфигурации системы извлечения электронов и параметров вакуумного дугового разряда изменялся профиль распределения и степень неоднородности плотности тока электронов.

При создании плазменного эмиттера при помощи системы электродов и источника питания только высоковольтного разряда по поверхности диэлектрика, который в штатном режиме применялся в качестве инициирующего основной вакуумный дуговой разряд между катодом и полым анодом, характерный профиль распределения описывался зависимостью 1, (Рис. 5). Пучок был достаточно неоднородным, и плотность тока в центре пучка была в 2 раза больше плотности тока на радиальном удалении 50 мм от его середины и почти в 5 раз больше, чем на радиальном удалении 100 мм. При функционировании вакуумно-дуговой разрядной системы в штатном режиме профиль распределения плотности электронного тока описывался зависимостью 2 (Рис. 5). В этом случае плотность тока на периферии пучка была также меньше в 5 раз, по сравнению с плотностью тока в центр, но при радиальном удалении на 50 мм от его середины, плотность тока уменьшалась не более чем на 40%.

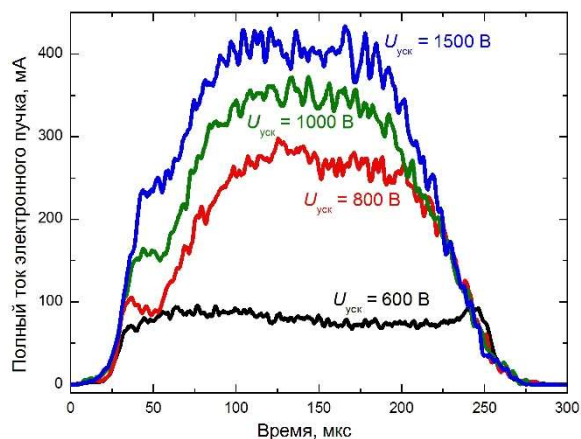


Рис. 4. Динамика тока электронного пучка на коллектор при различных значениях ускоряющего напряжения и токе вакуумного дугового разряда  $I_p^{max} = 150$  А.

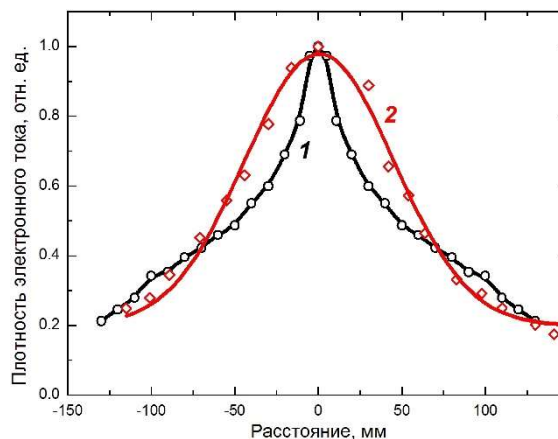


Рис. 5. Распределение плотности электронного тока по сечению пучка при  $U_{уск} = 1.9$  кВ и токах вакуумного дугового разряда  $I_p^{max}$ : 1 – 50 А и 2 – 150 А, нормированные на максимальные значения плотности тока в центре пучка:  $3.5$  мА/см<sup>2</sup> и  $2.3$  мА/см<sup>2</sup>, соответственно.

Следует отметить, что абсолютное значение плотности тока в центре пучка с применением модифицированной разрядной системы составляло  $3.5$  мА/см<sup>2</sup> против  $2.3$  мА/см<sup>2</sup>, с применением штатного генератора плазмы, что больше в 1.5 раза. Интегральные по площади значения полного тока извлеченных электронов составляли 600 мА и 400 мА, соответственно. Таким образом, имея в наличии штатный набор электродов и источников питания вакуумно-дугового источника ионов металлов Mevva-5.Ru, возможно не только осуществлять его функционирование в режиме источника электронов, но и управлять профилем распределения плотности тока и, как следствие, плотностью мощности и энергией электронного пучка. Это имеет практическое значение при дозированном тепловом и радиационном воздействии на материалы с низкой температурной стойкостью.

Результаты воздействия полученного электронного пучка на поверхность были исследованы в результате экспонирования полипропилена под электронным пучком. Экспериментальный образец размерами  $80 \times 80$  мм подвешивался на траверзах из тонкой медной проволоки и прилегал к поверхности заземленного коллектора большого сечения, расположенного на расстоянии 10 см от извлекающего электрода. Центр экспериментального образца находился на оси электронного пучка. Основные параметры источника заряженных частиц при этом были следующими: ускоряющее напряжение  $U_{уск} = 2$  кВ, полный ток электронного пучка в течение длительности импульса  $I_s = 600$  мА, при длительности импульса 200 мкс и частоте следования импульсов 1 Гц. Время экспозиции составляло 1 час. Для анализа непосредственно из центра листа электронномодифицированного полипропилена вырезался кусочек размерами  $1 \times 1$  см. Данный участок экспериментального образца подвергался воздействию электронного пучка с плотностью мощности  $7$  Вт/см<sup>2</sup>. Плотность энергии за время экспозиции составляла приблизительно  $5$  Дж/см<sup>2</sup>. Изображения поверхностей исходного и модифицированного образцов представлены на Рис. 6 и 7, соответственно. Очевидно, что после воздействия электронного пучка на поверхности появляются борозды, точечные растрескивания и пузыри с характерными размерами 5–10 мкм, обусловленные деструкцией полимерных молекул и выходом газообразных продуктов. Не смотря на это, макроскопические характеристики

экспериментального образца остались без изменений, а именно, отсутствовали деформация, оплавление, перфорация. Образец сохранял исходный вид и механическую прочность.

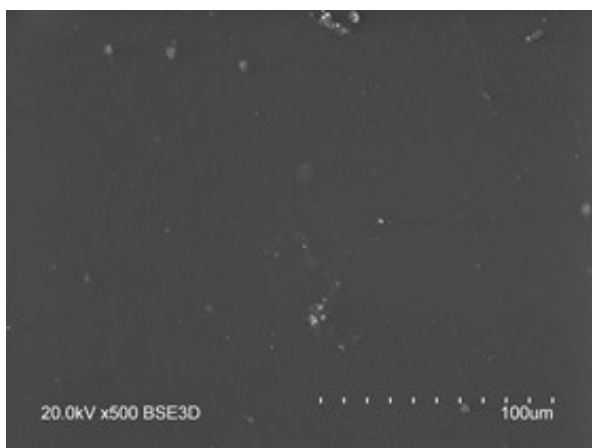


Рис. 6. РЭМ – изображение поверхности исходного образца полипропилена.

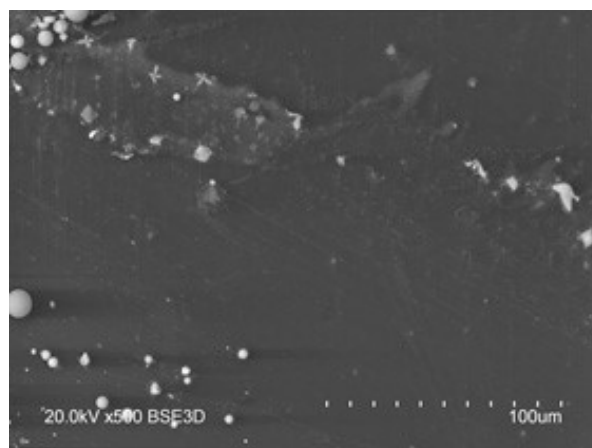


Рис. 7. РЭМ – изображение поверхности образца полипропилена после воздействия электронного пучка.

#### 4. Заключение

Источник ионов металлов на основе вакуумного дугового разряда, зарекомендовавший себя, как эффективный инструмент модификации поверхности полимерных материалов может также применяться в подобных процессах в режиме источника слаботочного низкоэнергетичного электронного пучка со стабильными параметрами в течение каждого импульса. Такой электронный пучок обеспечивает щадящий температурный режим мишени, о чем свидетельствуют результаты электронно-пучковой модификации поверхности тонкого листового полипропилена, при которой обеспечивалось сохранение внешнего вида и целостности обрабатываемого образца.

#### Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН, проект FWRM-2021-0006.

#### 5. Список литературы

- [1] E.M. Oks, “Plasma Sources for Axially Symmetric Electron Beams”, in *Plasma Cathode Electron Sources: Physics, Technology, Applications*, E. Oks, Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, Ch. 3, 59; doi:10.1002/9783527609413.ch3
- [2] A. Lendlein, M. Rehahn, M.R. Buchmeiser and R. Haag, *Polymers in Biomedicine and Electronics*, *Macromol. Rapid Commun.*, vol. **31**, 1487, 2010; doi:10.1002/marc.201000426
- [3] E.M. Oks, Physics and technique of plasma electron sources, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **1**, 249, 1992; doi: 10.1088/0963-0252/1/4/004
- [4] E.M. Oks and Ian G. Brown, Electron Beam Extraction from a Broad-Beam Vacuum-Arc Metal Plasma Source, *IEEE Transactions Plasma Sci.*, vol. **26**, 1562, 1998; doi: 10.1109/27.736062