

## ФИЗИКА

УДК 537.533;621.384

### РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ И ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

канд. техн. наук, доц. Д.А. АНТОНОВИЧ, д-р техн. наук, проф. В.А. ГРУЗДЕВ  
(Полоцкий государственный университет)

*Предложены основные результаты работы научного коллектива в области плазменной эмиссионной электроники Полоцкого государственного университета. Научные интересы в области корпускулярно-лучевых технологий включают широкий круг вопросов – от теоретических исследований особенностей формирования электронных пучков в плазменных структурах до создания отечественных электронно-лучевых энергокомплексов для реализации существующих и разработки новых электронно-лучевых технологий и внедрения полученных научных результатов в существующие производства в машино- и приборостроении. Показаны отличия электронно-оптических систем по типу используемого разряда, конструкции и области применения. Рассмотрены ключевые области теории плазменного эмиттера, которые были дополнены за счет теоретической и экспериментальной работы, выполненной в Полоцком государственном университете. Отмечены основные направления работы и наиболее значимые результаты, а также их место в общей теории и практике применения электронно-оптических систем с плазменным источником электронов.*

**Ключевые слова:** Плазменный источник электронов, электронно-оптические системы, плазменный эмиттер, разряд в скрещенных  $E \times H$  полях, системы электропитания плазменных источников электронов.

#### Введение.

Юбилейный для Полоцкого государственного университета (ПГУ) 2018 год оказался вдвойне юбилейным для группы сотрудников университета, присоединившихся к исследованиям международного масштаба в области создания эффективной технологической электронно-лучевой аппаратуры, альтернативной разработанной к тому времени (1993 год) аппаратуре на основе термоэмиссионных систем.

Настоятельная необходимость исследований в этой области была обусловлена двумя основными факторами. Во-первых, к этому времени уже начался переход от исследования возможностей электронно-лучевых технологий к широкому их внедрению в промышленность, где существенные требования предъявляются уже к технико-экономическим показателям, таким как производительность и долговечность электронно-лучевой аппаратуры. Во-вторых, вследствие специфических условий реализации электронно-лучевых технологий, в частности, давления газа не выше  $10^{-3}$  мм. рт. ст. и интенсивного испарения материала при электронно-лучевом воздействии, существенно ограничивали возможности достижения требуемых технико-экономических показателей электронно-лучевой аппаратуры на основе термоэмиссионных систем.

В качестве альтернативных электронно-оптическим системам (ЭОС) с термокатодами рассматривались ЭОС с плазменными образованиями. По совокупности физических процессов и принципов формирования электронного пучка ЭОС на основе плазменных образований в процессе их исследований разделились на три принципиально различающихся типа. В двух из них для формирования электронного пучка использовался высоковольтный тлеющий разряд (ВТР) с большим прикатодным или прианодным падением потенциала (до нескольких десятков киловольт), где осуществляется основное ускорение пучка электронов. Особенностью ЭОС с ВТР является существенная связь по давлению газа между пространством формирования электронного пучка (область ВТР) и пространством взаимодействия электронного пучка с обрабатываемым изделием (технологическая камера), что накладывает определенные ограничения на возможности применения ЭОС с ВТР.

Физическая модель ЭОС с использованием плазменных образований третьего типа существенно отличается от модели ЭОС с ВТР. В них пространства формирования электронного пучка и его технологического применения существенно разделены, что значительно снижает их взаимное влияние на параметры электронного пучка. В отличие от ЭОС с ВТР, где электронный пучок обеспечивается в основном ионно-электронной эмиссией с ненакаливаемого катода ВТР, в ЭОС третьего типа электронный пучок обеспечивается в основном плазменными электронами низковольтного (несколько сотен вольт) разряда, возбуждаемого обычно в небольшом объеме, отделенном от промежутка ускорения и первичного фор-

мирования пучка эмиссионным каналом (отверстием в одном из электродов разрядной камеры), диаметр и длина которого составляют величину порядка  $10^{-3}$  м. Такой эмиссионный канал обеспечивает значительный перепад давления плазмообразующего газа между разрядной камерой низковольтного разряда и промежутком ускорения электронов (примерно на порядок величины) при напуске плазмообразующего газа в разрядную камеру. Кроме этого, вследствие проникновения в эмиссионный канал с одной стороны плазмы низковольтного разряда, а с другой – электрического поля ускоряющего электрода, в эмиссионном канале обычно формируется граница плазмы, на которой напряженность электрического поля равна нулю. Такая граница обеспечивает свободный выход плазменных электронов в область ускоряющего поля (промежуток ускорения) и в то же время оказывает существенное влияние на конфигурацию эквипотенциальных поверхностей ускоряющего поля вблизи плазменной границы, что в значительной степени определяет электронно-оптические параметры формируемого пучка.

Кратко изложенная физическая модель процессов в электродной структуре с плазменным образованием третьего типа для формирования электронных пучков сложилась на основе исследований, выполненных к началу 90-х годов в Томском университете систем управления и радиоэлектроники и в Институте сильноточной электроники СО РАН (Россия, Томск). Она стала общепризнанной; привела к созданию ряда опытных образцов, получивших название ЭОС с плазменным эмиттером или плазменных источников электронов (ПИЭЛ) и доказавших их высокую перспективность для реализации электронно-лучевых технологий; оказалась наиболее эффективной для дальнейшего развития теории ПИЭЛ и создания новых, перспективных для развития электронно-лучевых технологий, конструкций ПИЭЛ.

Одной из разновидностей ПИЭЛ, востребованных развивающимися электронно-лучевыми технологиями, являются ПИЭЛ, формирующие пучки большого сечения (ПБС). В них для формирования эмиттирующей плазменной поверхности с площадью, обычно равной площади требуемого сечения ПБС (десятки и сотни квадратных сантиметров), используются мультисканальные сеточные или перфорированные отверстия электроды. При этом процессы в эмиссионных каналах ПИЭЛ с ПБС с небольшими особенностями подобны процессам, изложенным выше для ПИЭЛ, с одним эмиссионным каналом.

В 1993 году к исследованиям, связанным с дальнейшим развитием теоретических основ ПИЭЛ и разработкой опытных образцов для технологических целей, к указанным выше организациям в России присоединилась исследовательская группа Полоцкого государственного университета. *На основе которой была создана ведущая школа в области плазменной эмиссионной электроники*

При этом удалось достичь высокого уровня сотрудничества исследовательских групп: от выполнения совместных научно-исследовательских работ до обмена результатами собственных разработок и их взаимной оценки. Результаты, достигнутые сотрудниками ПГУ, кратко изложены ниже.

### **Развитие теоретического аспекта концепции ПИЭЛ.**

Общепринято, что плотность эмиссионного тока в ЭОС с плазменным эмиттером (ПИЭЛ) пропорциональна концентрации электронов в плазме. Поэтому одним из параметров генератора плазмы в ПИЭЛ является энергетическая эффективность, которая пропорциональна отношению концентрации электронов в плазме к энергии, затраченной на ее формирование. Ранее было показано, что высокую энергетическую эффективность обеспечивают различные модификации тлеющего разряда в скрещенных Е×Н полях с осцилляцией электронов, поступающих в разрядную структуру с катодов в результате вторичной ионно-электронной эмиссии и набирающих энергию в катодных падениях потенциала. Считалось, что эти электроны вносят основной вклад в ионизацию используемого в ПИЭЛ плазмообразующего газа. Однако исследования в ПГУ показали, что при достижении (с увеличением тока разряда) определенной концентрации плазменных электронов энергия электронов ионно-электронной эмиссии с катодов может эффективно передаваться плазменным электронам вследствие повышения их кулоновского взаимодействия. В результате ионизация газа высокоэнергетичной частью плазменных электронов может в два-три раза превышать, в условиях ПИЭЛ, интенсивность ионизации газа электронами с катодов генератора плазмы.

Установлена возможность реализации в ПИЭЛ третьего (дополнительного) механизма энерговклада в ионизационный процесс, проявляющийся в значительной мере в случае ограничения подвижности плазменных электронов в направлении эмиссионного канала магнитным полем (замагниченностью электронов плазмы) и при отборе (эмиссии) электронов из плазмы через эмиссионный канал. Причиной этого дополнительного энерговклада является возникновение в упомянутых условиях электрического поля с напряженностью порядка 1-2 В/см во всем объеме плазмы. Это поле повышает среднестатистическую энергию плазменных электронов, а также долю электронов, способных ионизовать газ.

Направление вектора напряженности электрического поля, возникающего в плазме, таково, что в плазме возникает дрейф плазменных электронов к эмиссионному каналу в дополнение к их диффузионному движению, реализуемому в случае эквипотенциальной плазмы. Этот фактор может при опреде-

ленных условиях существенно повысить эффективность извлечения электронов ( $\alpha$ ) из плазмы газового разряда в ПИЭЛ, которую принято характеризовать отношением тока пучка (эмиссии) к току разряда, формирующего плазму.

Значительный объем исследований понадобился для оптимизации условий формирования и функционирования эмитирующей границы (поверхности) плазмы в эмиссионном канале. Упомянутая исходная для дальнейшего совершенствования модель ПИЭЛ включала эмиссионный канал в одном из катодных электродов генератора плазмы, т.е. канал имел катодный потенциал его стенок. Особенности функционирования такого канала были исследованы ранее в достаточном объеме. Однако особенности функционирования двух других, как предполагалось принципиально отличающихся типов канала, не были изучены в достаточной степени: канал с потенциалом стенок, равным потенциалу анодных электродов генератора плазмы, а также канал в изолированном от систем электропитания ПИЭЛ электроде, помещенном в плазму. Потенциал стенок канала в изолированном электроде устанавливается автоматически таким, чтобы выполнялось условие равенства поступающих на него электронного и ионного токов из плазмы. Такой потенциал принято называть «плавающим» потенциалом. Основные результаты исследования эмиссионных каналов и влияние их на параметры ПИЭЛ кратко можно сформулировать следующим образом: при регулировании ускоряющего электроны пучка напряжения в ПИЭЛ эмиссионный канал с катодным потенциалом стенок обеспечивает наибольшую стабильность тока электронного пучка; канал с анодным потенциалом стенок обеспечивает наибольшую стабильность геометрических параметров пучка; канал с «плавающим» потенциалом стенок при совместном использовании с каналом с анодным потенциалом стенок в некоторых ПИЭЛ позволяет повысить эффективность извлечения электронов ( $\alpha$ ) из плазмы и повысить стабильность тока пучка.

Таким образом, в процессе экспериментального исследования физическая модель ПИЭЛ существенно дополнялась и усложнялась. Подвижность эмитирующей границы плазмы и изменение ее формы при регулировании ускоряющего напряжения, влияние на эти же факторы и ток пучка интенсивности ионизационных процессов в ускоряющем промежутке, возмущение эмитирующей плазмы отбором из нее электронов, а также ряд других факторов существенно усложнили экспериментальную оптимизацию ПИЭЛ в соответствии с требованиями к параметрам формируемого электронного пучка. В связи с этим возникла необходимость создания автоматизированной системы численного моделирования формирования электронного пучка конкретно для ПИЭЛ на базе обновленной физической модели. Такая система была успешно создана в ПГУ. В дополнение к ней была разработана автоматизированная система экспериментального измерения параметров формируемых ПИЭЛ электронных пучков распределения плотности тока в различных сечениях пучка. Указанный инструментарий позволил также обнаружить и раскрыть физическую сущность ранее неизвестных, но проявляющихся при определенных условиях в ПИЭЛ эффектов.

Обнаружена экспериментально и адекватно отражена численным моделированием возможность реализации в ПИЭЛ с ПБС двух отличающихся режимов работы расширителя плазмы: пассивного расширения плазмы, инжектируемой в расширитель; и режим «активного» расширителя, при котором основное влияние на параметры плазмы (эмитирующей) оказывают ионизационные процессы в самом расширителе. Режим «активного» расширителя возникает при определенном сочетании в нем давления газа и концентрации инжектируемой плазмы.

Часто при использовании ПИЭЛ с ПБС ускоряющим электроны пучка электродом является поверхность изделия, обрабатываемая электронным пучком. В этом случае при определенном сочетании давления в технологической камере и плотности тока в пучке возникает вторичная (пучковая) плазма у поверхности изделия. С повышением ускоряющего напряжения и тока пучка вторичная плазма расширяется в сторону «сетчатого» электрода, формирующего поверхность эмитирующей плазмы, а также является источником обратного ионного потока. Это существенно ослабляет электрическую прочность ускоряющего промежутка и дестабилизирует ток пучка. На основе численного моделирования разработан и впервые предложен способ двухсеточной стабилизации тока пучка в условиях работы ПИЭЛ с ПБС.

Численное моделирование формирования электронных пучков для электронно-лучевой сварки в ПИЭЛ с одиночным эмиссионным каналом показало, что при повышенном давлении в канале вблизи эмитирующей плазменной границы может возникать вторичная (пучковая) плазма, отделенная от эмитирующей плазмы электрическим слоем с разностью потенциалов порядка 100–200 В. Критическое давление газа, при котором возникают вторичная плазма и электрический слой, попадает в рабочий для ПИЭЛ диапазон давлений. Диапазон ускоряющего напряжения, при котором возникает такая структура электрического слоя, соответствует значениям, когда ускоряющее поле уже существенно проникает в эмиссионный канал, но напряженность поля еще не очень высока (порядка 10–15% рабочих значений напряженности для использованных в численном моделировании размеров ЭОС ПИЭЛ).

Численное моделирование также показало, что вторичная плазма не стационарна, а вследствие ионизационных процессов на ее границе, обращенной к границе эмитирующей плазмы, смещается вместе с электрическим слоем и границей эмитирующей плазмы вглубь эмиссионного канала, куда ускоряющее поле проникает слабо. В результате падение напряжения на электрическом слое уменьшается, интенсивность ионизации газа в нем также снижается, вторичная плазма разрушается, а граница эмитирующей плазмы возвращается в исходное состояние. Периодическое повторение этих процессов обеспечивает режим автоколебаний эмиссии электронов (при стационарных потенциалах электродов ПИЭЛ) с частотой около 1 МГц и глубиной модуляции 75–80%. С увеличением напряженности ускоряющего электрического поля устанавливается режим стационарной эмиссии.

Экспериментальное исследование формирования электронного пучка в ПИЭЛ с геометрией электродов и в условиях, подобных использованным для численного моделирования, подтвердили возможность практической реализации рассмотренных режимов эмиссии и в достаточной степени совпадающие в обоих случаях значения частоты и глубины модуляции эмиссионного тока в автоколебательном режиме.

#### **Опытно-конструкторские разработки.**

Разработан электронно-лучевой энергокомплекс для электронно-лучевой сварки с мощностью пучка до 10 кВт и диаметром пучка порядка 1–2 мм. В состав энергокомплекса вошли два опытных образца электронной пушки на основе различных ЭОС с плазменным эмиттером и оригинальная система их электропитания, обеспечивающая необходимое регулирование и стабилизацию тока пучка. Опытный образец энергокомплекса более двух лет эксплуатировался в лаборатории электронно-лучевой сварки Минского тракторного завода для сварки шестерен. Результаты эксплуатации практически в производственных условиях подтвердили возможность получения высококачественных непрерывных и прерывистых сварных соединений, достижения высокой долговечности (наработки на отказ), в десятки раз превышающей этот параметр применявшихся ранее термоэмиссионных электронных пушек, и повышения производительности электронно-лучевой установки.

Для электронно-лучевой термической обработки внутренних цилиндрических металлических поверхностей (закалки и оплавления микронеровностей), в частности, цилиндров двигателей внутреннего сгорания, разработан опытный образец электронной пушки, формирующей одновременно два электронных пучка. Электронные пучки с диаметром порядка 2–3 мм и плотностью мощности до  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> распространяются в диаметрально противоположных направлениях. Для реализации технологии электронно-лучевого воздействия опытный образец электронной пушки может погружаться в цилиндры с внутренним диаметром более 50 мм. При этом движение зоны воздействия пучков на обрабатываемую поверхность можно обеспечивать соответствующими движениями цилиндра или электронной пушки.

На международной выставке-ярмарке в Санкт-Петербурге (Россия) НИ-ТЕСН 2011 в рамках конкурса на лучший инновационный проект и лучшую научно-техническую разработку года эти опытные образцы были отмечены «Золотой медалью».

Разработаны опытные конструкции электронных и ионных источников, формирующих пучки большого сечения (от 30 до 100 мм диаметром). В Республиканском конкурсе этим образцам присуждена третья премия в номинации «Лучшая полезная модель» постановлением Президиума Республиканского Совета ВОИР 17.06.2002 г.

Упомянутые опытные образцы защищены авторскими свидетельствами на изобретения и патентами Республики Беларусь.

#### **Основные выполненные научно-исследовательские работы.**

За годы работы научным коллективом по данной тематике исследований было выполнено свыше 15 госбюджетных и хозяйственных работ. К основным можно отнести следующие:

1. Государственная программа фундаментальных и опытно-исследовательских работ «Плазмодинамика 02» (№ гос. регистрации 2002801) «Теоретические и экспериментальные исследования эффективности переключения электронного тока в плазменных источниках электронов с замагниченной эмитирующей плазмой» (2003 – 2005 гг.).

2. Государственная программа прикладных научных исследований «Материалы в технике», задание 1.36.2 (№ гос. регистрации 20072125) «Разработка процессов и технологических основ получения изделий из отходов тугоплавких металлов электронно-лучевым переплавом» (2007 – 2010 гг.).

3. Государственная программа научных исследований «Конвергенция», задание 2.4.03 (№ гос. регистрации 20111981) «Разработка принципов формирования электронных пучков с помощью плазменных образований» (2011 – 2013 гг.).

4. Государственная программа научных исследований «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы» подпрограмма «Материалы в технике», задание 4.3.03 (№ гос. регистрации 20111413) «Исследование и разработка технологических параметров получения модифицированных

поверхностных структур с целью упрочнения и повышения износостойкости инструмента и деталей машин» (2011 – 2013 гг.).

5. Совместный проект УО «ПГУ» и РУП «МТЗ», г. Минск (договор № 24396 от 01.11.04) «Разработка и изготовление опытного образца электронно-лучевой пушки с плазменным источником электронов» (2004 – 2008 гг.).

6. Проект по заданию инновационного фонда Министерства образования Республики Беларусь (договор № 05-54 от 17.04.10, № гос. регистрации 20102193) «Разработать опытный образец отечественного электронно-лучевого энергокомплекса на базе пушки с плазменным эмиттером» (2010 – 2012 гг.).

7. Совместный проект УО «ПГУ» и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (г. Новосибирск, Россия, договор № Ф10Р-219 от 01.05.10, № гос. регистрации 20101999) в рамках гранта БРФФИ и РФФИ «Вычислительные технологии решения задач анализа и синтеза электронно-оптических систем» (2010 – 2012 гг.).

8. Совместный проект УО «ПГУ» и ЗАО «Институт плазмохимических технологий», (г. Новосибирск, Россия, договор № 13155 от 10.04.2013) «Численное моделирование электронно-оптической системы электростатического формирования пучка и расчёт на его основе оптимальной геометрии электронно-оптической системы с целью повышения токопрохождения в пушке с плазменным эмиттером» (2013 г.).

9. Государственная программа научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Плазменные и пучковые технологии» (2016 – 2018 гг. № гос. регистрации 20160829 от 08.04.16).

10. Государственная программа научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Материалы в технике» (2016 – 2018 гг. № гос. регистрации 20160830 от 08.04.16).

#### **Публикационная, выставочная деятельность.**

За годы работы членами научного коллектива опубликовано свыше 100 научных и научно-методических публикаций среди которых 4 монографии; около 40 зарубежных научных статей; 4 патента на полезную модель и 1 патент на изобретение.

Разработки коллектива регулярно демонстрируются на международных выставках. Среди наиболее значимых можно выделить следующие:

- II, III, IV Международный Крейнделевский семинар по плазменной эмиссионной электронике, 2006, 2009, 2012, 2015, Улан-Уде, Россия;
- II, III, IV, V, VI International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology, 2001, 2003, 2006, 2009, 2012, 2015, Minsk, Belarus;
- VII, IX, X, XI, XII International Conference on Electron Beam Technologies, 2003, 2009, 2012, 2014, 2016, Varna, Bulgaria;
- Ганноверская международная промышленная ярмарка «HANNOVER MESSE», Ганновер, Германия, 2014, 2016;
- 18-я Международная промышленная выставка «Белпромэнерго», Минск, 2014;
- Международная выставка «Энергетика. Экология. Энергосбережение. Электро-2014», Минск, 2014;
- Вьетнамская международная торговая ярмарка «VIETNAM EXPO 2014», Хошимин, Вьетнам, 2014;
- Национальная выставка Республики Беларусь в Новосибирске, Россия, 2014;
- Белорусский промышленный форум, Минск, 2015, 2016, 2017;
- Вьетнамская международная торговая ярмарка «Вьетнам ЭКСПО-2016», Ханой, Вьетнам, 2016;
- Международная многопрофильная выставка «FACIM-2017», Мапуту, Мозамбик, 2017;
- Восточный экономический форум, Владивосток, Россия, 2017.

#### **Заключение.**

По результатам выполненных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области плазменной эмиссионной электроники сотрудниками ПГУ выполнены и защищены четыре кандидатские диссертации: Д.А. Антоновичем, Ю.П. Голубевым, В.Г. Залесским и О.Н. Петрович. Направление этой научной школы успешно развивается и уже нашло отражение в докторской диссертации В.Г. Залесского (2015). Большой вклад в работу научного коллектива внесли и сотрудники кафедры, в частности И.С. Русецкий и Д.Г. Руголь.