

# Плазменный источник электронов «СОЛО»

©Н.Н. Коваль, В.Н. Девятков, С.В. Григорьев, Н.С. Сочугов

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055, пр. Академический 2/3, Томск, Россия  
E-mail: koval@oree.hcei.tsc.ru

Рассмотрен электронный источник, генерирующий сильноточный низкоэнергетический пучок диаметром (1-3) см с током до 300 А, длительностью импульса (50-200) мкс и частотой их повторения до 10 Гц в газонаполненном диоде с сетчатым плазменным катодом при ускоряющем напряжении до 25 кВ. Пучок транспортируется в продольном импульсном магнитном поле на расстояние до 30 см в область его взаимодействия с твердым телом. При плотностях тока до 100 А/см<sup>2</sup>, пучок обеспечивает плотность мощности  $\sim 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, достаточную для плавления поверхностей металлов и композиционных материалов в течение одного или нескольких импульсов. Это позволяет использовать пучок в экспериментах по пучково-импульсной модификации поверхности материалов и изделий с целью улучшения их физико-механических и эксплуатационных свойств.

## Введение

Концентрированные потоки энергии в виде электронных пучков с высокой плотностью мощности достаточно широко используются в различных технологических процессах, таких как сварка ответственных изделий, переплавка тугоплавких и химически активных металлов и модификация поверхности в результате быстрого нагрева и охлаждения поверхностного слоя [1-7]. При создании нового оборудования для импульсной электронно – пучковой обработки поверхности материалов сильноточным низкоэнергетическим пучком необходимо решить ряд физико-технических проблем связанных с эмиссией электронов, формированием и транспортировкой электронного пучка. Для максимальной реализации технологических возможностей электронного источника необходимо решить и ряд технических проблем при создании специализированных блоков его электропитания. Описываемый электронный источник с сетчатым плазменным катодом создан на основе источника для обработки поверхности металлов [8-10], отличаясь улучшенными параметрами и более широкими возможностями, благодаря использованию модернизированной разрядной ячейки и нового автоматизированного блока электропитания и управления.

## 1. Конструкция плазменного источника электронов, принцип работы, схемы электропитания и управления.

Конструкция электронного источника на основе плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы плазмы приведена на рис. 1. Газоразрядная система плазменного эмиттера состоит из двух взаимосвязанных систем. Первая система, образованная полым электродом 1 и катодом 3, составляет систему иницирующего разряда, функционирующего при относительно высоком ( $\sim 1$  Па) давлении в течение относительно короткого (до 25 мкс) промежутка времени. Для снижения напряжения зажигания иницирующего разряда при низком давлении цилиндрический электрод 1 с внутренним диаметром 10 мм и длиной 50 мм помещен в магнитное поле с индукцией 0,1 Тл постоянных кольцевых магнитов 2. При включении транзисторного ключа ТК1, к первичной обмотке высоковольтного разделительного трансформатора TR1 через балластное сопротивление R1 подключается блок накопительных емкостей, выбранных таким образом, чтобы за время формирования импульсов разрядных токов напряжение на них изменялось незначительно. Иницирующий разряд зажигается первоначально в тлеющем режиме при подаче со вторичной обмотки TR1 импульса напряжения с амплитудой около 12 кВ. Длительность импульса тока иницирующего разряда, имеющего амплитуду (10-15) А, определяется временем от-

крытого состояния ключа ТК1 и составляет около 25 мкс. Через (10-15) мкс после подачи напряжения на инициирующий разряд производится подача напряжения на основную разрядную систему. Основной дуговой разряд с регулируемой длительностью (50-200) мкс, определяемой временем открытого состояния ключа ТК2, зажигается между электродом 3 и полым анодом 6 через контрагирующий канал 5 в электроде 3 с последующим переключением разряда на сетчатый эмиссионный электрод 7. Устойчивое зажигание основного разряда, даже при относительно низком приложенном напряжении ( $\geq 100$  В), определяется наличием плазмы, созданной инициирующим разрядом и выбором полярности напряжения на первой разрядной системе при которой электрод 3 выполняет роль полого катода как для инициирующего, так и для основного разряда. Устойчивое зажигание и горение основного разряда в дуговой форме определяется наличием магниевого электрода 4, на котором функционирует катодное пятно. Регулировка тока основного разряда осуществляется за счет наличия балластного сопротивления R2 и изменения напряжения на блоке накопительных конденсаторов, заряжаемых от регулируемого стабилизатора напряжения SU. Для создания перепада давлений между двумя разрядными системами, служащего

для облегчения зажигания инициирующего разряда и снижения давления в ускоряющем промежутке, связь между ними осуществляется через малый, диаметром 6 мм контрагирующий канал 5. Электрод 7 имеющий эмиссионное отверстие диаметром (40-50) мм, затянутое мелкоструктурной эмиссионной сеткой с прозрачностью (50-60) %, установлен на торце полого анода диаметром 80 мм и длиной 100 мм. Электрод 6 соединен с эмиссионным электродом 7 через сопротивление  $R_a = (10-100)$  Ом.

Высокое постоянное напряжение (5-25) кВ прикладывается между электродом 7 и ускоряющим электродом 8, расположенным от него на расстоянии (8-10) мм и выполненным в виде диафрагмы диаметром 80 мм. Источник высокого напряжения, обеспечивает режим работы с частичным разрядом накопительной емкости  $C_{HV}$ . Под действием постоянного ускоряющего напряжения происходит извлечение электронов из плазмы через ячейки сетки и ускорение их до энергии, соответствующей приложенному напряжению. Номинал емкости  $C_{HV}$  выбирается таким образом, чтобы уменьшение напряжения на ней при формировании импульса тока пучка, не превышало нескольких процентов. Это позволяет генерировать пучок с малым энергетическим разбросом электронов.

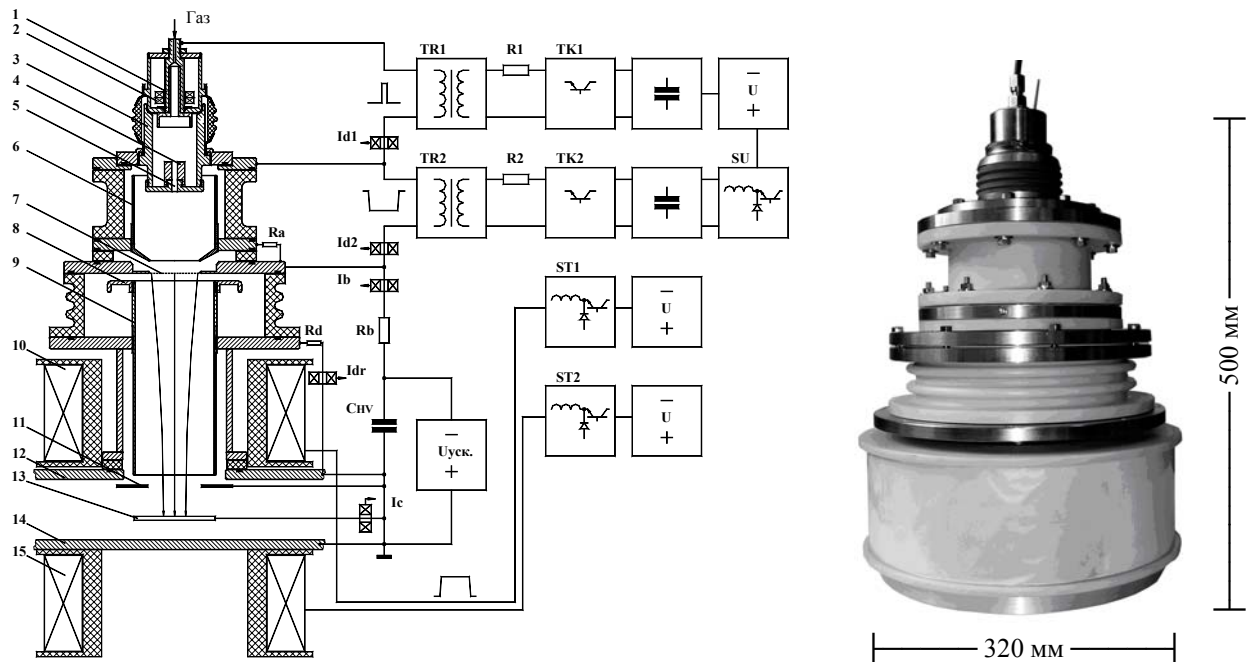


Рис. 1. Конструкция и внешний вид электронного источника с плазменным эмиттером.

Сетка формирует и стабилизирует границу плазмы, позволяя получать пучок с относительно однородным распределением плотности эмиссионного тока. Извлеченные из катодной плазмы и ускоренные электроны производят ионизацию газа в ускоряющей промежутке и пространстве дрейфа. Плазма, возникающая в дрейфовой трубе в результате ионизации газа электронным пучком, приобретает потенциал близкий к потенциалу анода. Таким образом, в газонаполненном диоде через некоторое время  $\tau = (3 \div 5)$  мкс реализуется система, состоящая из катодной плазменной эмиссионной поверхности, стабилизированной сеткой, и плазменного анода с подвижной плазменной границей, которая устанавливается в соответствии с законом “степени трех вторых” для ионного тока в ускоряющей промежутке. Эмитированные плазменным катодом электроны ускоряются в слое между катодной и анодной плазмами и попадают в пространство дрейфа, где происходит компенсация пространственного заряда пучка ионами, образовавшимися в результате ионизации газа.

В условиях компенсации пространственного заряда пучка может происходить его сжатие собственным магнитным полем. Для стабилизации электронного пучка в ускоряющей промежутке и дрейфовом пространстве, вся система помещена в продольное магнитное поле, создаваемое импульсными магнитными катушками. Катушки расположены на верхней 12 (катушка 10) и нижней 14 стенках (катушка 15) вакуумной камеры вне откачиваемого объема рабочей камеры и создают продольное магнитное поле величиной до  $B = 0,05$  Тл в области формирования и транспортировки электронного пучка. До момента ввода в рабочую камеру пучок транспортируется в металлической трубе дрейфа 9 диаметром 82 мм и длиной 200 мм, в цепь которой может включаться дополнительное сопротивление  $R_d = (0-2)$  Ом. На торце трубы 9 может быть установлена диафрагма 11, за которой располагается коллектор 13. Диагностика импульсных токов электронного источника осуществляется с помощью поясов Роговского, установленных в соответствующих цепях электронного источника.

Одной из проблем возникающей при создании системы транспортирующего магнитного поля является проблема возможного пе-

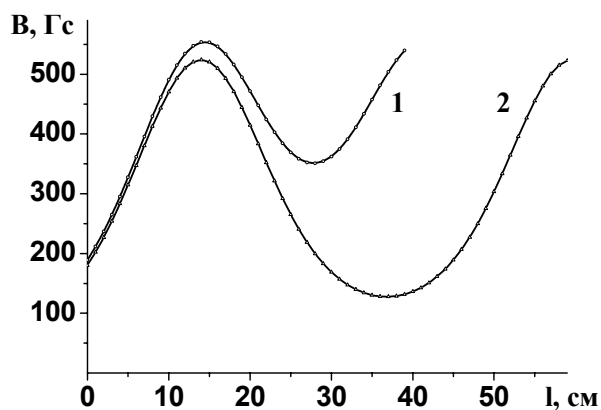
регрева магнитных катушек. Использование импульсного питания катушек магнитного поля от управляемых стабилизированных источников тока ST1, ST2 позволило устранить нагрев соленоидов и увеличить максимальное значения магнитного поля по сравнению с вариантом питания соленоидов постоянным током. Так как источники ST1, ST2 включаются до подачи напряжений на разрядную систему, то в момент генерации тока электронного пучка магнитное поле уже достигает установленного значения и остается практически неизменным в течение всего импульса тока пучка.

Использование в схемах питания разрядов и магнитного поля в качестве коммутирующих элементов IGBT-транзисторов позволяет оперативно и в широких пределах изменять амплитуду разрядного тока (и таким образом регулировать ток электронного пучка) и управлять транспортирующим магнитным полем варьировать диаметр пучка. Таким образом, разработанные принципы и методы управления электропитанием позволяют максимально реализовать основные достоинства источника на основе плазменного эмиттера с сетчатой стабилизацией эмиссионной границы – возможность в широком диапазоне и независимо изменять длительность импульсов тока пучка без механических переключений элементов схемы блоков электропитания, ток пучка, энергию ускоренных электронов и частоту следования импульсов.

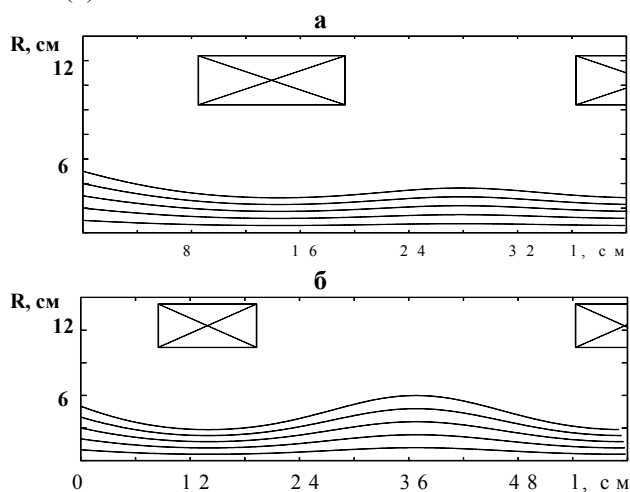
## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Электронный пучок транспортируется в аксиальном магнитном поле при давлении рабочего газа Ar в вакуумной камере  $p = (10^{-2}-10^{-1})$  Па. На рис. 2 приведено расчетное распределение магнитного поля  $B$  вдоль оси системы, а на рис. 3 картины силовых линий магнитного поля. Расстояние между магнитными катушками составляет  $L = 17$  см (1) и  $L = 35$  см (2).

Электроны, извлекаемые с эмиссионной границы плазмы, стабилизированной сеткой, входят в нарастающее магнитное поле, а затем транспортируются в продольном магнитном поле. Если расстояние между магнитными катушками  $L \leq 17$  см сформированный пучок транспортируется в области относительно од-



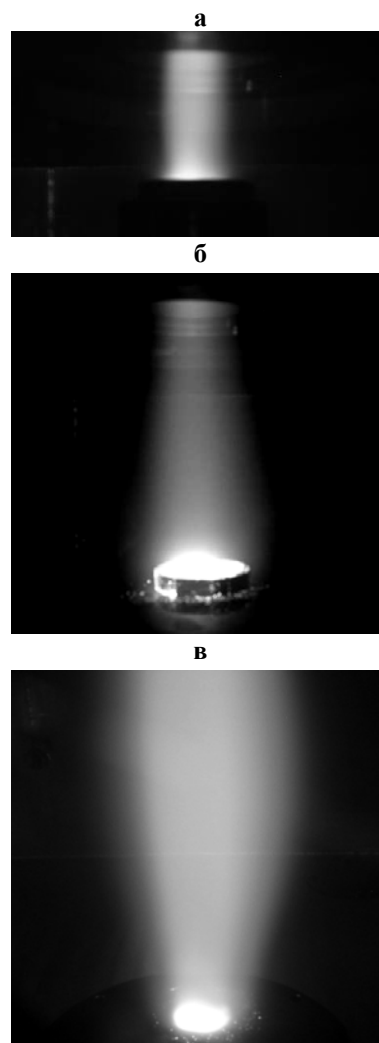
**Рис. 2.** Распределение магнитного поля вдоль оси электронного источника и в пространстве транспортировки пучка при расстоянии между катушками 17 см (1) и 35 см (2).



**Рис. 3.** Силовые линии магнитного поля при расстоянии между соленоидами 17 см (а) и 35 см (б). Координата  $l=0$  см соответствует положению эмиссионной сетки.

нородного поля, лишь незначительно изменяя свой диаметр. При увеличении расстояния между магнитными катушками пучок начинает увеличивать свой диаметр, а затем происходит повторная его фокусировка. Таким образом, изменяя соотношение токов в магнитных катушках и расстояние до коллектора можно регулировать диаметр пучка и, соответственно, плотность энергии на коллекторе.

При использовании близко расположенных магнитных катушек можно получить более однородное распределение тока на коллекторе, а расположение коллектора в области расходящегося магнитного поля (при увеличенном до 35 см расстоянии между магнитными катушками) позволяет увеличить диаметр пучка, попадающего на коллектор.



**Рис. 4.** Внешний вид пучка в камере. Коллектор расположен на расстоянии 4 см (а), 14 см (б), 33 см (в) от среза трубы дрейфа.

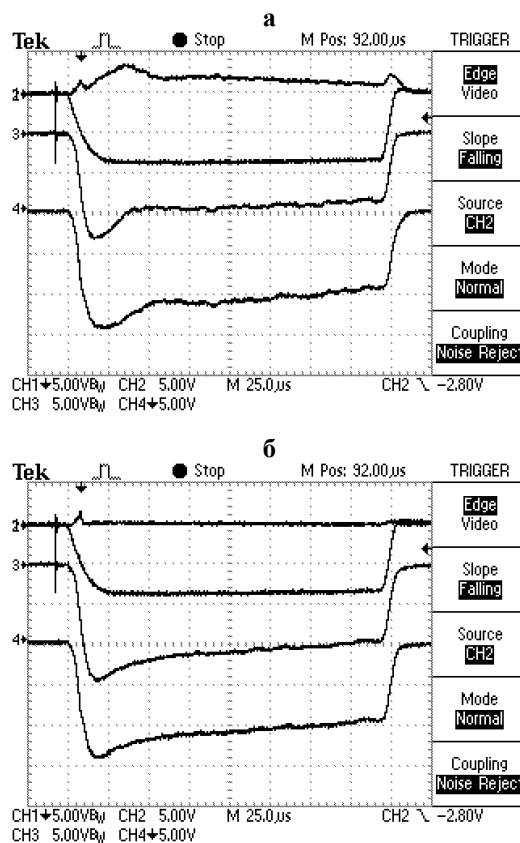
Фотографии пучка, транспортируемого в системе с соленоидами, расположенными на расстоянии 35 см друг от друга, приведены на рис. 4.

Транспортировка сильноточного низкоэнергетического пучка осуществляется в плазме, образующейся при ионизации газа электронным пучком при условии компенсации пространственного заряда пучка ионами. Форма эмиссионного тока и тока на коллектор при наличии в диоде плотной плазмы зависит от режима работы электронного источника: амплитуды эмиссионного тока, ускоряющего напряжения, величины магнитного поля, рода и давления рабочего газа и от процессов, происходящих при взаимодействии электронного пучка с коллектором. На коллектор поступают кроме электронов пучка с высокой энергией еще низкоэнергетичные плазменные электро-

ны. Часть ионов, образовавшихся в пространстве дрейфа в результате ионизации газа электронным пучком, в свою очередь, уходит на эмиссионную сетку и через ее ячейки попадает в катодную плазму. Образующиеся при расплавлении поверхности коллектора пары также ионизуются, что приводит к изменению параметров плазмы в канале транспортировки электронного пучка, а, соответственно, и режимов извлечения электронов из плазменного катода и формирования пучка.

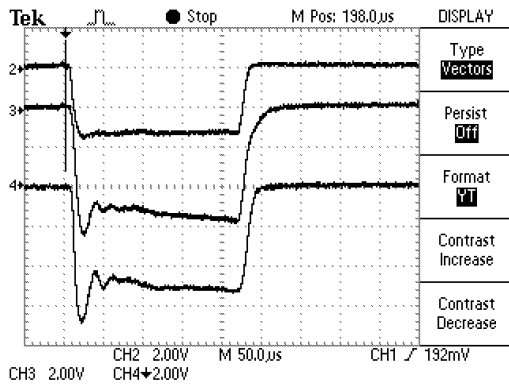
На рис. 5 представлены осциллограммы токов  $I_{dr}$ ,  $I_{d2}$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  при отсутствии (а) и при установке сопротивления  $R_{dr}$  величиной 2 Ом в цепи трубы дрейфа (б). Включение даже относительно небольших сопротивлений в цепи электродов системы транспортировки пучка, ведет к изменению амплитуды и формы импульсов тока в них. Например, установка сопротивления в цепь коллектора приводит к тому, что появляющееся на коллекторе относительно заземленных электродов небольшое отрицательное напряжение приводит к возникновению токов по приколлекторной плазме и регистрируемый во внешней цепи коллектора ток падает практически до нуля, хотя на коллектор попадают ускоренные высокоэнергетичные электроны, вызывая оплавление его поверхности. Кроме того, измеряемый в цепи плазменного катода ток пучка является суммой электронного тока эмиссии и тока ионов, приходящих на эмиссионную сетку из ускоряющего промежутка, что вносит ошибку при расчете энергии, выделяемой на коллекторе электронами пучка, исходя из осциллограмм импульса тока в цепи коллектора и величины ускоряющего напряжения.

На рис. 6 представлены характерные осциллограммы тока разряда (2), тока эмиссии (3) и тока коллектора (4), когда ток пучка значительно превосходит ток разряда. Этот режим достигается, прежде всего, за счет роста давления при увеличении расхода рабочего газа. Так как напуск газа производится в электронный источник, то давление газа в области эмиссионной сетки  $p_g$  выше, чем давление  $p$  в вакуумной камере. Так при  $p=3 \cdot 10^{-4}$  Тор,  $p_g=1.4 \cdot 10^{-3}$  Тор, а при наличии диафрагмы на трубе дрейфа с отверстием 40 мм  $p=3 \cdot 10^{-4}$  Тор,  $p_g=2 \cdot 10^{-3}$  Тор.

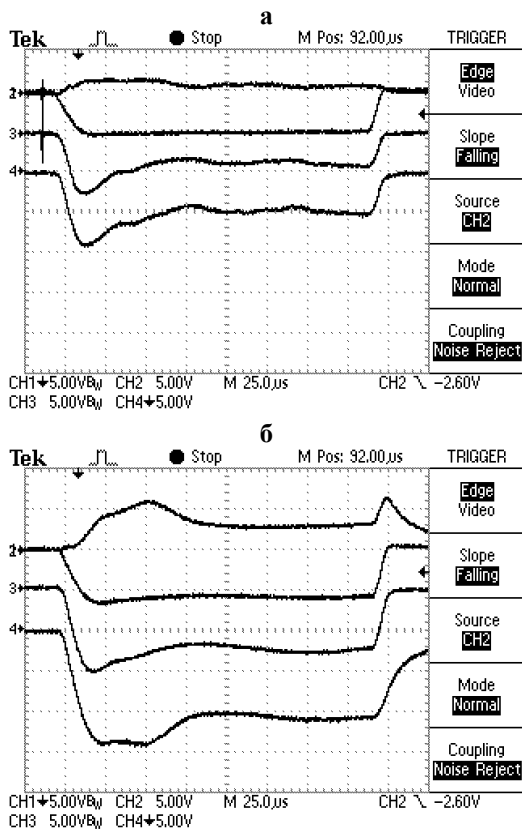


**Рис. 5.** Осциллограммы импульсов тока в цепях трубы дрейфа  $I_{dr}$  (1), основного разряда  $I_{d2}$  (2), эмиссионного электрода  $I_b$  (3) и коллектора  $I_c$  (4).  $U_{yck}=15$  кВ,  $V=200$  Гс,  $p=3 \cdot 10^{-4}$  Тор,  $R_{dr}=0$  (а) и  $R_{dr}=2$  Ом (б). Чувствительность: 100 А/дел, развертка: 25 мкс/дел.

Увеличение магнитного поля также приводит к увеличению тока эмиссии за счет улучшения условий ионизации газа. Появление дополнительных ионов, идущих на эмиссионную сетку и в полый анод разрядной системы, приводит к дополнительной эмиссии электронов с плазменного катода. Наложение магнитного поля препятствует сжатию (шнурованию) электронного пучка, что позволяет несколько увеличить ток пучка без развития пробоя ускоряющего промежутка. Однако относительно сильное ( $B \geq 0.05$  Тл) магнитное поле может отрицательно влиять на разряд, генерирующий эмиссионную плазму, т.к. приводит к горению разряда не на всю эмиссионную сетку, а лишь вдоль силовых линий на ее центральную часть. Форма эмиссионного тока в режиме, когда ток пучка превышает ток разряда, не соответствует форме тока основного разряда, хотя ток разряда продолжает определять амплитуду эмиссионного тока.



**Рис. 6.** Характерные осциллограммы тока разряда (2), тока эмиссии (3) и тока коллектора (4).  $U_{\text{уск}}=15$  кВ,  $p=2.0 \cdot 10^{-4}$  Тор,  $B=0.04$  Тл. Чувствительность: 40 А/дел, развертка: 50 мкс/дел.

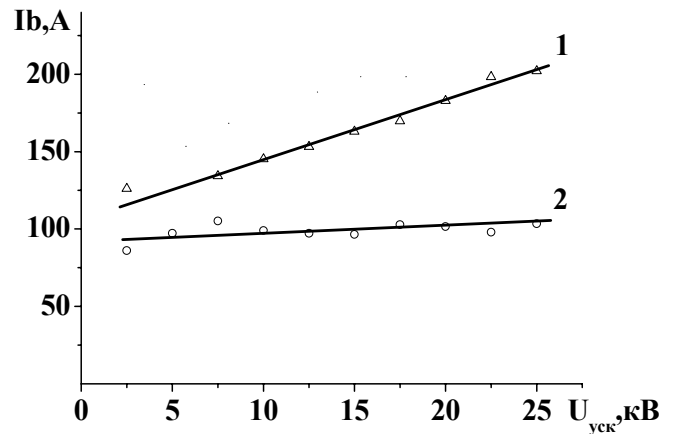


**Рис. 7.** Характерные осциллограммы импульсов тока в цепях трубы дрейфа (1), тока разряда (2), эмиссионного электрода (3) и коллектора (4) при давлении  $3 \cdot 10^{-4}$  Тор (а) и  $6 \cdot 10^{-4}$  Тор (б),  $U_{\text{уск}}=15$  кВ,  $B=0.04$  Тл. Медный коллектор диаметром 60 мм расположен на расстоянии 112 мм от среза трубы дрейфа. Чувствительность: 100 А/дел, развертка: 25 мкс/дел.

Рис. 7 демонстрирует влияние давления на токи, регистрируемые в системе. Повышенное давление приводит к более интенсивной ионизации газа и на трубу дрейфа поступает относительно большой ионный ток. При этом общий ток пучка и ток в цепи коллектора также увеличиваются, превышая, при некоторых ус-

ловиях, ток разряда.

На рис. 8 представлены вольтамперные характеристики рассматриваемого электронного источника. Если установлен коллектор из тугоплавкого металла, который под действием пучка слабо “газит” и его поверхность не плавится с образованием паров, используется слабое ( $B \leq 0.02$  Тл) магнитное поле и низкое ( $p \leq 2 \cdot 10^{-4}$  Тор) рабочее давление, то в этом случае вольтамперная характеристика электронного источника имеет форму, характерную для плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы, а именно эмиссионный ток определяется током разряда и слабо зависит от ускоряющего напряжения. Увеличение давления и магнитного поля приводит к нарастанию плотности плазмы в пространстве транспортировки и к более сильной зависимости тока пучка от ускоряющего напряжения. При неизменном токе разряда повышение давления и магнитного поля приводят к росту тока эмиссии. Максимальное значение эмиссионного тока ограничивается появлением катодного пятна на сетке, ограничивающей границу эмиссионной плазмы и возникновением при этом электрического пробоя ускоряющего промежутка.



**Рис. 8.** Зависимости эмиссионного тока  $I_b$  от ускоряющего напряжения  $U_{\text{уск}}$ .  $I_d=100$  А,  $p=3 \cdot 10^{-4}$  Тор,  $B=400$  Гс (1);  $p=3 \cdot 10^{-4}$  Тор,  $B=200$  Гс (2).

Учитывая вышеописанные трудности с определением энергии, выделяющейся на коллекторе на основе осциллограмм тока и напряжения, для ее оценки дополнительно использовался калориметрический метод. В экспериментах было проведено сравнение значений энергии, полученных с помощью калори-

метра и рассчитанных по осциллограммам тока на калориметр и осциллограммам ускоряющего напряжения. Измерения подтвердили предположения о том, что расчет по осциллограммам может давать завышенные значения энергии. Измеренные калориметром значения энергии электронного пучка составляли 0.5-0.7 от значений, полученных расчетным путем.

## Заключение

Разработанный, созданный и исследованный в данной работе электронный источник формирует электронный пучок диаметром (1-3) см, с энергией электронов (5-25) кВ, регулируемой длительностью импульсов тока (50-200) мкс и плотностью энергии до (50-100) Дж/см<sup>2</sup>, что позволяет использовать его для импульсной поверхностной термообработки поверхности материалов и изделий. Работая на частотах до 10 Гц, электронный источник, имея достаточно большую среднюю мощность в этом режиме, способен кроме импульсной обработки поверхности проводить предварительный объемный нагрев деталей, что позволяет повысить качество поверхностной обработки для ряда обрабатываемых материалов.

Проведенные эксперименты показали возможность формирования и транспортировки электронного пучка при использовании магнитной системы с катушками, расположенными на значительном расстоянии (до 35 см) друг от друга, что позволяет эксплуатировать электронный источник на вакуумных камерах разной высоты.

Источник электронов на основе плазмонаполненного диода может работать в режиме с током эмиссии, превышающим ток разряда, используемого для создания эмиссионной плазмы. Рост эмиссионного тока в этом режиме приводит к увеличению энергии пучка, позволяет повысить эффективность работы источника и реализовать новые режимы генерации пучка имеющие, например, такие положительные моменты, как более однородное распределение тока на коллекторе.

Проведенные калориметрические измерения энергии пучка показали необходимость введения поправки при расчетах энергии, выделяемой на коллекторе, по осциллограммам тока коллектора и ускоряющего напряжения. При

таких расчетах требуется вводить поправку с коэффициентом 0.5-0.7. Это связано, вероятно, с некорректностью измерений тока пучка, вследствие не учета плазменных электронов и обратного тока ионов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (Грант № 05-02-98007-р\_объ\_а «Фундаментальное исследование процессов формирования неравновесного состояния в приповерхностных слоях металлокерамических материалов инструментального назначения при их электронном облучении» (2005-2007)).

## Список литературы

- [1] Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. Круглый год. М. 2001. 528 с.
- [2] Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials. // Vacuum. 2001. Vol. 62. pp. 211-216.
- [3] Engelko V.I., Kuznetsov V.S., Kuryshev V.O., G.Mueller and Vyazmenova G.A. Electron source for producing radial converging electron beam, in: Proc. 7<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, July 25-29, 2004, Tomsk, Russia, pp. 13-15.
- [4] Mueller G., Engelko V., Weisenburger A., Heinzel A. Surface alloying by pulsed intense electron beams. // Vacuum, 2005. Vol. 77. pp. 469-474.
- [5] Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.B. Production and application of low-energy high-current electron beams // Laser and Particle Beams, 2003, Vol. 21, no. 2. pp. 157-173.
- [6] Rotshtein V.P., Proskurovsky D.I., Ozur G.E., Ivanov Yu.F., Markov A.B. Surface modification and alloying of metallic materials with low-energy high-current electron beams // Surface and Coatings Technology. 2004, Vol. 180-181. pp. 377-381.
- [7] Ozur G.E., Proskurovsky D.I. and Karlik K.V., Pulsed electron-beam facility with improved purity of the treatment process, in: Proc. 7<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, July 25-29.2004.Tomsk, Russia,pp. 20-23.
- [8] Devjatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoriev V.P., and Koval T.V. Generation and propagation of high-current low-energy electron beam. // Laser and Particle Beams. 2003. №21. pp.243-248.
- [9] Koval N.N., Schanin P.M., Devjatkov V.N., Tolkachev V.S. Vintizenko L.G. Installation for Treatment of Metal Surfaces by Low Energy Electron Beam, in: Proc. 7<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. July 25-29. 2004. Tomsk. Russia. pp. 43-46.
- [10] Коваль Н.Н., Щанин П.М., Винтизенко Л.Г., Толкачев В.С. Установка для обработки поверхности металлов электронным пучком. // ПТЭ. 2005. №1. с. 135-140.