

# Формирование интенсивного электронного пучка в мультиапертурном источнике с плазменным эмиттером и его транспортировка в магнитном поле пробочной конфигурации

И. В. Кандауров<sup>1</sup>, В. В. Куркучев<sup>2</sup>, Ю. А. Трунев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090 Россия, Новосибирск  
e-mail: i.v.kandaurov@inp.nsk.su

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090 Россия, Новосибирск

Представляются результаты экспериментального исследования транспортировки в нарастающем магнитном поле интенсивного длинноимпульсного электронного пучка, сгенерированного в источнике с дуговым плазменным эмиттером и мультиапертурной электродной системой. Продемонстрировано проведение (практически без потерь тока) пучка сквозь магнитную пробку с максимальным полем до 2 Тл и величиной пробочного отношения более 50, при длительности импульса пучка более 200 мкс. Оценка угловых характеристик пучка, вытекающая из результатов экспериментов, согласуется с оценкой, полученной с помощью численного моделирования. Обсуждаются причины, ограничивающие максимально достижимую в экспериментах величину пробочного отношения.

## Введение

На протяжении ряда лет в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН ведутся работы по созданию источников мощных электронных пучков большой длительности, предназначенных для нагрева электронной компоненты и улучшения удержания плазмы в открытых ловушках. В последнее время актуальность работ в этой области возросла в связи с интересом к использованию линейных плазменных систем для изучения воздействия потока плазмы на поверхность различных материалов в рамках программы ITER (см. [1]). Применительно к названным задачам, можно сформулировать следующие требования к параметрам пучка: длительность импульса до 1 мс, энергия электронов 50–100 кэВ, полный ток пучка до 1 кА. Предполагается, что такой пучок с умеренной плотностью тока эмиссии будет формироваться в относительно слабом магнитном поле ( $\sim 10^{-2}$ – $10^{-1}$  Тл) и затем транспортироваться в адиабатически нарастающем поле в плазменную камеру установки. Коэффициент компрессии пучка составит величину  $\sim 100$  при величине магнитного поля в камере установки масштаба нескольких Тесла. Такая схема инжекции позволяет достичь высокой плотности тока пучка в экспериментальной камере, а также снижает плотность приходящего на инжектор из плазмы обратного потока ионов. С другой сторо-

ны, инжекция пучка в сильную магнитную пробку требует, чтобы электроны на выходе электронно-оптической системы (ЭОС) инжектора имели достаточно малый угол между вектором скорости и направлением магнитного поля (питч-угол).

Для реализации пучка с названными выше параметрами был выбран подход, основанный на использовании плазменного эмиттера электронов и мультиапертурной ЭОС. Такое решение представляется обоснованным, поскольку использование плазменного эмиттера позволяет получать пучки с большими поперечными размерами и большим током, избегая при этом ряда инженерных проблем, присущих конструкциям с термоэмиссионным катодом. Кроме того, плазмоэмиссионный источник может работать при относительно высоком давлении остаточного газа  $P \sim 2 \times 10^{-2}$  Па, что представляется важным с точки зрения использования в плазменных установках. Применение мультиапертурных ЭОС, по сравнению с источниками с плазменным анодом и мелкоячеистой катодной сеткой [2], предоставляет больше возможностей для управления оптикой пучка и делает источник менее зависимым от параметров плазмы и газа в заанодном пространстве.

Мультиапертурные ЭОС с электродами в виде плоских «решеток» с круглыми отверстиями диаметром в несколько миллиметров успешно использовались и ранее для получе-

ния интенсивных электронных пучков в источниках с плазменным катодом [3, 4]. В работе [3] были достигнуты выдающиеся параметры пучка, но в отсутствие внешнего магнитного поля.

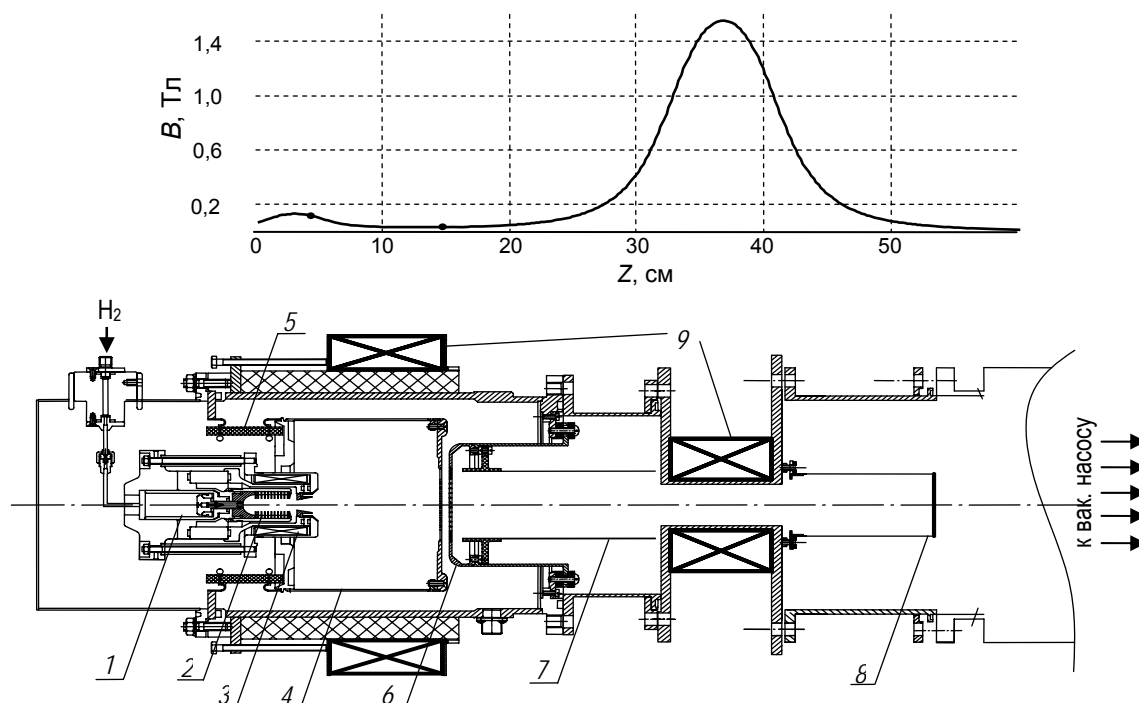
В настоящей работе экспериментально исследовалась транспортировка сквозь магнитную пробку интенсивного длинноимпульсного электронного пучка, сгенерированного в мультиапертурном диоде с плазменным катодом.

### Описание экспериментальной установки

Устройство экспериментальной установки схематично изображено на рис. 1. Плазменный эмиттер создавался импульсным газовым дуговым разрядом с холодным катодом. По своей конструкции генератор дуги сходен с ранее использовавшимися в ионных источниках разработки ИЯФ СО РАН [5, 6].

Рабочий газ ( $H_2$ ) напускался импульсным клапаном 1 через отверстие в центре алюминиевого катода в дуговой канал 2, образованный набором изолированных друг от друга медных шайб. Шайбы находились под плавающим потенциалом. Высота набора составляла 25 мм, диаметр центрального отвер-

стия возрастал от 10 до 15 мм. С помощью катушки магнитной изоляции 3 в дуговом канале создавалось магнитное поле величиной около 0,1 Тл, стабилизирующее дуговой разряд. Анод разряда (экспандер плазмы) 4 был выполнен в виде полого цилиндра из нержавеющей стали диаметром 170 мм и высотой 100 мм. Плоский торец цилиндра, противоположный дуговому каналу, являлся эмиссионным электродом (катодом ЭОС). В его центре была запрессована молибденовая вставка толщиной 1,5 мм со 121 эмиссионным отверстием диаметром 2,4 мм. Экспандер плазмы вместе с генератором дуги монтировался на высоковольтном керамическом изоляторе 5. Анодные отверстия ЭОС диаметром 4 мм также были выполнены в молибденовой вставке толщиной 2 мм, запрессованной в анодный электрод 6 из нержавеющей стали и расположены соосно с катодными. Анод соединялся с корпусом установки, находившимся под земляным потенциалом, низкоомным малоиндуктивным шунтом. Зазор между плоскостями катода и анода составлял 7,5 мм. Мультиапертурная ЭОС в сборе показана на рис. 2.



**Рис. 1.** Схематический вид установки и типичная картина распределения магнитного поля на оси: 1 – импульсный клапан; 2 – дуговой канал; 3 – катушка магнитной изоляции дуги; 4 – экспандер (полый анод) дугового разряда; 5 – керамический изолятор; 6 – анод диода; 7 – труба дрейфа; 8 – цилиндр Фарадея; 9 – катушки магнитного поля. На кривой магнитного поля точками указаны местоположения выхода канала дуги и эмиссионного электрода (катода диода), начало координат соответствует местоположению катода дуги



**Рис. 2.** Мультиапертурная диодная ЭОС – вид со стороны трубы дрейфа (на снимке убрана)

*Сценарий работы источника пучка.* Напуск водорода клапаном составлял до  $2 \times 10^{18}$  молекул за импульс (длительностью не более 500 мкс). Дуговой разряд поджигался с задержкой 350 мкс от начала подачи импульса тока на клапан. За это время большая часть газа еще не успевала выйти из внутреннего объема генератора дуги, так что имел место перепад давления на 3–4 порядка величины между дуговым каналом и экспандером. Питание дуги осуществлялось от емкостного накопителя через балластное сопротивление. Включение и выключение разряда производилось IGBT-ключом. Ток дуги регулировался в пределах от десятков до сотен ампер изменением напряжения зарядки накопителя и величины балластного сопротивления.

Во время дугового разряда в канале генератора дуги образуется плазма с плотностью  $\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и с электронной температурой 5–10 эВ. Ток разряда течет на торец полого анода, где происходит извлечение эмиссионных электронов через катодные отверстия в режиме открытой плазменной границы. Магнитное поле в экспандере дуги имело расходящуюся конфигурацию (от дугового канала к эмиссионному электроду). В зазоре диода магнитное поле было в достаточной степени однородным.

Импульс напряжения квазипрямоугольной формы длительностью 300 мкс и амплитудой до 32 кВ подавался на экспандер от высоковольтного модулятора на основе формирующей линии и повышающего трансформа-

тора. Защита ЭОС при пробое осуществлялась тиристорной крестовидной цепью.

Магнитное поле в области источника пучка и тракте транспортировки создавалось двумя катушками  $\mathcal{G}$  – основной, расположенной на корпусе источника, и катушкой сильного поля, формирующей магнитную пробку. Типичная картина распределения поля на оси установки показана на рис. 1.

Ускоренный в мультиапертурном диоде пучок транспортировался в нарастающем магнитном поле в трубе дрейфа (см. рис. 1, 7), проходил сквозь магнитную пробку и принимался цилиндром Фарадея (см. рис. 1, 8).

Рабочее давление остаточного газа в камере установки находилось в диапазоне  $3 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$  Па. При этом не наблюдалось заметного влияния величины давления на режим генерации и транспортировки пучка.

### Оценки угловых характеристик пучка

Расчеты показывают, что для имевших место параметров эксперимента во всей области дрейфа пучка выполнялся критерий адиабатичности – магнитное поле изменялось достаточно плавно:

$$\frac{\rho}{2B_z} \frac{dB_z}{dz} \ll 1, \quad (1)$$

где  $\rho$  есть полный ларморовский радиус и  $B_z$  – величина продольного магнитного поля на оси установки.

В этом случае предельная величина питч-угла для электрона на выходе ЭОС (при которой начинается отражение от магнитной пробки) определяется как

$$\mathcal{G} = \arcsin(\sqrt{1/R}), \quad (2)$$

где  $R = B_{max}/B_{eos}$  есть пробочное отношение:  $B_{max}$  – максимальное поле в пробке и  $B_{eos}$  – поле на выходе диода.

Для оценки величин питч-углов в источнике пучка с реально существующими параметрами проводились численные расчеты с помощью программы PBGUNS [7], предназначенной для траекторного моделирования пучков заряженных частиц, в том числе и эмитируемых с плазменной границы. Моделирование проводилось для единичной ускоряющей апертуры, без учета влияния пучков в соседних апертурах диода и без учета влияния про-

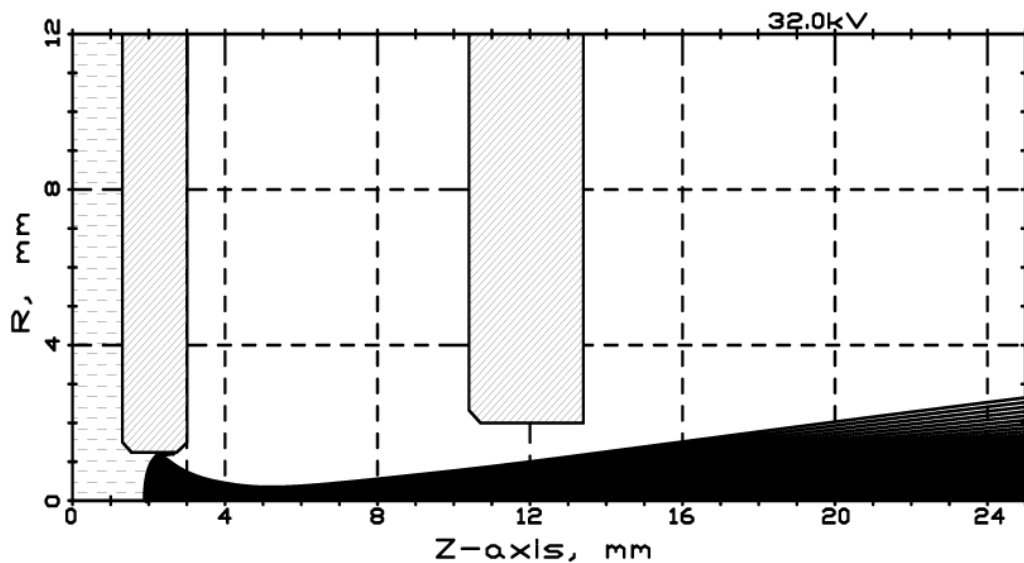
странственного заряда ионов, поступающих в ускоряющий зазор из заанодного пространства. При проведении расчетов во внимание принимались очевидные физические соображения, а также результаты экспериментов [8], указывающие на то, что эмиссионная плазма в экспандере дугового разряда «стягивается» к оси при наложении внешнего продольного магнитного поля.

Таким образом, расположенные на разных радиусах катодные отверстия оказываются в различных условиях по эмиссионной способности плазмы, в результате чего пучок становится неоднородным по радиусу с перепадом плотности тока от приосевых апертур к периферийным до четырех раз и более (в зависимости от величины приложенного магнитного поля). В элементарной ускоряющей апертуре изменение величины тока эмиссии приводит к изменению положения эмиссионной границы плазмы в катодном отверстии, тем самым изменяется распределение электрического поля в прикатодной области и, следовательно, оптические характеристики электронного пучка.

При типичном для обсуждаемых экспериментов полном токе пучка в 55 А, плотность тока эмиссии, усредненная по всем катодным отверстиям (диаметром 2,4 мм), составляет величину 10 А/см<sup>2</sup>. Численные расчеты проводились для двух значений плотности тока

эмиссии: 21 и 4,6 А/см<sup>2</sup>, что приблизительно соответствует существующему перепаду плотности тока между центральными и периферийными апертурами. Траектории электронов пучка и положение эмиссионной границы для варианта с меньшей плотностью тока показаны на рис. 3. Ускоряющее напряжение в расчетах принималось равным 32 кВ, величина продольного магнитного поля – 30 мТл.

Расчеты показывают, что при заданных параметрах – даже для центральных апертур с относительно высокой плотностью тока – плазменная эмиссионная граница заглублена в катодное отверстие, и электрическое поле в этой области создает перефокусировку пучка. При уменьшении плотности тока происходит дальнейшее смещение эмиссионной границы вглубь отверстия и перефокусировка пучка вблизи катода усиливается, что приводит к увеличению расходимости элементарных пучков в периферийных апертурах. Из результатов расчетов следует, что примерно 95 % электронов на расстоянии 2 см за анодом имеют питч-углы, не превышающие 0,06 рад при плотности тока эмиссии 21 А/см<sup>2</sup>, и 0,13 рад при плотности тока эмиссии 4,6 А/см<sup>2</sup>. Исходя из выражения (2), можно получить оценку на предельную величину пробочного отношения при практически полном прохождении пучка:  $R \approx 60$ .



**Рис. 3.** Положение эмиссионной границы и траектории электронов пучка при плотности тока эмиссии 4,6 А/см<sup>2</sup>. В расчетах использовалась реальная геометрия элементарной диодной апертуры

## Методика и результаты эксперимента

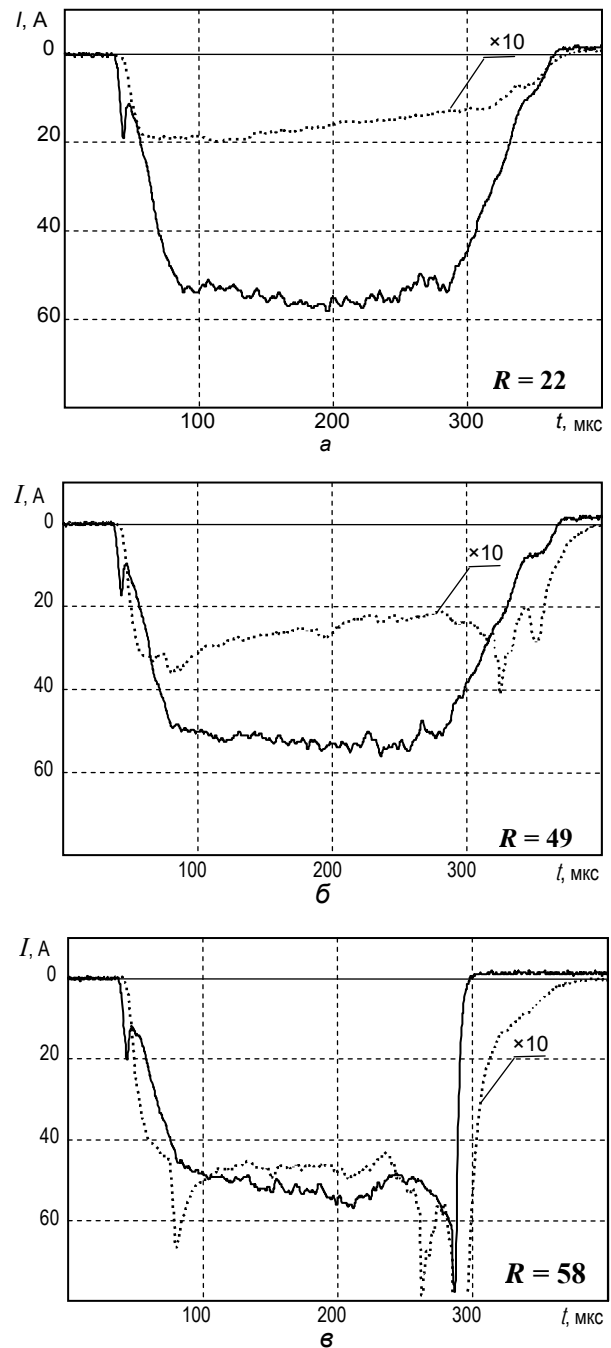
Типичный сценарий эксперимента был следующим: при постоянной величине магнитного поля, создаваемого катушкой, расположенной на корпусе источника пучка (см. рис. 1, 9), производилась серия выстрелов с последовательным подъемом поля во второй катушке, формирующей магнитную пробку. Изменение поля в области ЭОС, создаваемое пробочной катушкой, было несущественным и не влияло на результаты экспериментов. Таким образом, в пределах одной экспериментальной серии пробочное отношение изменялось в широких пределах при практически неизменной величине поля в области формирования пучка. Выстрелы серии производились при фиксированном токе дугового разряда (типичный коэффициент утилизации тока дуги в пучок составлял 65–70 %). Величина ускоряющего напряжения во всех экспериментах составляла 32 кВ.

В ходе экспериментов регистрировались осциллограммы ускоряющего напряжения  $U_d$ , тока в зазоре диода (ток эмиссии)  $I_e$ , тока на цилиндр Фарадея  $I_{FC}$ , а также тока на анодный электрод ЭОС  $I_a$ , обусловленного, во-первых, осаждением на край анодного отверстия небольшой доли электронов из ускоряемого пучка и, во-вторых, электронами, отраженными назад от магнитной пробки.

На рис. 4. отображена характерная эволюция токовых сигналов с ростом пробочного отношения  $R$ . Величина магнитного поля в области ЭОС для этой серии составляла 21–27 мТл. Видно, что по мере роста  $R$  ток на анодный электрод  $I_a$  также возрастает, в конце импульса на нем появляются характерные особенности в виде «выбросов» (см. рис. 4 б). При дальнейшем росте  $R$  выбросы тока на осциллограммах  $I_a$  быстро усиливаются и затем развивается пробой диодного промежутка, приводящий к сокращению длительности импульса (см. рис. 4 в). Подобная же картина наблюдалась и в сериях выстрелов с другими токами эмиссии пучка и при других величинах магнитного поля в области ЭОС.

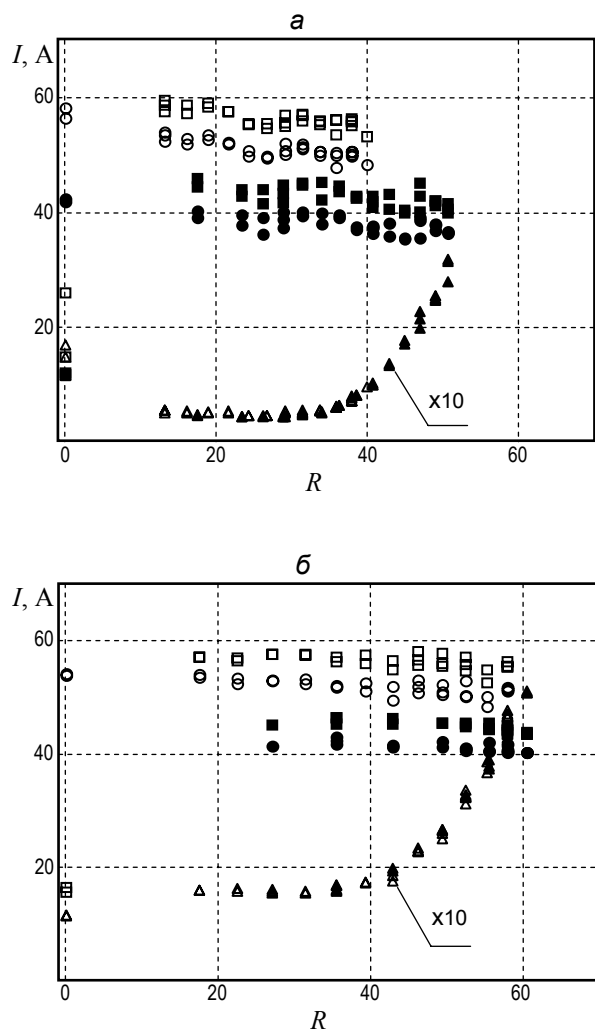
Анализ совокупности экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что растущее токоосаждение на анод диода есть мера отражения от магнитной пробки все возрас-

тающей доли электронов пучка. Закоротка диода возникает не из-за непосредственного воздействия отраженных электронов на ускоряющий промежуток, а вследствие постепенного развития плазменных процессов в пространстве дрейфа пучка, приводящих к прогрессирующему (по мере роста  $R$ ) сокращению длительности импульса.



**Рис. 4.** Осциллограммы тока эмиссии  $I_e$  (сплошная линия) и тока осаждения на анод  $I_a$  (пунктир – умножено на 10) для разных значений пробочного отношения  $R$ . Магнитное поле в области ЭОС: 21–27 мТл

Два других фактора также влияют на длительность пучка: величина магнитного поля в области диода и величина тока, инжектируемого в пространство дрейфа. Это обстоятельство проиллюстрировано на рис. 5, где показана зависимость токов от пробочного отношения  $R$  в сериях с разной величиной поля в области ЭОС: 41 мТл (см. рис. 5 а) и 27 мТл (см. рис. 5 б), при двух значениях тока инжекции пучка для каждого значения поля. На приведенных графиках видно, что при увеличении поля в области диода последний начинает подкорачиваться при меньших значениях  $R$ . Также видно, что снижение тока инжекции с 50–55 А до приблизительно 40 А приводит к возможности транспортировать пучок полной длительности в поле с большим пробочным отношением (это особенно заметно на рис. 5 а).



**Рис. 5.** Зависимость токов от пробочного отношения  $R$ : а – поле в области ЭОС 41 мТл; б – поле в области ЭОС 27 мТл. Обозначения: квадраты – сумма токов на цилиндр Фарадея и осаждения

на анод диода  $I_{FC} + I_a$ , круги – ток в ускоряющем зазоре  $I_e$ , треугольники – ток осаждения на анод  $I_a$  (умножен на 10). Светлые и черные точки относятся к сериям с разными токами эмиссии. Каждая серия измерений ограничена значениями  $R$ , при которых длительность импульса явно укорачивалась до величины менее 250 мкс.

## Заключение

В источнике с дуговым плазменным эмиттером и мультиапертурной диодной ЭОС получен электронный пучок длительностью 250 мкс, с током до 60 А при ускоряющем напряжении 32 кВ. Плазменный эмиттер и ЭОС работали в продольном магнитном поле 20–40 мТл.

Экспериментально продемонстрирована транспортировка электронного пучка (практически без потерь тока) длительностью более 200 мкс в магнитном поле пробочной конфигурации, при величине пробочного отношения  $R \geq 50$ . Максимальная величина поля в пробке при этом достигала 2 Тл. Определяемые из экспериментов угловые характеристики пучка находятся в удовлетворительном согласии с результатами оценочных модельных расчетов.

Предельно достижимая в экспериментах величина  $R$  ограничивалась развитием плазменных процессов в пространстве дрейфа, приводящих к постепенному, по мере роста пробочного отношения, сокращению длительности пучка.

Авторы благодарны В. Т. Астрелину и Г. Е. Деревянкину за помощь на начальном этапе работы и многочисленные полезные обсуждения, а также признательны П. В. Быкову за вклад в создание систем питания магнитного поля и источника пучка.

*Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ; гранта РФФИ 10-08-00707; междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 104.*

## Литература

1. Kreter A. // Fusion Science and Technology. 2011. Vol. 59. № 1. Т. Р. 51.
2. Коваль Н. Н. и др. // ПТЭ. 2005. № 1. С. 135–140.
3. Goebel D. M. and Watkins R. M. // Rev. Sci. Instrum. 2000. Vol. 71. P. 388.

4. Kandaurov I. V. et al. // Proc. 15<sup>th</sup> Int. Symp. On High Current Electronics. Tomsk: Publishing House of the IAO SB RAS, 2008. P. 121.

5. Димов Г. И., Росляков Г. В. // ПТЭ. 1974. № 1. С. 29–36.

6. Давыденко В. И. и др. // ПТЭ. 1986. № 6. С. 39.

7. Boers J. E. // Proc. of the 1995 PAC. 1995. Dallas TX. P. 2312.

8. Куркучек В. В. // Квалификационная работа бакалавра. 2010. НГУ.