

04;10

Формирование и фокусировка электронных пучков в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером в магнитном поле

© С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия
e-mail: kornilov@ms.tusur.ru

(Поступило в Редакцию 9 марта 2011 г. В окончательной редакции 27 мая 2011 г.)

Приведены результаты расчетов конфигурации и величины магнитного поля в областях формирования, ускорения и транспортировки электронов в электронно-оптической системе плазменного источника электронов. Источником магнитного поля является постоянный магнит разрядной камеры, необходимый для иницирования и горения разряда. Показано, что конфигурация и величина магнитного поля в этих областях могут существенным образом изменяться путем выбора материала электродов, образующих магнитную цепь. Установлено, что созданием квазиоднородного магнитного поля в электронно-оптической системе плазменного источника электронов можно значительно улучшить фокусировку пучка.

Введение

В лаборатории плазменной эмиссионной электроники Томского университета систем управления и радиоэлектроники длительное время ведутся исследования плазменных электронных источников на основе отражательного разряда с полым катодом [1,2]. Исследования стимулируются возрастающим спросом на эти источники со стороны промышленности и научных организаций. Одна из важных научных задач совершенствования плазменных электронных источников состоит в изучении возможности получения непрерывных электронных пучков с плотностью мощности свыше 10^6 W/cm^2 . Такие пучки применяются для получения калиброванных отверстий малого диаметра в вакууме [3] или в электронно-лучевых технологиях, связанных с воздействием пучка в атмосфере [4] или газе высокого давления [5].

В настоящее время пучки с высокой плотностью мощности получают в источниках с термокатодом. Однако при использовании таких источников необходимо дополнительно защищать накаливаемый до высокой температуры катод от возможных прорывов атмосферы, воздействия обратного ионного потока и других разрушающих катод факторов.

Источники с плазменным эмиттером из-за отсутствия накаливаемых деталей не подвержены таким воздействиям. Однако плотности мощности более 10^6 W/cm^2 в электронных пучках, генерируемых плазменными источниками, ранее не достигались. Считалось, что получение острофокусированных пучков в таких источниках затруднительно из-за высокой температуры электронов в плазме. Однако существует ряд специфических для плазменного эмиттера факторов, действие которых на фокусировку не учитывалось. Один из таких факторов — магнитное поле, в котором горит отражательный разряд.

Это поле сконцентрировано в разрядной камере. Однако существует еще поле рассеяния, которое замы-

кается через зазоры между магнитопроводящими элементами конструкции источника. Это поле может присутствовать и в электронно-оптической системе источника. Проникающее в электронно-оптическую систему магнитное поле будет изменять условия формирования электронного пучка. Следовательно, с одной стороны, необходимо ослабить расфокусирующее действие этого поля на пучок. С другой стороны, не исключена возможность такой организации магнитного поля в электронно-оптической системе, которая позволила бы улучшить фокусировку.

Исследованию этих вопросов посвящена настоящая работа.

1. Схема экспериментальной установки для проведения исследований

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Установка содержит плазменный источник электронов 1 на основе отражательного разряда с полым катодом [1,2]. Разряд горит в разрядной камере [6], образованной полым катодом 5, цилиндрическим анодом 6 и эмиттерным катодом 8 с эмиссионным каналом. Электрическое питание разряда обеспечивается источником постоянного тока 2 с напряжением холостого хода 1.5 kV. Между полым и эмиттерным катодами постоянным магнитом 7 создается аксиально-симметричное поле с индукцией на оси около 100 мТ. Катоды выполнены из магнитной стали и являются элементами магнитной цепи. Давление плазмообразующего газа (воздух) в разрядной камере составляет примерно 3–10 Па. Это выше, чем в вакуумной камере, на 3–4 порядка. Повышенное давление в разрядной камере создается дозированным напуском газа Q. Разряд горит непрерывно с током 0.1–0.4 А.

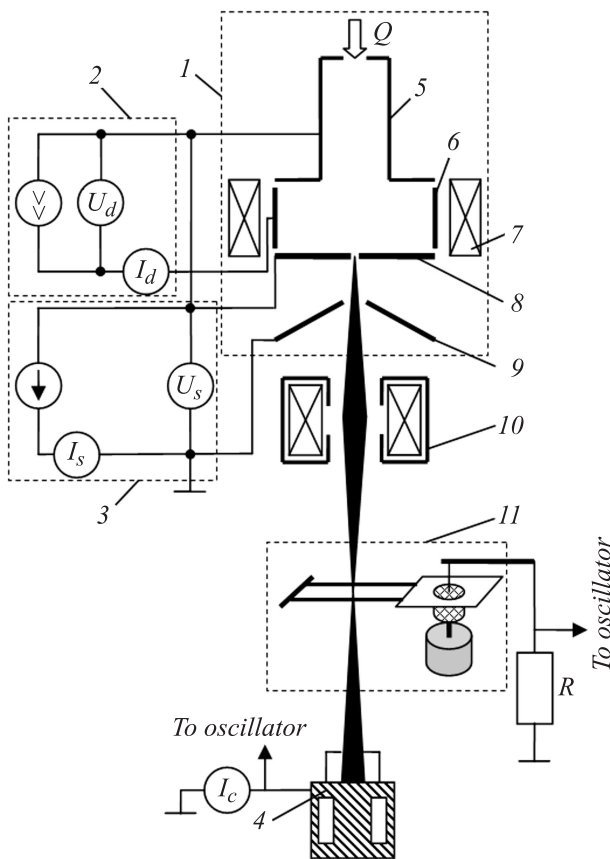


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — плазменный источник электронов, 2 — источник разрядного напряжения, 3 — источник высоковольтного напряжения, 4 — коллектор электронов с цилиндром Фарадея, 5 — полый катод, 6 — анод разрядной камеры, 7 — постоянный магнит, 8 — эмиттерный катод, 9 — ускоряющий электрод, 10 — магнитная фокусирующая линза, 11 — двойной вращающийся зонд.

Эмиссия электронов из плазмы происходит через эмиссионный канал в промежутке, образованный эмиттерным катодом и ускоряющим электродом 9, между которыми прикладывается высоковольтное напряжение от источника постоянного тока 3. Электронный пучок фокусируется магнитной линзой 10. Диагностика пучка проводилась при помощи двойного вращающегося зонда 11 [7]. Полученные в результате использования двойного вращающегося зонда распределения тока на зонд пересчитывались в радиальные распределения плотности тока по сечению пучка с помощью интегрального преобразования Абеля. Во всех экспериментах коэффициент токопрохождения был близок к 100%.

Распределение магнитного поля в электронно-оптической системе плазменного источника электронов рассчитывалось в компьютерной программе FEMM (Finite Element Method Magnetics) [8].

Исходными данными для моделирования магнитного поля являлись геометрия исследуемой магнитной цепи,

материалы составляющих ее элементов и источник магнитного поля.

Геометрия плазменного источника электронов задавалась преобразованием файла с конструкцией источника в реальном масштабе программы AutoCAD в файл программы FEMM. Такой способ задания обеспечивал наибольшую точность отражения всех элементов конструкции. Каждому элементу ставился в соответствие материал из библиотеки программы FEMM. В расчетах не использовались конструктивные детали источника, выполненные из немагнитных материалов. Полученное изображение конструкции источника окружалось в программе расчетной областью. Конструкция источника выполнена таким образом, что созданное постоянным магнитом поле имеет осевую симметрию. Расчет выполнялся в цилиндрической системе координат. На область расчета накладывалась треугольная сетка с неравномерным шагом. В областях, непосредственно связанных с генерацией плазмы, формированием, транспортировкой и фокусировкой электронного пучка, шаг сетки составлял 0.1–0.5 мм. В остальной части конструкции источника размер сетки варьировался в диапазоне 1–10 мм.

2. Расчет магнитного поля в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером

Одна из задач использования программы FEMM для расчетов магнитных полей в конструкции электронного источника состояла в подходящем выборе источника магнитного поля — постоянного магнита. Была измерена индукция магнитного поля самарий-кобальтового магнита, используемого в реальном источнике. Для измерений использованы магнитометры Холла типа Ш1-8 и РШ1-10.

Измерялась z -составляющая магнитной индукции. На рис. 2 показана картина магнитного поля и указаны точки, в которых измерялось и рассчитывалось значение z -компоненты магнитной индукции.

В табл. 1 приведены результаты измерений магнитной индукции в точках, указанных на рис. 2.

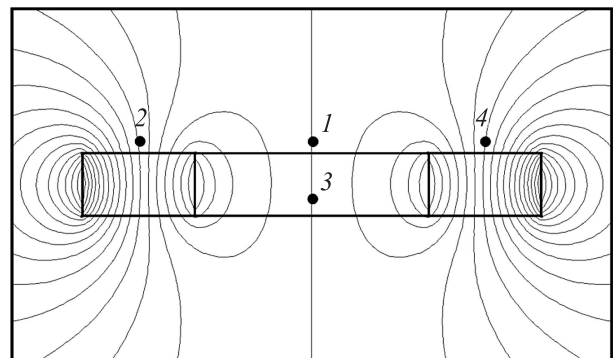


Рис. 2. Расположение датчиков Холла относительно магнита (точки 1–4) и картина магнитного поля.

Таблица 1. Результаты измерений магнитной индукции

| Положение 1 B_z, T | Положения 2, 4 B_z, T | Положение 3 B_z, T |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 0.084 | 0.200 | 0.102 |

Таблица 2. Результаты расчета значений магнитной индукции магнитов из библиотеки программы

| Тип магнита | Положение 1 B_z, T | Положения 2, 4 B_z, T | Положение 3 B_z, T |
|--------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| SmCo 27 MGOe | 0.083 | 0.225 | 0.120 |
| SmCo 24 MGOe | 0.084 | 0.211 | 0.113 |
| SmCo 20 MGOe | 0.079 | 0.200 | 0.105 |

Результаты расчета значений магнитной индукции по программе FEMM в точках, указанных на рис. 2 для различных магнитов, приведены в табл. 2.

Сравнение измеренных и рассчитанных значений магнитной индукции показали, что для моделирования магнитных цепей в источнике можно использовать параметры магнитов SmCo 24 MGOe и SmCo 20 MGOe из библиотеки материалов программы FEMM.

В дальнейших расчетах использовался магнит SmCo 24 MGOe.

На рис. 3 представлено распределение магнитного поля по элементам типовой конструкции плазменного источника электронов. Элементы конструкции источника, выполненные из немагнитных материалов (кроме анода 2 и ускоряющего электрода 5), на рисунках не отображены.

Из рис. 3, *a* видно, что полый катод 1, магнит 3, эмиттерный катод 4 и корпус 6 источника образуют сложную магнитную цепь. Магнитное поле присутствует в разрядной камере, в областях первичного формирования, ускорения и транспортировки электронного пучка. На рис. 3, *b* более детально изображена картина распределения магнитного поля в этих областях.

Расчеты показывают, что конфигурацию и величину постоянного магнитного поля в областях электронно-оптической системы можно изменять путем подходящего выбора материалов электродов источника, образующих магнитную цепь. Это открывает возможности для создания различных условий движения электронов в электронно-оптической системе без применения дополнительных источников магнитного поля, только за счет постоянного магнита разрядной камеры. В частности, становится возможным исследовать характер движения электронов в электронно-оптической системе с различной степенью экранирования эмиттера от магнитного поля. Под степенью экранирования эмиттера, как принято в литературе [9,10], будем понимать отношение индукции поля у эмиттера B_e к индукции B в области транспортировки в электронно-оптической системе. Ре-

зультаты этих исследований могут помочь оптимизировать как условия формирования электронного пучка в области ускорения, так и условия ввода его в область магнитного поля фокусирующей линзы.

На рис. 4 приведены рассчитанные распределения магнитного поля и графики изменения модуля магнитной индукции $|B|$ вдоль координаты z (вдоль оси электронно-оптической системы).

Конфигурация электродов, образующих электронно-оптическую систему, в расчетах оставалась одинаковой. В каждой серии расчетов изменялся лишь материал эмиттерного катода или отдельной его части. Картина магнитного поля, представленная на рис. 4, *a*, характерна для модели, в которой эмиттерный катод выполнен полностью из ферромагнетика. На рис. 4, *b* и *c* показаны распределения поля и зависимости $|B| = f(z)$ для составного эмиттерного катода. Рис. 4, *b* — основная часть катода выполнена из немагнитного материала, в приосевой его части имеется вставка из магнитного материала. Вставка, как это видно из рисунка, позволяет сконцентрировать поле в области первичного формирования и ускорения электронного пучка.

Эмиттерный катод, распределение поля для которого показано на рис. 4, *c*, выполнен из магнитного материала с приосевой вставкой из немагнитного материала.

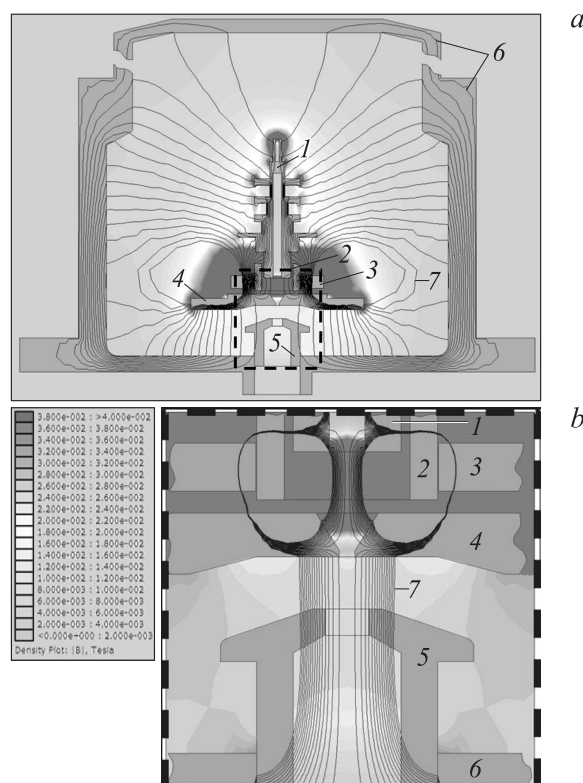


Рис. 3. Распределение магнитного поля в плазменном источнике электронов: *a* — в источнике в целом, *b* — в разрядной камере и электронно-оптической системе. 1 — полый катод, 2 — анод, 3 — постоянный магнит, 4 — эмиттерный катод, 5 — ускоряющий электрод, 6 — часть корпуса источника, 7 — линии напряженности магнитного поля.

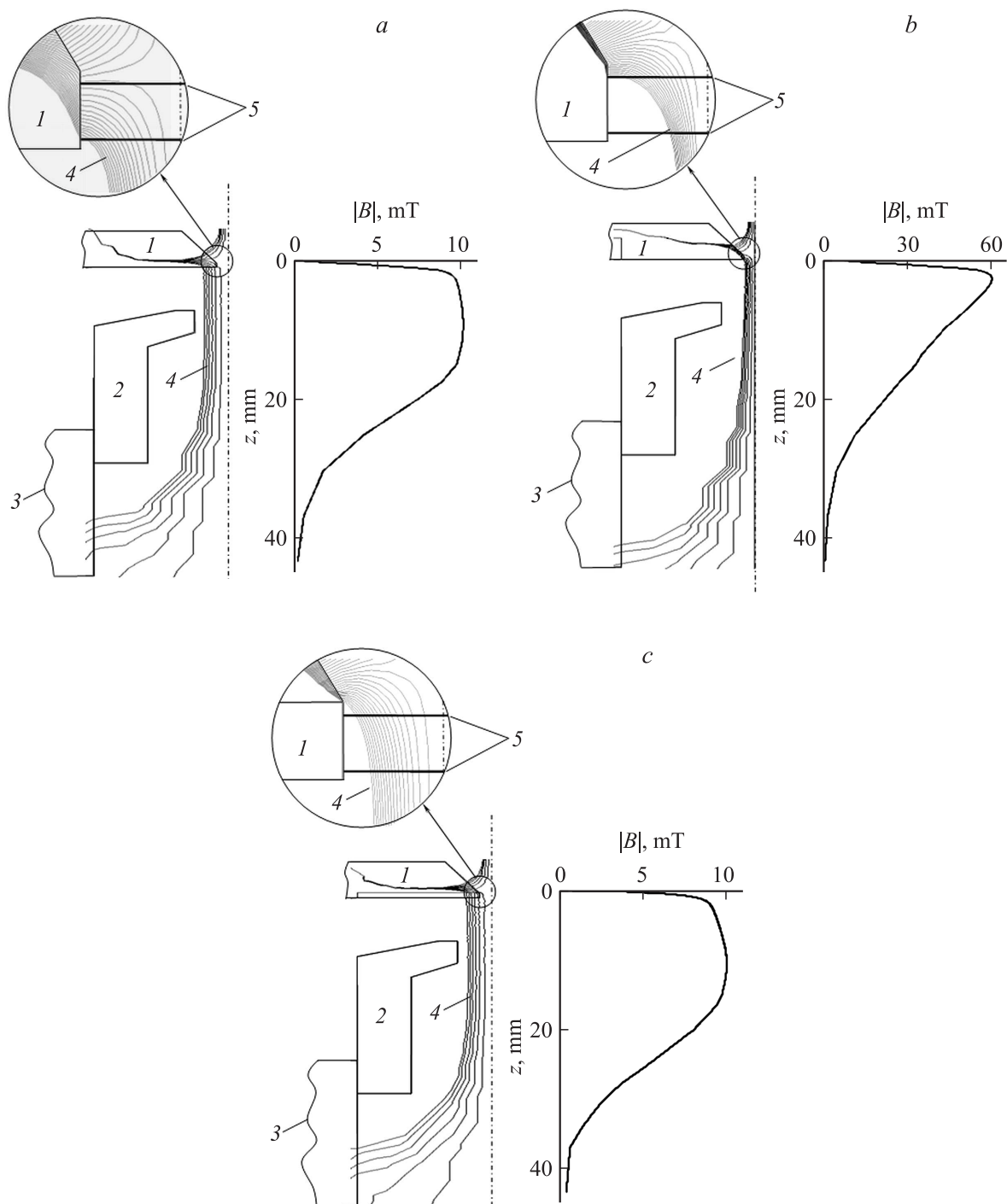


Рис. 4. Распределения магнитного поля в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером при V_e/B : *a* — $V_e/B = 0$ и $0 < V_e/B < 1$; *b* — $0 < V_e/B < 1$; *c* — $V_e/B = 1$. 1 — эмиттерный катод, 2 — ускоряющий электрод, 3 — часть корпуса источника, 4 — силовые линии магнитного поля, 5 — условная граница плазмы.

Распределения демонстрируют возможность организации электронно-оптической системы с полностью экранированным (рис. 4, *a*), частично экранированным (рис. 4, *b*) и не экранированным (рис. 4, *c*) от магнитного поля эмиттером. Необходимо отметить, что для системы с плазменным эмиттером понятие экранировки может зависеть от режима работы электронного источника.

Так, для варианта, показанного на рис. 4, *a*, условие $V_e/B = 0$ (полная экранировка эмиттера от магнитного поля) выполняется лишь тогда, когда эмитирующая поверхность плазмы сформирована в глубине эмиссионного канала. Однако если для этой же ситуации эмитирующая поверхность переместится к выходу из эмиссионного канала, то реализуется вариант с частичным

экранированием эмиттера ($0 < B_e/B < 1$). При этом в области ускорения электронов величина магнитной индукции постоянна. Магнитное поле однородно, силовые линии параллельны оси.

На рис. 4, *b* представлен вариант с частичным экранированием эмиттера. Степень экранирования зависит от положения эмиттирующей поверхности в канале. Однако важно то, что по сравнению с представленным на рис. 4, *a* вариантом магнитная индукция в областях первичного формирования и ускорения оказывается в 6–10 раз большей.

Расчет, результаты которого представлены на рис. 4, *c*, демонстрирует возможность создания электронно-оптической системы с не экранированным от магнитного поля эмиттером ($B_e/B = 1$). В области ускорения величина магнитной индукции постоянна. Магнитное поле однородно, силовые линии параллельны оси.

Таким образом, результаты расчета показывают, что в электронно-оптической системе плазменного источника электронов можно реализовать ситуации с различной степенью экранирования плазменного эмиттера от магнитного поля только за счет изменения распределения магнитного поля постоянного магнита разрядной камеры.

3. Формирование и фокусировка электронного пучка

Для проверки влияния различной степени экранирования эмиттера от магнитного поля, а также величины этого поля на параметры электронного пучка проведены эксперименты. Постоянными параметрами в эксперименте поддерживались ток пучка 20 мА, расход плазмообразующего газа $20 \text{ cm}^3/\text{h}$ и положение в пространстве

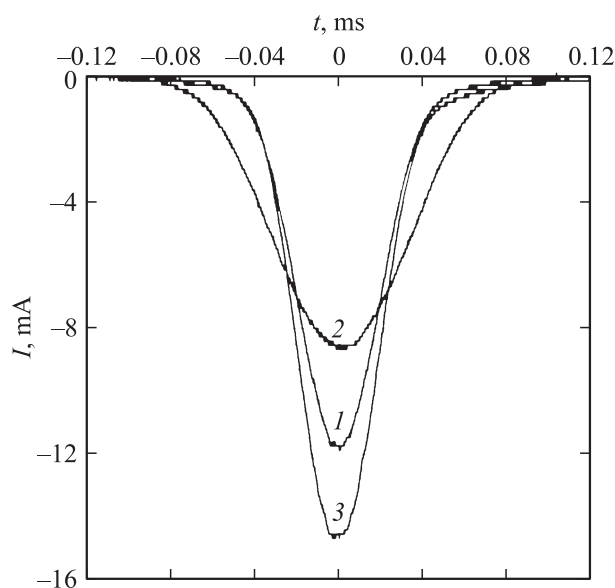


Рис. 5. Зондограммы электронного пучка при $U_{acc} = 10 \text{ kV}$ и B_e/B : 1 — $B_e/B = 0$, 2 — $0 < B_e/B < 1$, 3 — $B_e/B = 1$.

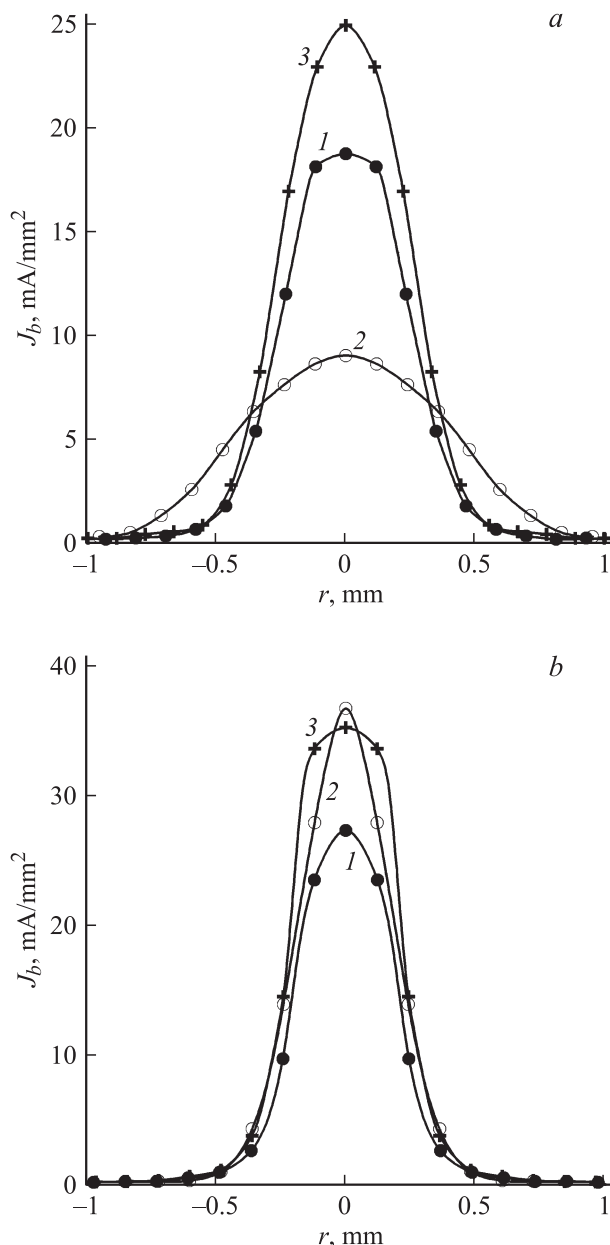


Рис. 6. Распределения плотности тока вдоль радиуса пучка при ускоряющем напряжении, кВ: *a* — 10, *b* — 20. 1 — $B_e/B = 0$ и $0 < B_e/B < 1$; 2 — $0 < B_e/B < 1$; 3 — $B_e/B = 1$.

области с минимальным диаметром сфокусированного пучка. Положение эмиттирующей поверхности в эмиссионном канале изменялось ускоряющим напряжением.

На рис. 5 представлен типичный вид осциллограмм тока на зонд (зондограммы). Радиальные распределения плотности тока сфокусированного пучка представлены на рис. 6.

Распределения плотности тока, представленные на рис. 6, *a*, демонстрируют возможность реализации вариантов с экранированием эмиттера от магнитного поля, когда эмиттирующая поверхность находится в эмиссионном канале вблизи его границы. Распределения плотно-

сти тока на рис. 6, *b* характерны для случая, когда эмитирующая поверхность находится в глубине эмиссионного канала. Из рис. 6 следует, что конфигурация и величина магнитного поля в электронно-оптической системе существенно образом изменяют условия формирования и фокусировки электронного пучка.

В электронно-оптической системе с не экранированным плазменным эмиттером действие магнитного поля проявляется в эффективном ограничении поперечных размеров пучка при его ускорении и транспортировке (рис. 6, *a* и *b*, кривые 3). Плотность тока в пучке максимальна, распределение плотности более однородно по сечению пучка.

Распределения на рис. 6, *a, b* (кривые 2) соответствуют частичному экранированию эмиттера сильным, с $B_{\max} = 60$ мТ, магнитным полем. При низком ускоряющем напряжении на траектории электронов значительное влияние оказывает поперечная составляющая магнитной индукции. Возрастает поперечный размер пучка, становится более плоским распределение плотности тока (рис. 6, *a*). При повышении ускоряющего напряжения влияние поперечной составляющей магнитного поля сказывается меньше. Распределение плотности тока приобретает клиновидную форму (рис. 6, *b*).

Распределение на рис. 6, *a*, (кривая 1) также соответствует случаю частичного экранирования эмиттера от магнитного поля. Однако кривая 1 получена при значительно меньшем магнитном поле ($|B|_{\max} = 10$ мТ). Влияние поперечной составляющей магнитного поля даже при малом ускоряющем напряжении менее выражено. Распределение плотности тока не размазано. При увеличении ускоряющего напряжения эмитирующая поверхность перемещается в область, свободную от магнитного поля. В этом случае эмиттер полностью экранирован от магнитного поля. Распределение плотности тока иллюстрируется кривой 1 (рис. 6, *b*).

4. Заключение

1. Магнитное поле отражательного разряда при любой конструкции электронного источника с плазменным эмиттером проникает в область формирования пучка. Конфигурацией и величиной этого поля можно управлять подбором различных сочетаний магнитопроводящих материалов, из которых изготовлены электроды источника. Такое управление не оказывает существенного влияния на устойчивость и параметры разряда.

2. Магнитное поле постоянного магнита разрядной камеры может эффективно ограничивать поперечные размеры электронного пучка при его формировании и транспортировке. Такой эффект возможен в электронно-оптической системе с полностью не экранированным от магнитного поля плазменным эмиттером.

3. Совокупное действие магнитного поля отражательного разряда в областях формирования и транспортировки электронного пучка и поля основной фокусирующей

линзы может быть аналогично действию двухлинзовой магнитной системы фокусировки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-08-99064-р_офи.

Список литературы

- [1] *Osipov I.V., Rempe N.G.* // Rev. Sci. Instrum. 2000. Vol. 71. P. 1638.
- [2] *Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [3] *Electron beam drilling apparatus*, United States Patent, number 4467170, Aug. 21, 1984.
- [4] *Bach Fr.-W., Beniyash A., Flade K., Versemann R.* // Proc. 4th Conf. LANE. Germany, Bamberg, 2004. Vol. 1. P. 247–258.
- [5] *Kornilov S.Y., Osipov I.V., Rempe N.G.* // Elektrotehnica & Elektronika. 2009. Vol. 44. P. 201–203.
- [6] *Корнилов С.Ю., Осипов И.В., Рау А.Г., Ремпе Н.Г.* // Приборы. 2007. № 6. С. 8–12.
- [7] *Корнилов С.Ю., Осипов И.В., Ремпе Н.Г.* // ПТЭ. 2009. № 3. С. 104–109.
- [8] *Буль О.Б.* Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. М.: Академия, 2005. 336 с.
- [9] *Молоковский С.И., Сушков А.Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
- [10] *Алямовский И.В.* Электронные пучки и электронные пушки. М.: Соврадио, 1966. 456 с.