

01;10;12

Управление формой поперечного сечения нерелятивистского сильноточного электронного пучка с помощью обратных токопроводов

© Г.Е. Озур,¹ В.П. Григорьев,² К.В. Карлик,¹ Т.В. Коваль,² Ле Ху Зунг²¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия² Институт кибернетики Томского политехнического университета,
634034 Томск, Россия
e-mail: ozur@lve.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 18 октября 2010 г. В окончательной редакции 1 февраля 2011 г.)

Представлены результаты численных расчетов и экспериментов по управлению формой поперечного сечения нерелятивистского (10–30 keV) сильноточного (до 25 kA) электронного пучка. Осуществлена трансформация пучка круглого сечения в пучок квазипрямоугольного сечения. Трансформация пучка осуществлена путем использования в качестве обратных токопроводов плоских шин или круглых шпилек на коротком (4 см) заключительном отрезке канала транспортировки. При этом расстояние между краем пучка и токопроводами соизмеримо с его радиусом, а напряженность внешнего ведущего магнитного поля — с напряженностью собственного магнитного поля пучка. Результаты расчетов согласованы с экспериментальными данными.

Введение

Широкоапертурные (десятки cm^2) нерелятивистские (10–30 keV) сильноточные (до 25 kA) электронные пучки (НСЭП) широко применяются для модификации поверхностных слоев материалов [1–4]. Характерная длительность импульса НСЭП составляет несколько микросекунд, что обеспечивает высокую плотность энергии пучка (до 20 J/cm^2), достаточную для импульсного оплавления любых электропроводящих материалов, включая тугоплавкие.

Управление параметрами пучка, в том числе его формой и распределением плотности энергии в поперечном сечении, традиционно является актуальной задачей. Например, при обработке крупногабаритных изделий приходится сканировать пучок по их поверхности.¹ В этом случае наиболее рациональной является прямоугольная форма его поперечного сечения. Действительно, для однородной обработки поверхности пучком круглого сечения необходимо использовать малый шаг сканирования (примерно на порядок меньше диаметра пучка), что существенно снижает производительность процесса обработки. Пучок прямоугольного (квазипрямоугольного) сечения позволил бы резко увеличить шаг сканирования и, следовательно, производительность процесса. В то же время с точки зрения формирования пучка и из конструктивных соображений удобнее аксиально-симметричные электронные пушки. Таким образом, трансформация пучка из круглого в квазипрямоугольный на выходе канала транспортировки позволила бы оптимально сочетать удобство формирования пучка с эффективностью обработки крупногабаритных изделий.

¹ Сканирование в случае сильноточных пучков осуществляется путем перемещения обрабатываемого изделия внутри рабочей камеры.

Идея такой трансформации заключается в том, что выходная часть обратного токопровода, по которому ток пучка „стекает на землю“, выполняется в виде двух или четырех параллельных шин, расположенных на относительно небольшом удалении от края пучка. Токи, протекающие по шинам, стремясь оттолкнуть пучок, как бы „сплющивают“ его и делают квазипрямоугольным. Разумеется, подобная трансформация пучка возможна, если собственное магнитное поле пучка сравнимо по напряженности с внешним ведущим магнитным полем.

В настоящей работе выполнены численные расчеты и эксперименты, наглядно демонстрирующие возможность такой трансформации поперечного сечения пучка.

Описание экспериментальной установки

Эксперименты проводились на установке „РИТМ-М“ [7], электронная пушка которой схематично изображена на рис. 1. Пучок формировался в двойном слое между взрывозамесной катодной плазмой и анодной плазмой, создаваемой предварительно с помощью сильноточного отражательного разряда в аргоне при давлении 0.04–0.07 Па. Концентрация анодной плазмы ($n_a \approx (3–5) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) более чем на порядок величины превосходила концентрацию электронов пучка, что обеспечивало высокую степень зарядовой нейтрализации даже на стадии роста тока.

Корпус электронной пушки представлял собой трубу из нержавеющей стали внутренним диаметром 20.6 см. Пушка была пристыкована к вакуумной камере диаметром 40 см и глубиной 42 см. На выходном торце трубы крепились кольцевая диафрагма с отверстием 12 см, к которой через плоские медные шины шириной 3, 6, 9 см

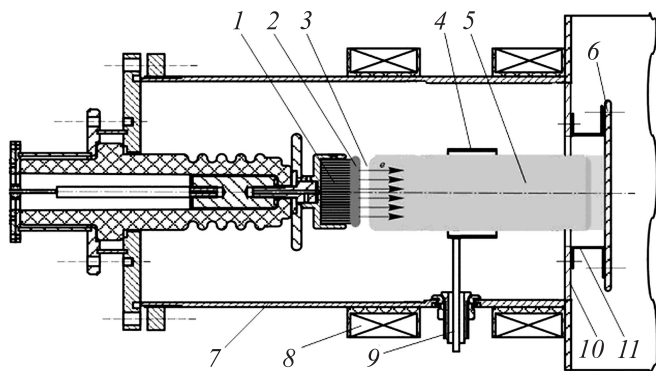


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — взрывэмиссионный катод, 2 — катодная плазма, 3 — двойной слой, 4 — анод пеннинговского разряда, 5 — анодная плазма, 6 — коллектор (мишень), 7 — корпус электронной пушки, 8 — соленоид, 9 — анодный ввод, 10 — диафрагма; 11 — обратный токопровод.

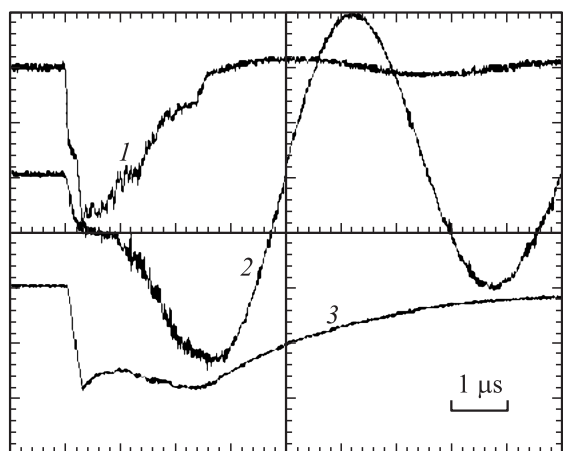


Рис. 2. Осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения 1 — 10.6 kV/div, тока катода 2 — 14.4 kA/div и тока пучка (3 — 7 kA/div). Горизонтальная развертка — 1 μ s/div.

или шпильки диаметром 0.5 см присоединялся коллектор пучка. Длина шин и шпилек составляла 4 см. Расстояние между диаметрально противоположными шинами L варьировалось от 9.2 до 15.2 см, располагались они на равном удалении от оси системы. Диаметр эмиттирующей части катода был равен внутреннему диаметру кольцевого анода и составлял 8.5 см. Форма поперечного сечения пучка изучалась по его автографам на пластинах из нержавеющей стали. Автографы пучка представляли собой области оплавления поверхности пластин.

Амплитуда ускоряющего напряжения составляла 20–30 кВ, амплитуда тока пучка 10–20 кА достигалась за 300–600 нс, затем ток менялся слабо, длительность импульса 2.7–3.5 μ s, плотность энергии пучка на мишени до 8 Дж/см², индукция внешнего ведущего магнитного поля, создаваемого секционированным соленоидом, составляла 0.17 Т.

Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения, тока катода и тока пучка приведены на рис. 2.

Теоретическое исследование

Исследование транспортировки НСЭП проводилось путем численного решения уравнений движения электронов [5,6] с помощью пакетов MATLAB и COMSOL Multiphysics в предположении полной зарядовой нейтральности. В этом случае динамику электронов и параметры пучка определяют следующие поля: аксиальное внешнее магнитное поле соленоида, магнитное поле обратного токопровода (шин или шпилек), собственное магнитное поле пучка и электрическое поле, индуцированное на фронте тока пучка.

Внешнее магнитное поле соленоида и поле токопроводов вычислялось аналитически и численно в пакете COMSOL Multiphysics. Геометрические размеры и параметры пучка, использовавшиеся в численных расчетах, соответствовали условиям эксперимента: энергия электронов 27 кэВ, радиус пучка на входе в канал транспортировки 4.25 см, ток пучка 20 кА, радиус трубы дрейфа 10.3 см, длина трубы от плоскости катода 18.5 см.

Расчеты транспортировки электронного пучка и преобразования его формы проведены для различных случаев токопровода:

- цилиндр с диаметром, равным внутреннему диаметру трубы;
- две плоские параллельные шины длиной 4 см и шириной 3, 6 и 9 см, ток, который течет по каждой шине 10 кА;
- четыре плоские параллельные шины длиной 4 см и шириной 3, 6 и 9 см, ток в каждой шине 5 кА;
- четыре параллельные шпильки длиной 4 см и диаметром 0.5 см, ток в каждой шпильке 5 кА.

Предварительно было рассчитано распределение магнитного поля соленоида, соответствующее условиям эксперимента. Характерное распределение индукции магнитного поля вдоль оси транспортировки приведено на рис. 3.

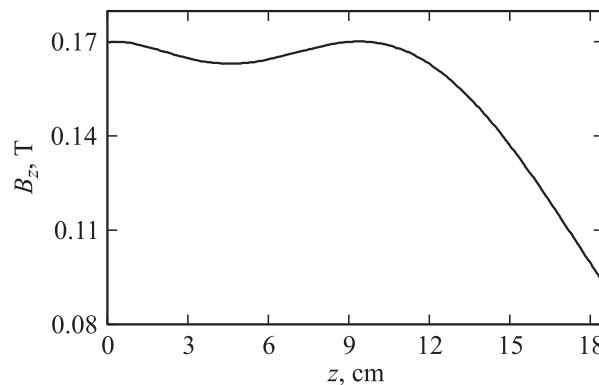


Рис. 3. Зависимость индукции ведущего магнитного поля на оси трубы транспортировки от продольной координаты. Плоскость $z = 0$ — координата катода.

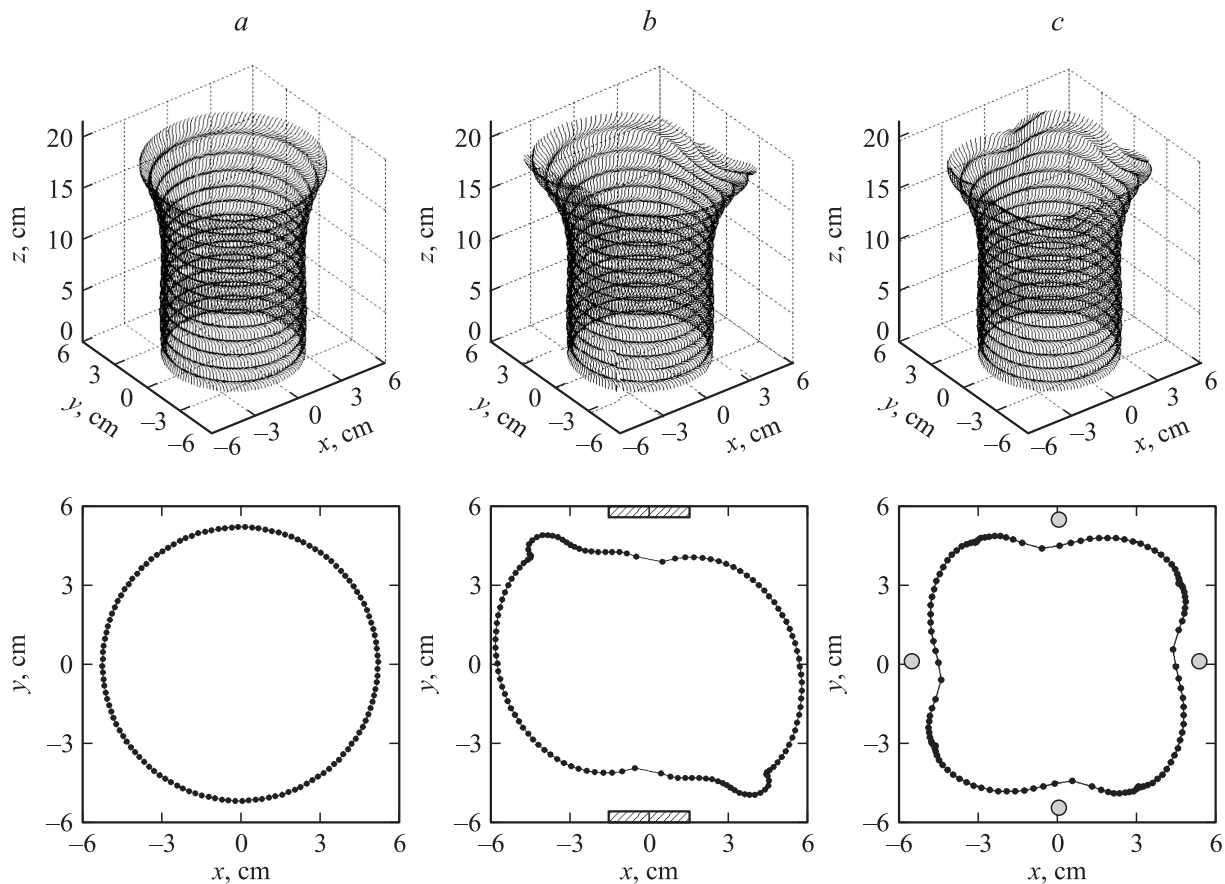


Рис. 4. Траектории краевых электронов для различных форм обратного токопровода: *a* — цилиндр, *b* — две шины, *c* — четыре шпильки. $L = 11$ cm.

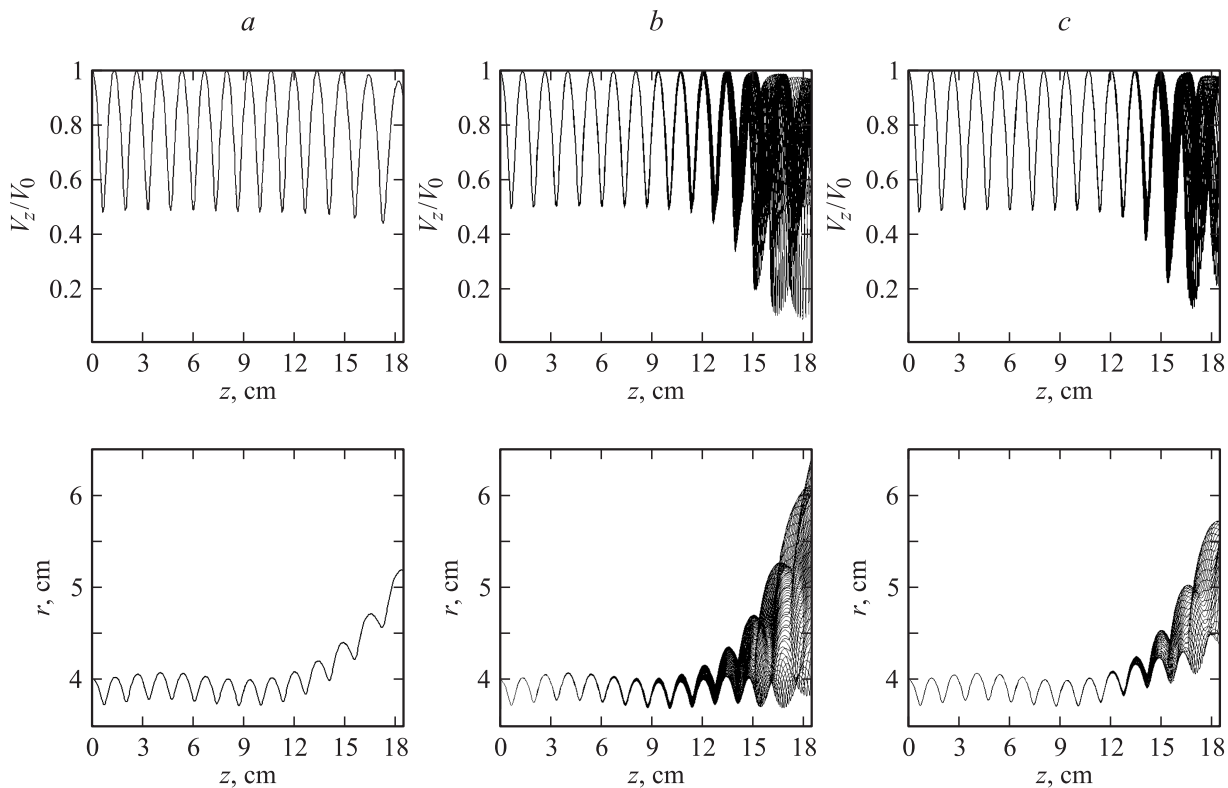


Рис. 5. Изменение относительной продольной скорости краевых электронов и их радиальной координаты вдоль канала транспортировки; *a* — аксиально-симметричный пучок, *b* — токопровод из двух шин, *c* — токопровод из четырех шпилек.

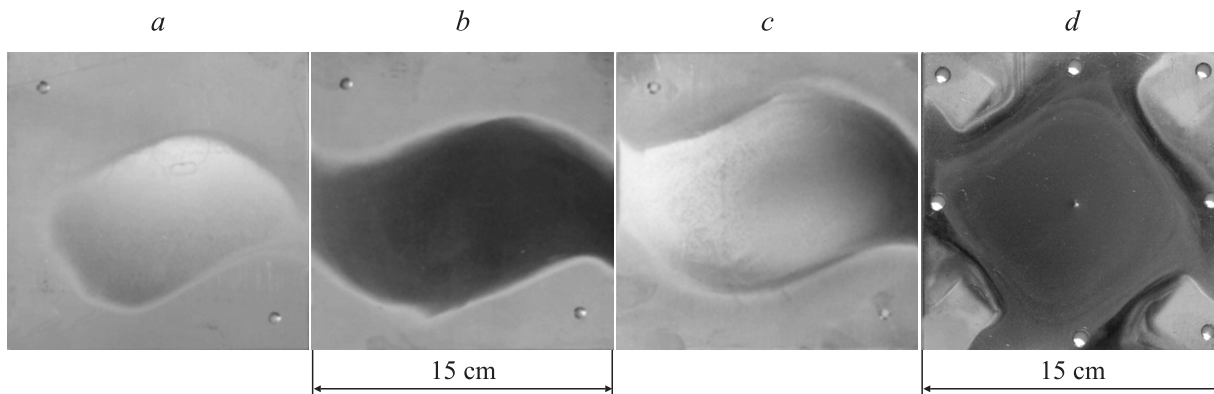


Рис. 6. Автографы пучка на нержавеющей стали. *a-c* — 2 шины: *a* — одиночный импульс, *b* — 10 импульсов, *c* — 60 импульсов, *d* — 4 шины. $L = 15.2$ см, ширина шин — 3 см, амплитуда тока пучка — 20 кА.

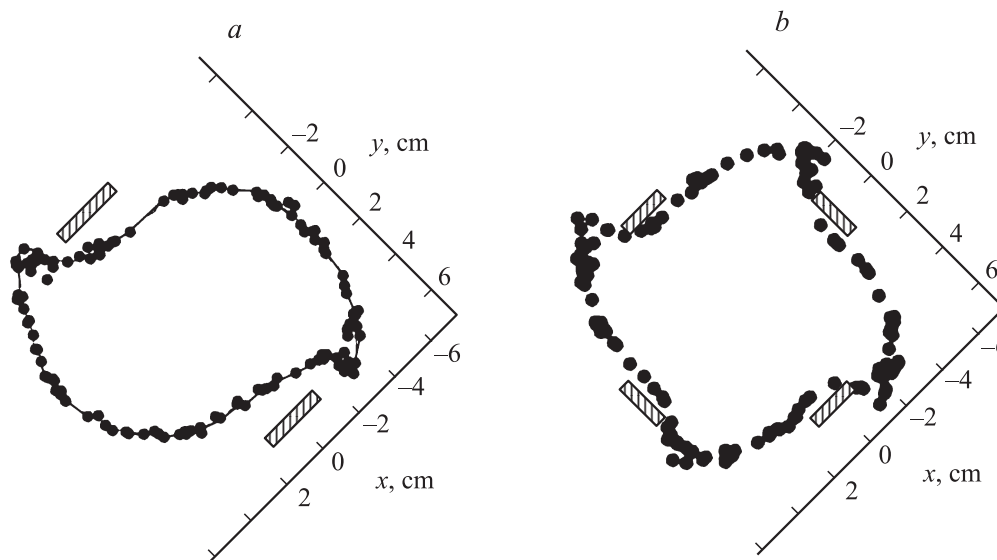


Рис. 7. Расчетные автографы пучка. *a* — 2 шины, *b* — 4 шины. $L = 11$ см, ширина шин — 3 см, амплитуда тока пучка — 20 см.

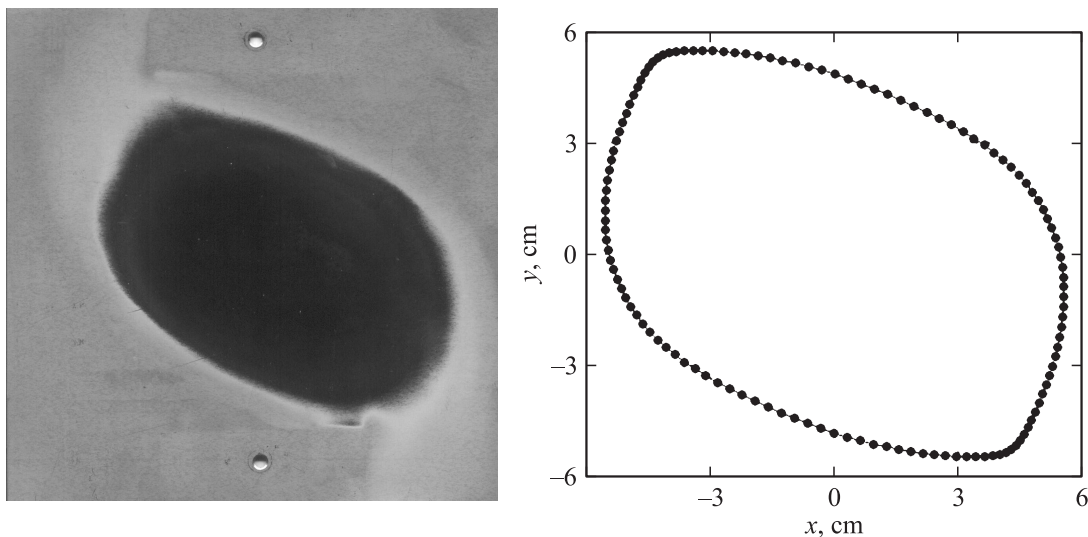


Рис. 8. Автографы пучка. Слева — эксперимент, справа — расчет. $L = 15.2$ см, ширина шин — 9 см, амплитуда тока пучка — 20 кА.

Типичные результаты численных расчетов без учета индуцированного электрического поля, т.е. без учета токовой нейтрализации, представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 показаны траектории краевых электронов пучка в канале транспортировки и их проекции на плоскость XOY . Из рис. 4, *a* видно, что в случае аксиально-симметричного обратного токопровода пучок, как и следовало ожидать, лишь увеличивается в диаметре на выходе из канала транспортировки благодаря радиальной составляющей магнитного поля на краю соленоида. В случае токопровода из двух шин пучок на мишени имеет форму, напоминающую прямоугольную (рис. 4, *b*). Длины сторон этого прямоугольника зависят от размеров шин и расстояния между ними. В случае токопровода, состоящего из четырех шпилек или шин, форма пучка на мишени близка к квадрату (рис. 4, *c*).

Неоднородное магнитное поле токопровода оказывает дополнительное влияние на все составляющие скорости электронов при движении их к мишени. На рис. 5 показаны зависимости относительной продольной скорости и координаты краевых электронов от координаты z . Видно, что в конце трубы транспортировки происходит уменьшение продольной скорости электронов, при этом происходит трансформация продольной скорости в поперечную.

Из сравнения зависимостей на рис. 5, *b* и *c* видно, что при токопроводе в виде шин на мишени наблюдается наибольшее отклонение краевых частиц от начального радиуса пучка на эмиттере, следовательно происходит наибольшая деформация пучка.

Сравнение экспериментальных данных с расчетами

На рис. 6 представлены автографы пучка, полученные экспериментально, а на рис. 7 — полученные с помощью численных расчетов для этих же экспериментальных условий. Видно, что экспериментально наблюдаемая трансформация поперечного сечения пучка согласуется с результатами расчетов. Следует заметить, что прямоугольная форма пучка позволяет выявить его вращение вокруг собственной оси; угол поворота относительно плоскости шин составляет около 20° , что соответствует по нашим оценкам отношению индукций собственного магнитного поля пучка и ведущего магнитного поля. Причем при варьировании числа импульсов (рис. 6, *b* и *c*) характер автографа сохраняется, что свидетельствует о стабильности угла поворота пучка от импульса к импульсу. Некоторое расширение автографа с увеличением числа импульсов может быть связано с двумя причинами: накоплением тепла в мишени, что позволяет снизить пороговое значение плотности энергии, необходимое для расплавления материалов мишени, либо с флуктуацией центра тяжести пучка от импульса к импульсу вдоль длинной стороны автографа, что более вероятно.

При увеличении ширины шин и увеличения расстояния между ними угловые „язычки“, обусловленные близостью шин, т.е. большой величиной напряженности магнитного поля тока, протекающего по шине, практически исчезают; форма пучка становится более оптимальной (рис. 8).

Что касается распределения плотности энергии (тока) по сечению трансформированного пучка, то это будет предметом дальнейших исследований. В настоящий момент очевидно лишь то, что плотность энергии достаточна для оплавления поверхности, а по визуальному восприятию автографа однородность трансформированного пучка по крайней мере не хуже исходного (круглого).

Заключение

В сильноточных электронных источниках аксиально-неоднородное магнитное поле может быть сформировано обратным токопроводом в виде плоских шин или шпилек, прикрепленных к коллектору. За счет этого при транспортировке сильноточного электронного пучка можно осуществлять преобразование формы пучка из круглой в квазипрямоугольную. Во избежание значительных потерь тока данную трансформацию пучка целесообразно осуществлять на коротком отрезке (несколько см) в конце канала транспортировки. Полученные результаты можно использовать в практических целях, когда необходимо с использованием аксиально-симметричной электронной пушки обрабатывать крупногабаритные детали.

Список литературы

- [1] Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.B. // *Laser & Particle Beams*. 2003. Vol. 21. N 2. P. 157–174.
- [2] Raharjo P., Uemura K., Okada A., Uno Y. // *Proc. 7th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. Tomsk, Russia, Juli 25–29, 2004. P. 263–266.
- [3] Rotshtein V.P., Ivanov Yu.F., Markov A.B. et al. // *Surface & Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 6378.
- [4] Uno Y., Okada A., Uemura K. et al. // *Precision Engineering*. 2005. Vol. 29. P. 449–455.
- [5] Григорьев В.П., Коваль Т.В., Ле Ху Зунг // *Изв. вузов. Физика*. 2009. Т. 52. Вып. 11/2. С. 101–106.
- [6] Григорьев В.П., Коваль Т.В., Озур Г.Е. // *ЖТФ*. 2010. Т. 80. Вып. 1. С. 103–109.
- [7] Озур Г.Е., Прокурковский Д.И., Карлик К.В. // *ПТЭ*. 2005. Вып. 6. С. 58–65.