

12

## **О параметрах электронного пучка пушки с плазменным эмиттером**

© С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе, А. Beniyash, N. Murray,  
T. Hassel, C. Ribton

ООО „Элион“, Томск, Россия  
Institute of Materials Science at the Leibniz University of Hannover,  
D-30823, Garbsen, Germany  
TWI Ltd., CB21 6AL, Cambridge, UK  
E-mail: mail@elion-tomsk.ru

*Поступило в Редакцию 15 марта 2013 г.*

Измерена яркость сфокусированного электронного пучка, генерируемого пушкой с плазменным эмиттером. Измерения выполнены для пучка с мощностью до 4 kW и энергией электронов 60 keV, сфокусированного на расстоянии 0.52 m от фокусирующей линзы. Впервые показано, что яркость сфокусированного пучка пушки с плазменным эмиттером не уступает яркости пучков, полученных в термокатодных пушках.

Пушки с плазменным эмиттером, предназначенные для формирования сфокусированных электронных пучков, уже длительное время используются в лучевых технологиях [1,2]. Регулировка тока в таких пушках производится по схеме диодного типа, без специального управляющего электрода. Такая схема управления током имеет известные преимущества [3], которые состоят в том, что при изменении тока электронно-оптические параметры сфокусированного пучка остаются практически стабильными, что не всегда возможно в триодных пушках с накаленным катодом.

Существенный недостаток пушек с плазменным эмиттером, по мнению специалистов в области электронно-лучевого оборудования [4], состоит в том, что пушки этого типа обеспечивают невысокую плотность тока пучка из-за большой температуры эмитированных плазмой электронов. Наши оценки, проведенные на основе известного выражения Ленгмюра, показали, что для типичных параметров плазменного эмиттера минимальный размер сфокусированного электронного пучка не должен превышать нескольких десятков  $\mu\text{m}$  [5]. Однако в экспериментах долгое время такой параметр не достигался. Причиной оказалась недооценка влияния на параметры пучка магнитного поля в промежутке ускорения и дрейфа электронного пучка. Источником этого поля является постоянный магнит разрядной камеры, необходимый для инициирования и горения разряда. После оптимизации поля [6] удалось получить электронные пучки с плотностью мощности около  $10^7 \text{ W/cm}^2$  [5] при относительно небольшой, до 60 keV, энергии электронов.

Информация о возможности получения в пушках с плазменным эмиттером остросфокусированных пучков является важной, однако не исчерпывающей для оценки электронно-оптических параметров пучка. Как минимум, требуется знать яркость пучка. Высокие значения этого параметра позволяют говорить о более широкой, чем варочные технологии, области применения пушек с плазменным эмиттером. Например, перспективной становится разработка на их основе устройств с выводом пучков в атмосферу через газодинамические окна. Кроме того, пушки с высокой яркостью пучка могут быть применены в таких немассовых технологиях, как резка, „сверление“ калиброванных отверстий, создание трехмерных деталей послойной электронно-лучевой наплавкой (FastEBM) и др. И наконец, нельзя забывать о том, что яркость электронного пучка — это не только технический, но и в определенной степени коммерческий (рекламный) параметр, привлекающий дополнительное внимание потребителей к пушкам с плазменным эмиттером. По этой причине важно, чтобы измерения яркости были выполнены корректно и, желательно, не только разработчиками пушек, но и независимыми экспертами.

В наших экспериментах яркость электронного пучка определялась применительно к технологии FastEBM [7]. Эксперименты выполнены на электронно-лучевой установке в Институте материаловедения Ганновского университета им. Лейбница (Германия) (Institute of Material

Science at the Leibniz University of Hannover). В составе установки использованы электронная пушка с плазменным эмиттером и аппаратура питания, изготовленные ООО „Элион“ (Россия) по заказу фирмы Perndorfer Maschinenbau KG (Австрия). Для технологии FastEBM необходимо, чтобы диаметр пучка на расстоянии около 0.5 m от центральной плоскости фокусирующей линзы составлял примерно 200  $\mu\text{m}$ .

Для оценки яркости электронного пучка с гауссовым законом распределения тока по сечению может быть использовано выражение вида [3]

$$B = \frac{J_0}{\Omega}, \quad (1)$$

где  $J_0$  — плотность тока на оси пучка, которая определяется как

$$J_0 = \frac{i_b}{\pi r_f^2}, \quad (2)$$

где  $i_b$  — ток пучка,  $r_f$  — эффективный радиус с пучка в фокусе.

Телесный угол  $\Omega$ , в котором распространяется пучок, при малых значениях угла сходимости  $\theta$  определяется из простого выражения

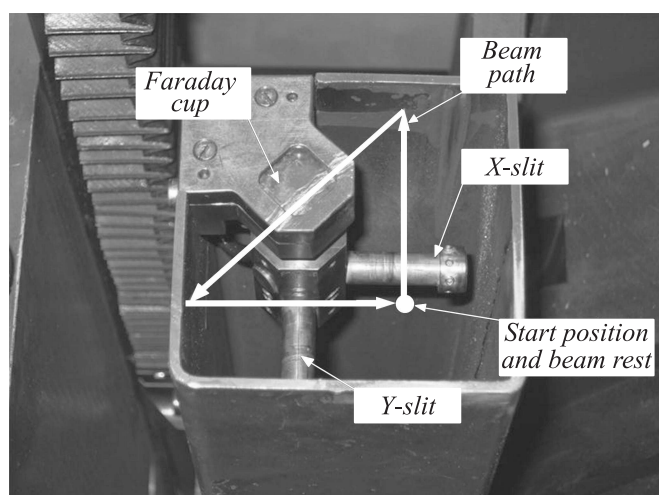
$$\Omega = \pi\theta^2. \quad (3)$$

В этом случае выражение (1) с учетом (2) и (3) преобразуется к виду

$$B = \frac{i_b}{\pi^2 r_f^2 \theta^2}. \quad (4)$$

По экспериментально полученным значениям  $r_f$  и  $\theta$  с использованием выражения (4) выполнены расчеты яркости электронного пучка пушки с плазменным эмиттером. Для измерения угла сходимости и радиуса сфокусированного пучка пушка размещалась неподвижно на вакуумной установке.

Принцип действия пушки основан на эмиссии электронов из плазмы газового разряда под действием высоковольтного электрического поля. Эмитирующая плазма создается в низковольтном отражательном разряде с полым катодом [8]. Разряд этого типа содержит два противостоящих катода, в одном из которых имеется полость, представляющая собой электростатическую ловушку для электронов, в другом — эмиссионное отверстие. Для увеличения пробега электронов между катодами создается магнитное поле с индукцией около 0.08 Т.



**Рис. 1.** Внешний вид измерительного комплекса.

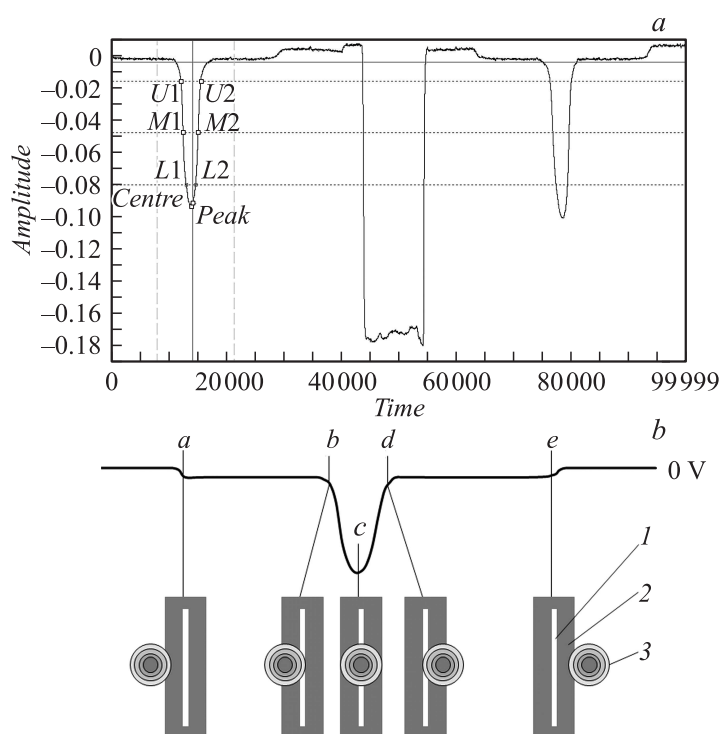
Давление плазмообразующего газа (воздух) в разрядной камере выше, чем в вакуумной установке, и составляет примерно  $1 \cdot 10^{-2}$  mbar. Повышенное давление в разрядной камере создается дозированным напуском газа с величиной около 0.25–0.33 sccm. Разряд горит в непрерывном режиме с напряжением 350–400 V и током от 0.1 до 1.5 A. Такие параметры разряда позволяют получать электронный пучок с током от единиц до нескольких сотен миллиампер.

Эмиссия электронов из плазмы происходит через отверстие в катоде в область ускоряющего поля между этим катодом и заземленным высоковольтным анодом. Ускоренный электронный пучок, как и в термокатодной пушке, в эквипотенциальном пространстве фокусируется магнитной линзой и отклоняется магнитными катушками.

Для измерения диаметра электронного пучка использовался измерительный комплекс (рис. 1), разработанный в компании TWI Ltd. (Кембридж, Великобритания).

Измерительный комплекс включал следующие основные элементы.

1. Зонд, содержащий два расположенных под углом  $90^\circ$  датчика тока электронов, в каждом из которых выполнена узкая щель. Датчики



**Рис. 2.** Типичный вид сигналов с датчиков и цилиндра Фарадея (а) и сигнала при пересечении электронным пучком плоскости одного датчика со щелью (b): 1 — щель; 2 — датчик; 3 — сечение электронного пучка.

позволяют измерять ширину электронного пучка по двум координатам —  $X$  и  $Y$ .

2. Цилиндр Фарадея, предназначенный для измерения тока пучка независимо от приборов, установленных в аппаратуре электропитания электронной пушки. Цилиндр Фарадея конструктивно и электрически соединен с датчиками.

3. Коллектор, способный длительное время выдерживать воздействие электронного пучка мощностью до 40 kW.

4. Система сбора и обработки экспериментальных данных.

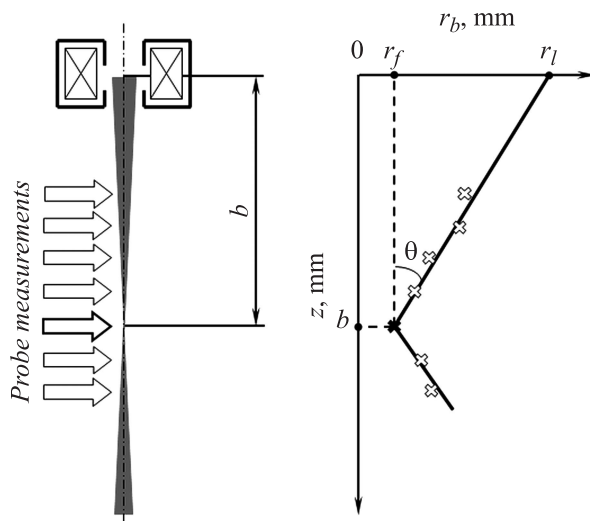


Рис. 3. Иллюстрация методики расчета угла сходимости.

Принцип действия измерительного комплекса заключается в следующем. Зонд и цилиндр Фарадея устанавливаются на необходимом расстоянии от фокусирующей линзы. Электронный пучок фокусируется в плоскости зонда и разворачивается. По мере движения (рис. 1) электронный пучок последовательно пересекает датчик с X-щелью, цилиндр Фарадея и датчик с Y-щелью. Траектория развертки пучка представляет собой треугольник.

Сигнал с цилиндра Фарадея и датчиков передается в систему сбора и обработки экспериментальных данных. Типичный вид полученного сигнала изображен на рис. 2, а.

Для точного измерения ширины пучка по обеим координатам необходимым условием является неизменность скорости (частоты) развертки пучка.

Момент появления и форма сигнала датчика поясняются схемой, приведенной на рис. 2, б. Точки *a* и *e* схемы соответствуют моменту времени первого и последнего контакта пучка с датчиком. Промежуток времени между точками *a* и *e* на сигнале пропорционален ширине датчика. В момент времени, соответствующий точкам *b* и *d*, пучок

Характеристики электронного пучка пушки с плазменным эмиттером

Ток пучка, mA	Диаметр пучка в линзе, mm	Диаметр пучка в фокусе, mm	Угол сходимости, $10^{-3}$ rad	Яркость, $10^{10}$ A · m <sup>-2</sup> · sr <sup>-1</sup>
10	2.18	0.55	1.6	0.5
20	1.90	0.56	1.5	1.2
40	3.18	0.58	2.5	0.8
60	3.06	0.46	2.7	1.6

проникает в щель своей периферийной частью. В точке  $c$  через щель проходит центральная (осевая) часть пучка.

Методика измерения угла сходимости и радиуса сфокусированного электронного пучка заключалась в следующем.

Зонд перемещался вдоль оси пучка и фиксировался на расстоянии  $b$  от центральной плоскости фокусирующей линзы (рис. 3). Это расстояние по условиям измерений равнялось 520 mm. При постоянных значениях тока пучка и ускоряющего напряжения пучок фокусировался линзой так, чтобы в плоскости зонда был острый фокус. Радиус сфокусированного электронного пучка  $r_f$ , прошедшего через щель, определялся на полувысоте распределения тока.

Далее, при постоянном токе фокусирующей линзы (фиксированном положении плоскости острого фокуса) перемещением зонда вдоль оси пучка определялся радиус пучка  $r_b$  в других плоскостях. Полученный таким образом профиль пучка вдоль оси  $z$  аппроксимировался линейной зависимостью вида

$$r_b = az + r_l, \quad (5)$$

где  $a = \tan(\theta)$ ,  $z$  — координата зонда вдоль оси распространения пучка;  $r_l$  — радиус пучка в фокусирующей линзе.

С использованием выражения (5) и условия  $z = 0$  определялся радиус пучка в линзе. По известным значениям  $r_l$  и  $r_f$  рассчитывался угол сходимости электронного пучка

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{r_l - r_f}{b} \right). \quad (6)$$

По результатам измерений рассчитывалась яркость электронного пучка для токов от 10 до 60 mA. В эксперименте поддерживались

постоянными ускоряющее напряжение ( $U_{acc} = 60 \text{ kV}$ ), расход плазмообразующего газа ( $Q = 0.3 \text{ sccm}$ ) и положение плоскости фокусировки электронного пучка ( $b = 520 \text{ mm}$ ).

В таблице представлены результаты измерений диаметра сфокусированного электронного пучка, а также рассчитанные по выражениям (4)–(6) яркость, диаметр пучка в линзе и угол сходимости.

Из таблицы следует, что яркость электронного пучка в пушках с плазменным эмиттером составляет около  $1 \cdot 10^{10} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ , что соответствует яркости электронных пучков, полученных с помощью термокатодных пушек с катодом из  $\text{LaB}_6$  [4].

Таким образом, впервые показано, что пушки с плазменным эмиттером могут формировать сфокусированные электронные пучки с яркостью, не меньшей, чем яркость пучка в термокатодных пушках.

## Список литературы

- [1] *Osipov I.V., Rempe N.G.* // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71. N 4. P. 1638–1641.
- [2] *Rempe N., Kornilov S., Beniyash A., Hassel T.* // Welding and Cutting. 2012. V. 11. N 2. P. 122–127.
- [3] *Molokovsky S.I., Sushkov A.D.* Intense electron and ion beams. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [4] *Кайдалов А.А.* Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Киев: Экотехнология, 2004 (*Kaydalov A.A.* Electron beam welding and related technologies. Kiev: Ekotekhnologiya, 2004).
- [5] *Корнилов С.Ю., Осипов И.В., Ремпе Н.Г.* // ПТЭ. 2009. № 3. С. 104–109 (*Kornilov S.Yu., Osipov I.V., Rempe N.G.* // Instr. Exp. Tech. 2009. V. 52. N 3. P. 406–411).
- [6] *Корнилов С.Ю., Ремпе Н.Г.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 2. С. 79–84.
- [7] *Ribton C.N.* // Lectures of second International Electron Beam Welding Conference. Aache, Germany, March 26–30, 2012. P. 148–151.
- [8] *Галанский В.Л., Груздев В.А., Осипов И.В., Ремпе Н.Г.* // Изв. вузов. Физика. 1992. № 5. С. 5–23 (*Galanskii V.L., Gruzdev V.A., Osipov I.V., Rempe N.G.* // Russian Physics Journal. 1992. V. 35. N 5. P. 401–416).