

12;15

Особенности фокусировки электронного пучка плазменного источника в форвакуумном диапазоне давлений

© А.А. Зенин, И.Ю. Бакеев, Ю.А. Бурачевский, А.С. Климов,
Е.М. Окс

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники
E-mail: zenin1988@gmail.com

Поступило в Редакцию 29 ноября 2015 г.

В результате исследований особенностей фокусировки электронных пучков, генерируемых форвакуумным плазменным источником в области давлений 10–30 Па, показана принципиальная возможность получения пучков субмиллиметровых размеров. При диаметре электронного пучка 0.6 мм плотность мощности пучка составила 10^5 W/cm². Достигнутые параметры пучка открывают возможность прецизионной электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов, в частности высокотемпературных алюмооксидных керамик.

Плазменные источники электронов [1], несмотря на высокую по сравнению с термокатодом температуру эмитированных электронов, благодаря большей плотности тока эмиссии обеспечивают плотность мощности и яркость сфокусированных пучков, сравнимые с термокатодными электронными источниками. Оптимизация геометрии ускоряющего промежутка и параметров электронных источников с плазменным катодом позволяет фокусировать электронные пучки до диаметров, менее 1 мм [2], делая их привлекательными для электронно-лучевой сварки [3] и ряда других применений, требующих точного электронно-лучевого воздействия с высокой плотностью мощности.

Переход плазменных источников электронов в форвакуумную область давлений [4] сделал возможным электронно-лучевую обработку диэлектрических материалов, включая сварку керамических изделий [5], а также сварку металла с керамикой [6]. Эффективность прецизионной обработки электронными пучками диэлектриков во многом связана с возможностью формирования в области повышенных давлений фор-

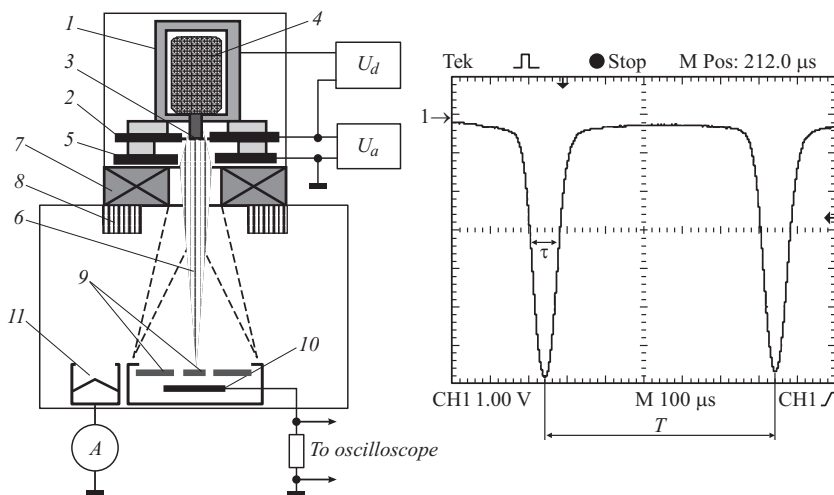


Рис. 1. Экспериментальная установка (а) и характерная осциллограмма для измерения диаметра пучка (b): 1 — полый катод, 2 — анод, 3 — эмиссионный электрод, 4 — плазма, 5 — ускоряющий электрод (экстрактор), 6 — электронный пучок, 7 — фокусирующий соленоид, 8 — система отклонения, 9 — верхняя пластина с двумя щелями, 10 — токоприемная пластина, 11 — цилиндр Фарадея.

вакуумного диапазона сфокусированных пучков. Особенности процессов фокусировки электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником, представляли собой задачу исследований, результаты которых приведены в данной статье.

Экспериментальная установка схематично представлена на рис. 1. В экспериментах использовался форвакуумный плазменный источник электронов на основе разряда с полым катодом. Принцип работы источника подробно описан в [7]. Для более эффективной фокусировки, так же как и для плазменных источников электронов, функционирующих в традиционной области давлений 10^{-2} – 10^{-1} Па [1–3], отбор электронов из плазмы осуществлялся через одиночный эмиссионный канал. В данном случае диаметр и протяженность эмиссионного канала составляли 0.75 и 1 мм соответственно. При ускоряющем напряжении до 20 кВ и давлении рабочего газа (гелия) 10–30 Па источник

обеспечивал генерацию непрерывного электронного пучка с током в десятки мА. Ускоренный электронный пучок фокусировался магнитным полем соленоида 7 и транспортировался на расстояние 20 см. Для развертки электронного пучка от оси использовалась система отклонения 8, представляющая собой квадратную четырехполюсную магнитную отклоняющую катушку с магнитным сердечником.

Измерение диаметра пучка проводилось методом „отклонения“, общий принцип которого описан в [1]. При подаче на электромагнитную отклоняющую катушку синусоидального напряжения амплитудой 12 V и частотой 50 Hz производилась развертка пучка в прямую линию. Электронный пучок, отклоняясь от оси, поочередно пересекал две протяженные щели, выполненные в верхней пластине 9 системы измерения диаметра пучка. Ширина щелей составляла 0.2 mm, а расстояние между — 5.6 mm. При пересечении щелей электронным пучком на пластине 10 регистрировался токовый сигнал. Характерная осциллограмма этого сигнала представлена на рис. 1.

Диаметр пучка d определялся из простого соотношения:

$$d = \frac{l\tau}{T}, \quad (1)$$

где l — расстояние между щелями, T — время между центрами двух соседних пиков, τ — ширина пика на полувывоте (рис. 1, b). Измерение полного тока пучка проводилось при его отклонении на цилиндр Фарадея 11, смещенный от оси на расстояние 40 mm.

Зависимости диаметра пучка электронов от ускоряющего напряжения и тока в пучке при различных давлениях газа приведены на рис. 2, a и b соответственно. Видно (рис. 2, b), что с увеличением ускоряющего напряжения диаметр пучка уменьшается. Аналогичное влияние энергии ускоренных электронов на условия фокусировки пучка наблюдалось как при более низких ($p < 0.1$ Pa) [8], так и при более высоких ($p > 100$ Pa) давлениях [9]. По-видимому, увеличение энергии электронов в пучке ослабляет процессы электростатического расталкивания электронов в области низких давлений и снижает рассеяние электронов при более высоких давлениях.

Для форвакуумных плазменных источников электронов влияние тока пучка на его диаметр имеет свои отличительные особенности. Как правило, увеличение тока пучка негативно сказывается на его фокусировке, приводя к увеличению минимального диаметра пучка [8,9].

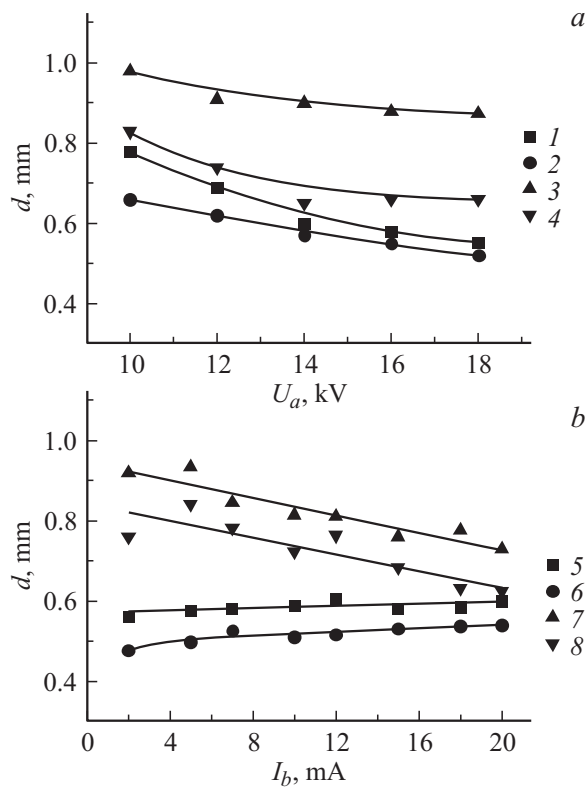


Рис. 2. Зависимость диаметра пучка от ускоряющего напряжения (*a*) и тока в пучке (*b*) (1 — 5 мА, 10 Па; 2 — 15 мА, 10 Па; 3 — 5 мА, 30 Па; 4 — 15 мА, 30 Па; 5 — 14 кВ, 10 Па; 6 — 18 кВ, 10 Па; 7 — 14 кВ, 30 Па; 8 — 18 кВ, 30 Па).

В условиях эксперимента при давлении 10 Па ток электронов практически не влиял на диаметр пучка, а при давлении 30 Па увеличение тока даже приводило к небольшому уменьшению диаметра (рис. 2, *b*). Одна из возможных причин уменьшения диаметра пучка при больших токах может быть связана с дополнительной фокусировкой пучка в результате искажения ускоряющего поля, вызванного проникновением пучковой плазмы в ускоряющий промежуток. Генерация плотной пучковой плазмы и ее заметное влияние на эмиссионные свойства плазмы

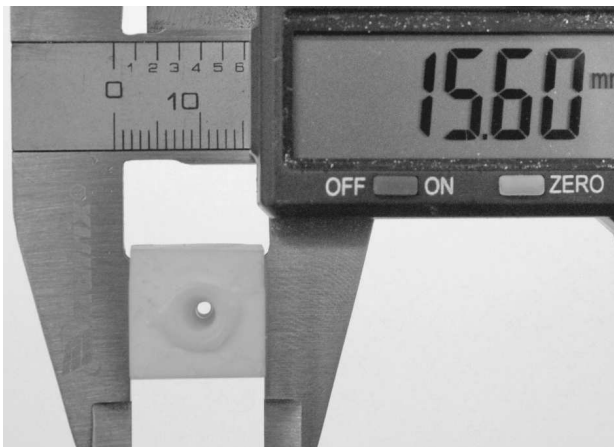


Рис. 3. Отверстие в алюмооксидной керамике, прожженное электронным пучком (ускоряющее напряжение 18 kV, ток в пучке 15 mA).

и условия формирования электронного пучка представляет собой одну из характерных особенностей форвакуумных плазменных источников электронов.

Уменьшение диаметра пучка по мере увеличения тока может быть также обусловлено сжатием пучка собственным магнитным полем пучка. На важность учета собственного магнитного поля электронного пучка, генерируемого плазменным источником в области более низких давлений, указывалось также в [10].

В области более высоких давлений за пределами форвакуумного диапазона увеличение тока пучка всегда приводит к росту его диаметра. Вероятно, в этой области давлений процессы расширения пучка в результате рассеяния электронов на остаточном газе преобладают над фокусировкой пучка собственным магнитным полем.

Увеличение диаметра пучка с повышением давления газа ожидаемо, и оно может быть связано с рассеянием электронов на молекулах остаточного газа. Тем не менее несмотря на более высокие давления, как видно из результатов экспериментов, представленных на рис. 2, даже в этих условиях форвакуумный плазменный источник электронов

обеспечивает возможность фокусировки электронных пучков до субмиллиметровых размеров. При этом плотность мощности электронного пучка в кроссовере достигает 10^5 W/cm².

В форвакуумной области давлений плотность мощности электронного пучка, а следовательно, и его яркость, в 3–4 раза ниже соответствующих параметров электронного пучка, генерируемого плазменными источниками в традиционной области давлений 10^{-2} – 10^{-1} Pa [1–3]. Однако достигнутый в форвакуумных плазменных источниках уровень плотности мощности электронного пучка оказывается достаточным для прецизионной обработки диэлектриков, в частности высокотемпературной керамики. На рис. 3 в качестве демонстрационного примера приведен результат использования форвакуумного плазменного источника электронов для прожигания отверстия в 1.5-см кубике из алюмооксидной керамики.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о возможности эффективной фокусировки электронных пучков, генерируемых плазменным источником электронов в области повышенных давлений форвакуумного диапазона. Достигнутая плотность мощности пучка достаточна для размерной обработки высокотемпературных керамик.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 15-08-00871-а) и грантом Министерства образования РФ (проект № 3.49.2014/К). Е.М. Окс является исполнителем работы в рамках государственного задания Минобрнауки „Организация и проведение научных исследований“, проект № 783.

Список литературы

- [1] Корнилов С.Ю., Ремне Н.Г., Beniyash A., Murray N., Hassel T., Ribton C. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 19. С. 1–8.
- [2] Корнилов С.Ю., Ремне Н.Г. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 2. С. 79–84.
- [3] Корнилов С.Ю., Осипов И.В., Ремне Н.Г. // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 3. С. 104–109.
- [4] Бурдовицин В.А., Климов А.С., Медовник А.В., Окс Е.М., Юшков Ю.Г. Форвакуумные плазменные источники электронов. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2014. 288 с.
- [5] Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 11. С. 61–66.

- [6] *Зенин А.А., Климов А.С.* // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2013. № 1 (27). С. 10–13.
- [7] *Бурдовицин В.А., Жирков И.С., Окс Е.М., Осипов И.В.* // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 66–68.
- [8] *Корнилов С.Ю., Осипов И.В., Ремпе Н.Г.* // Труды III Международного Крейнделевского семинара „Плазменная эмиссионная электроника“ (ПЭЭ’2009). 23–30 июня 2009. Улан-Удэ, Республика Бурятия: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. С. 112–117.
- [9] *Головин А.И., Голубев М.М., Егорова Е.К., Туркин А.В., Шлойдо А.И.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 5. С. 41–45.
- [10] *Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 1. С. 44–48.