

## О возможности прецизионной электронно-лучевой обработки протяженных диэлектрических изделий плазменным источником электронов в форвакууме

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

*Представлены результаты исследований особенностей процессов отклонения и развертки сфокусированного электронного пучка, генерируемого плазменным источником электронов в области повышенных давлений форвакуумного диапазона. Показано, что во всех исследуемых диапазонах давлений и расстояний от отклоняющей системы в пределах угла отклонения электронного пучка в 20 градусов плотность мощности пучка снижается лишь на 20 %. На примере фрезеровки кварцевого стекла продемонстрирована возможность эффективной прецизионной электронно-лучевой обработки диэлектриков.*

*Ключевые слова:* плазменный источник электронов, остросфокусированный пучок, форвакуумный диапазон давлений, электронно-лучевая обработка диэлектриков.

### Введение

Взаимодействие ускоренных электронов с материалом связано с тепловыми процессами, при которых энергия пучка электронов, обычно возникающих и транспортируемых в вакууме, преобразуется в нагрев обрабатываемой мишени [1]. Достижение здесь в результате фокусировки электронного пучка высокой плотности мощности в локальной области наряду с возможностью его быстрого позиционирования обеспечивает эффективную прецизионную электронно-лучевую обработку изделий, включая сверление отверстий, фрезерование пазов и щелей сложной конфигурации и др. [2]. Однако непосредственная прецизионная электронно-лучевая обработка диэлектрических материалов в достаточно глубоком вакууме (с остаточным давлением в сотые доли паскаля и менее) затруднена необходимостью принятия спе-

циальных мер для нейтрализации зарядки электронным пучком электрически непроводящей поверхности диэлектрика [3]. С другой стороны, существующие т. н. форвакуумные плазменные источники электронов способны генерировать электронные пучки в области повышенных давлений, а именно, от единиц до сотен паскалей [4]. Создаваемая при таких давлениях пучковая плазма практически полностью нейтрализует процессы зарядки ускоренным электронным пучком диэлектрической поверхности [5]. Можно ожидать, что в этих условиях электронный пучок окажется способен обрабатывать диэлектрики так же эффективно, как и изделия из металлов и их сплавов [6–9].

При формировании и транспортировке электронного пучка в области повышенных давлений необходимо учитывать рассеяние пучка на молекулах остаточной газовой атмосферы. Такой процесс, несомненно, затрудняет эффективную фокусировку электронного пучка (по сравнению с вакуумом). Несмотря на определенные трудности, ранее нам удалось сфокусировать электронный пучок до диаметра 0,6 мм и обеспечить плотность его мощности на уровне  $10^4$ – $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Достигнутая величина плотности мощности оказалось достаточной, например, для «сверления» отверстий в высокотемпературной керамике [10].

Дальнейшее развитие указанного метода использования форвакуумных плазменных источников электронов связано с тем, что электронно-лучевая прецизионная обработка протяженных изделий с развитой поверхностью обуславливает

**Бакеев Илья Юрьевич**<sup>1</sup>, младший научный сотрудник.

**Зенин Алексей Александрович**<sup>1</sup>, старший научный сотрудник, к. т. н.

**Климов Александр Сергеевич**<sup>1</sup>, старший научный сотрудник, д. т. н.

**Окс Ефим Михайлович**<sup>1,2</sup>, заведующий кафедрой, профессор, д. т. н.

<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. +7 (953) 923-17-26. E-mail: bakееv@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 5 мая 2017 г.

необходимость развертки электронного пучка на достаточно большие углы. Для достижения высокого качества размерной электронно-лучевой обработки требуется сохранение удельных параметров воздействия электронного пучка при его отклонении.

Поскольку электронная обработка диэлектриков, как уже сказано, наиболее эффективна при повышенных давлениях, то это стимулировало постановку специальных исследований особенностей процессов развертки и позиционирования электронных пучков, генерируемых форвакуумными плазменными источниками. Это и составило основную цель данной работы. Практические задачи проведенных работ были направлены на демонстрацию возможности непосредственной электронно-лучевой размерной обработки диэлектрических образцов. Результаты проведенных исследований изложены в настоящей статье.

### Схема и методика проведения эксперимента

Схема экспериментальной установки и методики проведения эксперимента приведены на

рис. 1. Для генерации электронного пучка *1* использовался форвакуумный плазменный источник электронов *2*, принцип работы которого основан на эмиссии электронов из плазмы тлеющего разряда с полым катодом. Параметры электронного пучка, используемые в эксперименте: ускоряющее напряжение  $U_a = 16$  кВ, ток пучка  $I_b = 5$  мА, давление газа в вакуумной камере регулировалось непосредственной подачей рабочего газа и для гелия составляло  $P = 30$  Па, для воздуха –  $P = 6-8$  Па. Более подробно конструкция и особенности функционирования такого источника электронов изложены в [11, 12].

Фокусировка электронного пучка обеспечивалась магнитной линзой *3*. При помощи отклоняющей системы *4*, состоящей из двух пар магнитных катушек, осуществлялось отклонение пучка от первоначального направления. Управление токовым сигналом отклоняющей системы производилось электронной системой формирования и отклонения электронного пучка, спроектированной и изготовленной в ООО «НПК ТЭТа» [13] для установок электронно-лучевой сварки.

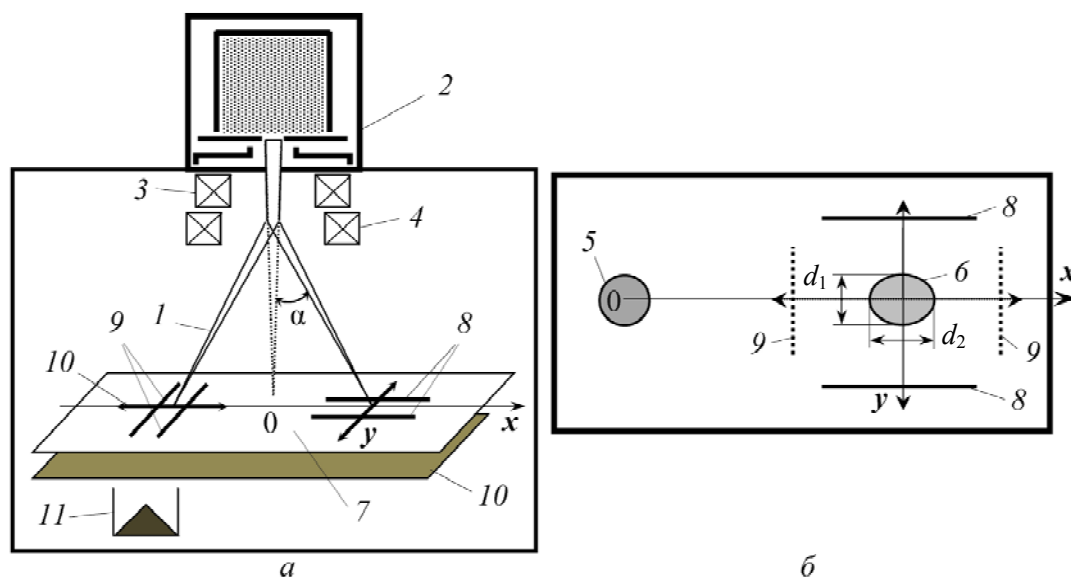


Рис. 1. Схема эксперимента и иллюстрация методики измерения пучка (а – схема измерения размеров поперечного сечения пучка; б – плоскость измерения пучка (вид сверху): 1 – электронный пучок; 2 – форвакуумный плазменный источник электронов; 3 – фокусирующая магнитная линза; 4 – отклоняющая система; 5 – форма сечения и положение электронного пучка без отклонения; 6 – форма сечения и положение электронного пучка при отклонении на угол  $\alpha$ ; 7 – горизонтальная пластина системы измерения размера пучка; 8 – пара щелей для измерения минимального размера пучка  $d_1$ ; 9 – пара щелей для измерения максимального размера пучка  $d_2$ ; 10 – токоприемный коллектор; 11 – цилиндр Фарадея;  $x, y$  – направления отклонения пучка.

Исследование изменения размеров поперечного сечения электронного пучка при его отклонении на угол  $\alpha$  (см. рис. 1, а) проводилось методом «отклонения» [14]. Поскольку при отклонении пучка форма его поперечного сечения, в общем

случае, может изменяться от круглой (при  $\alpha = 0$  фигура 5 на рис. 1, б) до овальной (при  $\alpha > 0,6$  радиан, фигура 6 на рис. 1, б), то для описания изменения размеров пучка были выбраны два параметра, а именно: минимальный  $d_1$  и максимальный  $d_2$

поперечные размеры пучка, измеренные во взаимно перпендикулярных направлениях (см. рис. 1, б). Измерения проводились следующим образом: электронный пучок фокусировался на пластине 7, расположенной перпендикулярно распространению пучка, а затем отклонялся на угол  $\alpha$  вдоль оси  $x$  (рис. 1, а) от своего первоначального положения. Под действием отклоняющей системы электронный пучок последовательно пересекал одну из двух пар узких измерительных щелей 8, 9 шириной 0,2 мм, расположенных на специальном устройстве перемещения. Одна пара щелей располагалась вдоль оси  $x$ , другая – перпендикулярно ей по оси  $y$ . Электроны пучка, прошедшие сквозь щели, принимались коллектором 10, токовый сигнал с которого подавался на осциллограф. При пересечении пучком щелей 8, расположенных вдоль  $x$ , определялся размер пучка  $d_1$ . Соответственно размер  $d_2$  определялся при пересечении пары щелей 9 вдоль оси  $y$ . Величины  $d_1$  и  $d_2$  оценивались как

$$d_{1,2} = \frac{L \times \tau}{T}, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между щелями,  $T$  – временной интервал между амплитудными значениями сигналов на осциллограмме,  $\tau$  – ширина пика на осциллограмме на полувысоте.

### Результаты экспериментов

При воздействии сфокусированного электронного пучка на протяженную плоскую поверхность по мере отклонения от перпендикулярной оси кроссовер пучка отдалается от обрабатываемой поверхности. Для устранения этого негативного эффекта и достижения максимальных удельных параметров воздействия электронного пучка в экспериментах при изменении угла отклонения проводилась постоянная корректировка фокусного расстояния. Проекция поперечного размера электронного пучка на плоскую поверхность вдоль направления отклонения  $d_2$  также изменяется по мере увеличения угла отклонения. Но как показывают простые геометрические построения, например, при отклонении пучка на 20 градусов этот размер пучка увеличится лишь на 8 процентов.

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты измерения размера пучка в двух проекциях  $d_1$  и  $d_2$  по мере увеличения угла отклонения. Приведенная на графике зависимость  $d_2$  от  $\alpha$  связана с увеличением размера проекции пучка на плоскую поверхность и в исследуемых пределах не превышает 10 процентов, в то время как размер пучка  $d_1$  остается практически неизменным.

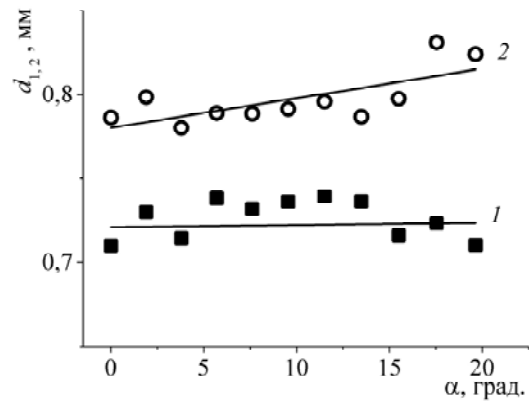


Рис. 2. Зависимости размера пучка по двум проекциям от угла отклонения  $\alpha$ : 1 – размер пучка  $d_1$ ; 2 – размер пучка  $d_2$ ; ускоряющее напряжение  $U_a = 16$  кВ, ток пучка  $I_b = 5$  мА, давление  $P = 30$  Па, рабочий газ – гелий.

На рис. 3 представлены зависимости плотности мощности пучка  $q$  от угла отклонения при различных давлениях газа и расстояниях от отклоняющей системы. При этом плотность мощности оценивалась исходя из известных значений параметров пучка и измеренных размеров пучка:

$$q = \frac{4 \times U_a \times I_b}{\pi \times d_1 \times d_2}, \quad (2)$$

где  $U_a$  – ускоряющее напряжение;  $I_b$  – ток пучка;  $d_1, d_2$  – размеры пучка.

Как было показано нами ранее в работе [10], одной из ключевых причин уширения пучка при распространении в форвакуумной области давлений является рассеяние электронов на молекулах остаточного газа, что непосредственно приводит к снижению плотности мощности пучка. Причем наиболее существенно влияние остаточного газа проявляется на воздухе (рис. 3, а): при изменении давления с 6 до 8 Па наблюдается падение плотности мощности пучка более чем в 4 раза. Заметное уменьшение плотности мощности наблюдается при увеличении расстояния от отклоняющей системы (см. рис. 3, б): по мере удаления с 15 до 22 см плотность мощности снижается почти в два раза, что также может быть объяснено рассеянием электронов с увеличением пройденного электронами пути и, тем самым, большим количеством актов рассеяния каждого электрона по мере распространения. Однако из всех этих зависимостей видно, что, несмотря на процессы рассеяния электронов на молекулах остаточного газа в области повышенных давлений форвакуумного диапазона, уменьшение плотности мощности пучка не превышает 20 процентов по мере отклонения пучка в пределах 20 градусов во всех указанных диапазонах давлений и расстояний от отклоняющей системы.

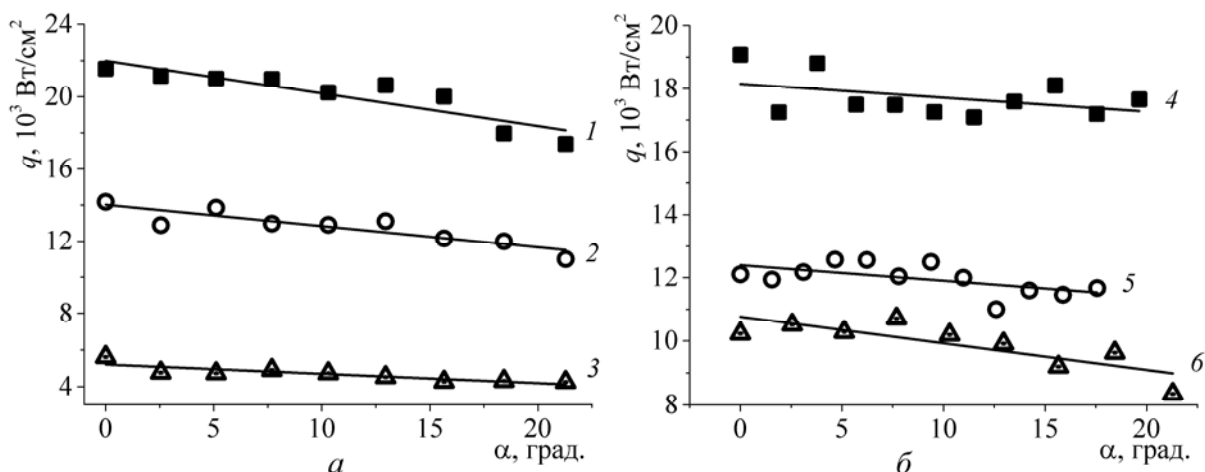


Рис. 3. Зависимости плотности мощности электронного пучка от угла отклонения  $\alpha$ : а) – при различных давлениях газа  $P$ : 1 –  $P = 6$  Па; 2 –  $P = 7$  Па; 3 –  $P = 8$  Па; (параметры:  $U_a = 16$  кВ,  $I_b = 5$  мА,  $h = 22$  см, рабочий газ – воздух); б) – при различных расстояниях от отклоняющей системы  $h$ : 4 –  $h = 15$  см; 5 –  $h = 18$  см; 6 –  $h = 22$  см (параметры:  $U_a = 16$  кВ,  $I_b = 5$  мА,  $P = 30$  Па, рабочий газ – гелий).

### Практические работы

В форвакуумной области давлений продемонстрированное относительно небольшое снижение плотности мощности сфокусированного электронного пучка при его отклонении открывает возможность применения такого пучка для поверхностной гравировки и фрезерования протяженных плоских поверхностей высокотемпературных диэлектрических материалов. В качестве демонстрационного примера на рис. 4 приведен результат фрезерования электронным пучком сложного профиля на плоской пластине из кварцевого стекла толщиной 4 мм.



Рис. 4. Образец фрезерования сложного профиля электронным пучком в кварцевом стекле.

### Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о возможности эффективной преци-

зионной обработки высокотемпературных диэлектриков электронными пучками, генерируемыми плазменными источниками электронов в области повышенных давлений форвакуумного диапазона. Показано, что во всех исследуемых диапазонах давлений и расстояний от отклоняющей системы в пределах угла отклонения электронного пучка в 20 градусов плотность мощности пучка снижается лишь на 20 %. На примере фрезеровки кварцевого стекла продемонстрирована возможность эффективной прецизионной электронно-лучевой обработки диэлектриков.

Исследования процессов фокусировки пучка поддержано грантом РФФИ № 17-08-00239 а. Эксперименты по оптимизации параметров электронного пучка, а также по размерной обработке электронным лучом кварцевого стекла проводились при поддержке гранта РФФИ № 16-38-60032 мол\_а\_дк.

Е.О. является исполнителем госзадания 3.6441.2017/6.7 «Организация проведения научных исследований»

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рыкалин Н. Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978.
2. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В., Кокора А. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985.
3. Филачев А. М., Фукс Б. И. // Прикладная физика. 1996. № 3. С. 39.
4. Бурдовицин В. А., Климов А. С., Медовник А. В., Окс Е. М., Юшков Ю. Г. Форвакуумные плазменные источники электронов. – Томск: Изд-во Томского университета, 2014.

5. Бурдовитсин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 11. С. 61.
6. Burdovitsin V. A., Klimov A. S., Medovnik A. V., Oks E. M. // Plasma Sources Science and Technology. 2010. Vol. 19. No. 5. P. 055003.
7. Медовник А. В., Бурдовитсин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 3. С. 39.
8. Гореев А. К., Бурдовитсин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Перспективные материалы. 2012. № 3. С. 77.
9. Зенин А. А., Климов А. С. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2013. № 1 (27). С. 10.
10. Зенин А. А., Бакеев И. Ю., Бурачевский Ю. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 13. С. 104.
11. Зенин А. А., Климов А. С., Бурдовитсин В. А., Окс Е. М. // ЖТФ. 2013. Т. 39. № 10. С. 9.
12. Бурдовитсин В. А., Жирков И. С., Окс Е. М., Осипов И. В. // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 66.
13. ТЭТА [Электронный ресурс]: официальный сайт ООО «НПК ТЭТА». URL: <http://tetacom.ru/> (дата обращения: 26.04.2017).
14. Kaur A., Ribton C., Balachandaran W. // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 221. P. 225.

PACS: 52.59.Tb

## On the possibility of precision electron-beam processing of extended dielectric products by a plasma source of electrons in the forevacuum

*I. Yu. Bakeev<sup>1</sup>, A. A. Zenin<sup>1</sup>, A. S. Klimov<sup>1</sup>, and E. M. Oks<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 Lenina av., 634050, Tomsk, Russia  
E-mail: [bakeeviyu@mail.ru](mailto:bakeeviyu@mail.ru)

<sup>2</sup> Institute of High Current Electronics, SB RAS  
2/3 Akademicheskoy av., 634055, Tomsk, Russia

*Received May 5, 2017*

***The results of investigations devoted to the features of deviation and scanning processes of a focused electron beam generated by the plasma electron source in the forevacuum pressure range are presented. It is shown that the beam power density is reduced by only 20 % within deviation angle of the electron beam of 20 degrees in all investigated ranges of pressures and distances from the deviation system. The possibility of effective precision electron-beam processing of dielectrics is demonstrated using the example of quartz glass cutting.***

***Keywords:*** plasma electron source, narrow focused beam, forevacuum pressure range, electron-beam treatment of dielectrics.

### REFERENCES

1. N. N. Rykalin, *Fundamentals of Electron-Beam Treatment of Materials* (Mashinostroenie, Moscow, 1978) [in Russian].
2. N. N. Rykalin, A. A. Uglov, I. V. Zuev, A. N. Kokora, *Laser and Electron-Beam Processing of Materials* (Mashinostroenie, Moscow, 1985) [in Russian].
3. A. M. Filachev and B. I. Fouks, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 39 (1996).
4. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, E. M. Oks, and Yu. G. Yushkov, *Forevacuum Plasma Electron Sources* (Izd. Tomsk. Univer., Tomsk, 2014) [in Russian].
5. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Tech. Phys. Lett.* **35** (6), 511 (2009).
6. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, and E. M. Oks, *Plasma Sources Science and Technology* **19**, 055003 (2010).
7. A. V. Medovnik, V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Fiz. Khim. Obrab. Mater.* **3**, 39 (2010).
8. A. K. Goreev, V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Inorganic Materials: Applied Research*. **3** (5), 446 (2012).
9. A. A. Zenin and A. S. Klimov, *Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Sistem Upravleniya I Radioelektroniki*, No. 1, 10 (2013).
10. A. A. Zenin, I. Y. Bakeev, Y. A. Burachevskii, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Technical Physics Letters* **42** (7), 712 (2016).
11. A. A. Zenin, A. S. Klimov, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, *Technical Physics Letters* **39** (5), 454 (2013).
12. V. A. Burdovitsin, I. S. Zhirkov, E. M. Oks, I. V. Osipov, and M. V. Fedorov, *Instruments and Experimental Techniques* **48** (6), 761 (2005).
13. TETA [Electronic resource]: Official Site of LTD «SPC TETA». URL: <http://tetacom.ru/>
14. A. Kaur, C. Ribton, and W. Balachandaran, *Journal of Materials Processing Technology* **221**, 225 (2015).