

Распределение потенциала по поверхности борсодержащей непроводящей мишени при облучении электронным пучком в форвакууме

Д. Б. Золотухин, А. В. Тюньков, Ю. Г. Юшков

Представлены результаты экспериментов по исследованию взаимодействия электронного пучка с поверхностью непроводящей мишени в форвакуумной области давлений (1–10 Па). Показано, что распределение потенциала существенно зависит от энергии пучка, давления газа и плотности тока электронного пучка на мишень. На основе численного моделирования анализируется эволюция распределения потенциала на поверхности мишени при изменении профиля распределения плотности тока пучковых электронов.

Ключевые слова: потенциал изолированной мишени, форвакуумный диапазон давлений, плазменный катод, электронный пучок.

Введение

Электронно-лучевой метод испарения материалов с высоким удельным электрическим сопротивлением [1–3] является относительно новым подходом к реализации технологии осаждения защитных покрытий на различных поверхностях [4, 5]. Это относится и к покрытиям на основе бора [5, 6], который, как известно, при нормальных условиях не является проводником и имеет удельное сопротивление порядка 1 МОм×см.

Использование электронного пучка для испарения чистого бора при обычных давлениях (менее 0,1 Па) затруднено зарядкой его (непроводящей) поверхности электронами пучка до высокого отрицательного потенциала. Это приводит к отклонению и даже отражению электронов пучка и, как следствие, делает невозможным его эффективный нагрев и испарение. Однако с развитием электронно-лучевых технологий удалось решить эту проблему путем расширения рабочего диапазона давлений до форвакуума (1–100 Па), поскольку при таких давлениях отрицательный заряд пучка на поверхности непроводящей мишени компенсируется потоком на неё положительных ионов газа из пучковой плазмы [7].

Ранее в работе [8] было проведено исследование потенциала, вносимого электронным пучком на поверхность изолированной металлической мишени в форвакуумных условиях. Следует заметить, что эти измерения проводились для импульсного режима функционирования электронного источника, причем измерялась интегральная величина потенциала всей мишени. Настоящая работа посвящена исследованию радиального распределения потенциала, формируемого электронным пучком на поверхности *непроводящей* мишени при форвакуумном диапазоне давления остаточного газа.

Методика эксперимента

Для генерации электронного пучка применялся плазменный источник электронов на основе разряда с полым катодом, конструктивные особенности и параметры которого подробно описаны в [9].

Схема нашего эксперимента представлена на рис. 1. В разрядной системе электронного источника (между полым катодом 1 и анодом 2) зажигался непрерывный тлеющий разряд с полым катодом под действием напряжения U_d . В результате приложения дополнительного ускоряющего напряжения U_a величиной до 10 кВ (между электродом 2 и заземленным экстрактором 3) через отверстие в аноде 2, перекрытом мелкоструктурной сеткой, извлекался и формировался электронный осесимметричный пучок 4 с начальным диаметром поперечного сечения порядка 1 мм.

Управление диаметром пучка осуществлялось с помощью магнитной фокусирующей системы, а изменение тока пучка – регулировкой тока разряда, приводящей к изменению концентрации плазмы разряда 5. При измерении распределения

Золотухин Денис Борисович, доцент, к.ф.-м.н.
Тюньков Андрей Владимирович, доцент, к.т.н.
Юшков Юрий Георгиевич, доцент, к.т.н.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. +7(3822) 41-33-69.
E-mail: zolotukhinden@gmail.com; tyunkov84@mail.ru; yushkovyu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2017 г.

© Золотухин Д. Б., Тюньков А. В., Юшков Ю. Г., 2017

потенциала на поверхности мишени для обеспечения лучшего пространственного разрешения пучок был специально расфокусирован, причем его диаметр составлял единицы сантиметров.

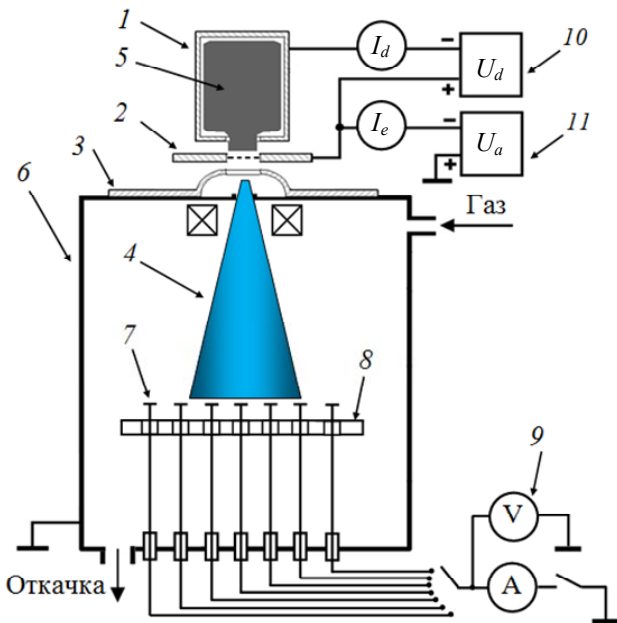


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – экстрактор; 4 – электронный пучок; 5 – плазма разряда; 6 – вакуумная камера; 7 – зонды; 8 – керамическая плита; 9 – вольтметр и миллиамперметр; 10 – блок питания разряда; 11 – блок питания ускоряющего напряжения.

Измерение распределения потенциала осуществлялось при помощи «линейки» из 11 плоских медных зондов 7 диаметром 3 мм, вставленных в мишень 8 с диаметром 30 см, которая изготовлена из алюмооксидной керамики. Выбор в качестве модельного материала мишени такой керамики основан на предварительных экспериментах, в которых было показано, что при температурах мишени ниже 100°C потенциалы, вносимые электронным пучком на поверхность керамики и мишени из кристаллического бора, при прочих равных условиях, практически совпадают. Однако мишень из керамики более доступна в изготовлении и имеет существенно меньшую стоимость по сравнению с мишенью из чистого бора.

Зонды в мишени были размещены вдоль линии, проходящей через центр сечения электронного пучка на расстоянии 1 см друг от друга. Ток на каждый из зондов измерялся миллиамперметром 9, а потенциал U – при переключении вывода зонда к входу высокоомного вольтметра. Плотность тока пучка j на соответствующей радиальной координате r вычислялась путем деления тока пучка, приходящего на один из зондов, на площадь приемной поверхности зонда. В качестве потенциала мишени U в данной точке принималось соответствующее показание вольтметра.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 последовательно приведены измеренное распределение плотности тока пучка на поверхность керамической мишени и соответствующее ему распределение потенциала. Из зависимостей на рис. 2 следует, что плотность тока, приходящего на поверхность мишени, зависит от давления, и при его значении 10 Па достигает максимального значения.

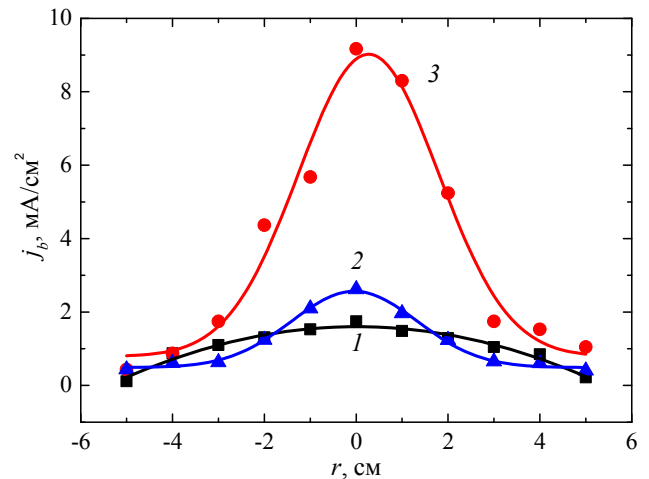


Рис. 2. Распределения плотности тока пучка электронов на поверхность мишени для различных значений давления газа (воздух): 1 – 2,5 Па; 2 – 6 Па; 3 – 10 Па. Энергия электронов пучка – 10 кэВ.

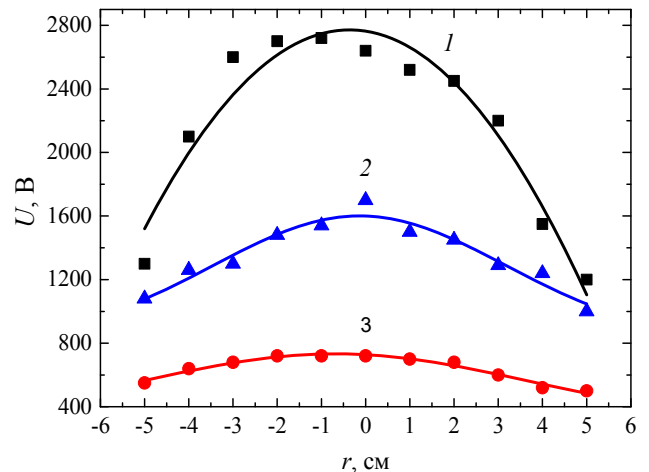


Рис. 3. Распределение потенциала на поверхности мишени для различных значений давления газа (воздух): 1 – 2,5 Па; 2 – 6 Па; 3 – 10 Па. Энергия электронов пучка – 10 кэВ.

Сравнение зависимостей рис. 2 и 3 свидетельствует о том, что профили распределения потенциала на поверхности мишени более широкие, чем профили распределения плотности тока пучка при этих же давлениях. Как следует из зависимостей, представленных на рис. 4, при давлении 10 Па потенциал в центре пучка практически не

зависит от плотности тока пучка, а при понижении давления потенциал резко возрастает при увеличении плотности тока пучка. Более узкий диапазон плотностей тока, соответствующих давлениям 2,5 и 6 Па на рис. 4, связан с ограничением тока разряда электронного источника, а, соответственно, и тока пучка при этих давлениях.

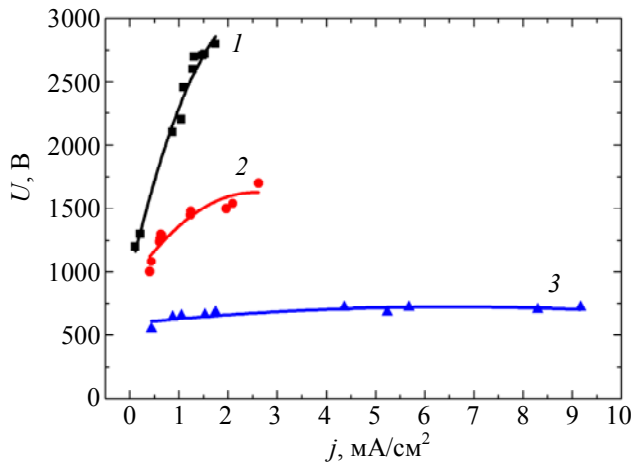


Рис. 4. Зависимости потенциала в центре мишени от плотности тока пучка для различных значений давления газа (воздух): 1 – 2,5 Па; 2 – 6 Па; 3 – 10 Па. Энергия электронов пучка – 10 кэВ.

Теоретические оценки для мишени из бора

Ввиду того, что на практике для испарения бора используется электронный пучок с поперечным сечением существенно меньшего диаметра, измерения распределений потенциала для этого случая затруднены необходимостью использования системы зондов с достаточно малыми размерами и, соответственно, малой собирающей площадью их поверхности. Поэтому анализ особенностей поведения потенциала (на мишени из бора) для такого пучка был выполнен на основании расчетной модели, верифицированной по результатам экспериментов с расфокусированным электронным пучком.

Модель базировалась на предположении однородности концентрации пучковой плазмы вблизи поверхности мишени, гауссовом распределении плотности тока по радиусу пучка, учёте процесса вторичной электронной эмиссии электронов за счет ускоренных электронов пучка, а также ионизации этими электронами газа при их ускорении разностью потенциалов U между поверхностью мишени и пучковой плазмой. Плотность тока ионов из пучковой плазмы на поверхность мишени принималась боровской [10]. Баланс заряжен-

ных частиц, приходящих на непроводящую поверхность мишени, может быть определен как равенство плотности тока пучка ускоренных электронов с суммой плотностей токов положительных электронов из пучковой плазмы на поверхность и вторичных электронов с поверхности:

$$j_b(r) = 0,4en\sqrt{2kT_e/M_i} + \sigma j_b(r) \frac{|U(r)|}{W_i}, \quad (1)$$

где $j_b(r)$ и $U(r)$ – плотность тока пучка и разность потенциалов поверхности непроводящей мишени и пучковой плазмы соответственно; n – концентрация плазмы; W_i – энергия образования электрон-ионной пары; σ – коэффициент вторичной электронной эмиссии. Из выражения (1) может быть получено выражение для определения разницы потенциалов поверхность – плазма $U(r)$:

$$U(r) = \frac{W_i(j_b(r) - 0,4en\sqrt{2kT_e/M_i})}{\sigma j_b(r)}. \quad (2)$$

Сравнение результатов расчета потенциала поверхности мишени в случае расфокусированного электронного пучка и результатов, представленных на рис. 3, показало удовлетворительное совпадение, что свидетельствует об адекватном отражении выражением (2) физических процессов, реализуемых в эксперименте.

Результаты расчета распределения плотности тока и потенциала по поверхности непроводящего кристаллического бора в случае сфокусированного электронного пучка, используемого для нагрева и испарения мишени, представлены соответственно на рис. 5, а, б.

Расчеты показывают, что для условий эксперимента плотность тока пучковых электронов много больше, чем плотности тока компенсирующих зарядку поверхности непроводящей мишени ионов из плазмы. Поверхность мишени заряжается до значительных величин разности потенциалов U , а именно, порядка единиц кВ, а полная компенсация происходит, с одной стороны, благодаря току вторичных электронов (в расчете полагалось $\sigma = 0,03$), а с другой, ионами пучковой плазмы, которые образуются в результате ионизации газа ускоренными с поверхности мишени вторичными электронами.

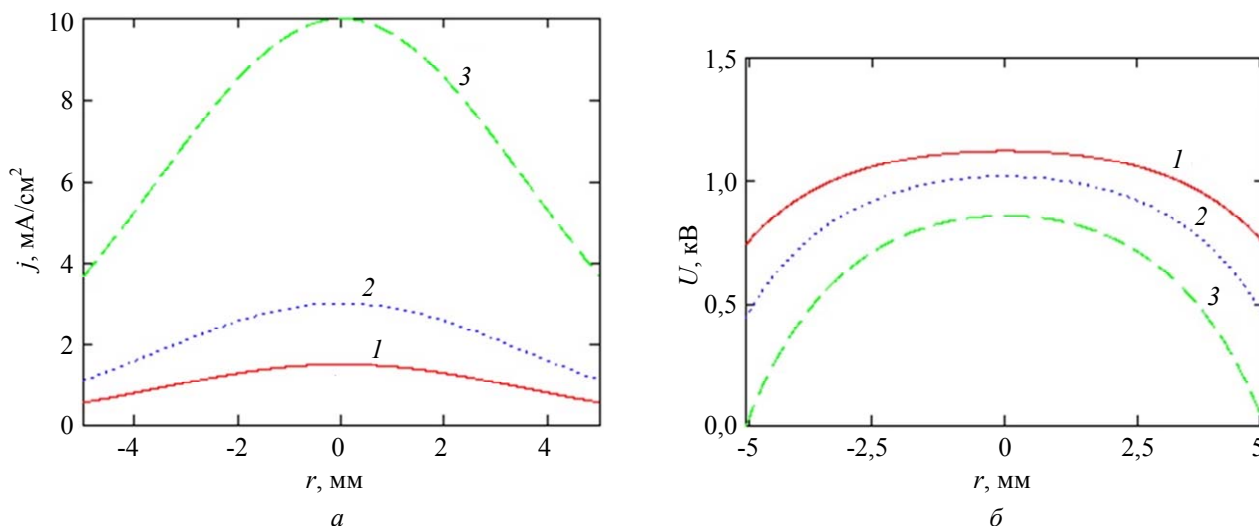


Рис 5. Расчетные плотности тока пучка (а) и соответствующие им профили потенциала (б) для узкого пучка при давлениях: 1 – 2,5 Па; 2 – 6 Па и 3 – 10 Па. Энергия электронов пучка – 10 кэВ.

Следует отметить, что и для пучка с меньшим диаметром поперечного сечения пучка (по сравнению с экспериментом) значение потенциала поверхности мишени снижается при повышении давления газа, несмотря на происходящий при этом достаточно резкий рост плотности тока пучка (см. рис. 5).

Заключение

Экспериментально показано, что в области форвакуумных давлений от 2,5 до 10 Па при взаимодействии пучка электронов с поверхностью непроводящей мишени отрицательный потенциал ее поверхности, вносимый пучком, как и распределение этого потенциала, существенно зависят от энергии пучка, давления газа и плотности тока электронного пучка. Сравнение экспериментальных и полученных на основе расчетов профилей распределения потенциала на поверхности мишени показали удовлетворительное совпадения. На основании расчетов были получены распределения потенциала, соответствующие сфокусированному электронному пучку, используемому для нагрева и испарения мишени из бора при создании борсодержащих функциональных покрытий.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда по гранту № 16-19-10034.

ЛИТЕРАТУРА

- Huang H. H., Liu Yu. S., Chen Y. M., Huang M. C., Wang M. C. // Surf. Coat. Tech. 2006. Vol. 200. No. 10. P. 3309.
- Shuzhen S., Lei C., Haihong H., Kui Yi, Zhengxiu F., Jianda S. // Appl. Surf. Sci. 2005. Vol. 242. P. 437.
- Oks E. M., Tyunkov A. V., Yushkov Yu. G., Zolotukhin D. B. // Surf. Coat. Tech. 2017. Vol. 325. P. 1.
- Li M., Shen H., Zhuang L., Chen D., Liang X. // Int. J. Photoen. 2014. Vol. 2014. P. 1.
- Юшков Ю. Г., Тюньков А. В., Золотухин Д. Б., Окс Е. М. // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 54.
- Yushkov Yu. G., Tyunkov A. V., Oks E. M., Zolotukhin D. B. // J. Appl. Phys. 2016. Vol. 120. No. 23. P. 233302.
- Казаков А. В., Климов А. С., Зенин А. А. // Доклады ТУСУРа. 2012. Т. 26. № 2. С. 186.
- Бурдовицин В. А., Медовник А. В., Окс Е. М., Скоров Е. В., Юшков Ю. Г. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 10. С. 103.
- Окс Е. М., Бурдовицин В. А., Климов А. С., Медовник А. В., Юшков Ю. Г. Форвакуумные плазменные источники электронов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014.
- Чен Ф. Ф. Введение в физику плазмы. – М.: Мир, 1987.

Distribution of potential upon the surface of non-conductive boron-containing target during irradiation by an electron beam in the fore-vacuum

D. B. Zolotukhin, A. V. Tyunkov, and Yu. G. Yushkov

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
40 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: zolotukhinden@gmail.com; tyunkov84@mail.ru; yushkovyu@mail.ru

Received September 18, 2017

The article presents the results of experiments investigating the interaction of an electron beam with the surface of a non-conductive boron-containing target, under the fore-vacuum pressures (1–10 Pa). It is shown that the potential distribution depends significantly on the beam energy, gas pressure and current density of the electron beam on the target. Based on the numerical simulation, we analyze the evolution of the potential distribution on the surface of the target with the change of the distribution profile of the electron beam current density.

Keywords: potential of the insulated target, fore-vacuum range of pressure, plasma cathode, electron beam.

REFERENCES

1. H. H. Huang, Yu. S. Liu, Y. M. Chen, M. C. Huang, and M. C. Wang, *Surf. Coat. Tech.* **200** (10), 3309 (2006).
2. S. Shuzhen, C. Lei, H. Haihong, Yi Kui, F. Zhengxiu, and S. Jianda, *Appl. Surf. Sci.* **242**, 437 (2005).
3. E. M. Oks, A. V. Tyunkov, Yu. G. Yushkov, and D. B. Zolotukhin, *Surf. Coat. Tech.* **325**, 1 (2017).
4. M. Li, H. Shen, L. Zhuang, D. Chen, and X. Liang, *Int. J. Photoen.* **2014**, 1 (2014).
5. Yu. G. Yushkov, A. V. Tyunkov, D. B. Zolotukhin, and E. M. Oks, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 54 (2016).
6. Yu. G. Yushkov, A. V. Tyunkov, E. M. Oks, and D. B. Zolotukhin, *J. Appl. Phys.* **120** (23), 233302 (2016).
7. A. V. Kazakov, A. S. Klimov, and A. A. Zenin, *Doklady TUSUR* **26** (2), 186 (2012).
8. V. A. Burdovitsin, A. V. Medovnik, E. M. Oks, E. V. Skrobov, and Yu. G. Yushkov, *Tech. Phys.* **57** (10), 1424 (2012).
9. E. M. Oks, V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, and Yu. G. Yushkov, *Fore-vacuum plasma sources of electrons* (Izd. Tomsk University, Tomsk, 2014) [in Russian].
10. F. F. Chen, *Introduction to plasma physics and controlled fusion* (Plenum Press, New York, 1984; Mir, Moscow, 1987).