

## Потенциал составной металлической мишени при её облучении электронным пучком в форвакуумной области давлений

Д. Б. Золотухин, В. А. Бурдовицин, Е. М. Окс, Н. А. Панченко

*В статье представлены результаты измерения потенциала изолированного коллектора, облучаемого электронным пучком в среднем вакууме, при различных значениях  $\sigma$  – коэффициента вторичной электронной эмиссии электронов (ВЭЭ). Изменение  $\sigma$  обеспечено плавным перемещением относительно электронного пучка коллектора, составленного из двух металлов (алюминия и титана) с резко различающимися значениями коэффициента ВЭЭ. Предложена модель, удовлетворительно описывающая измеренную зависимость, и методика, позволяющая по установившемуся потенциалу изолированного коллектора оценивать коэффициент ВЭЭ различных материалов, в том числе и диэлектриков.*

*Ключевые слова:* форвакуум, электронный пучок, потенциал изолированного коллектора, пучковая плазма.

*Ссылка:* Золотухин Д. Б., Бурдовицин В. А., Окс Е. М., Панченко Н. А. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 30.

*Reference:* D. B. Zolotukhin, V. A. Burdovitsin, E. M. Oks, and N. A. Panchenko, Prikl. Fiz., No. 1, 30 (2019).

### Введение

Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) играет важную роль в различных процессах, связанных с облучением материалов электронным пучком [1, 2]. Поскольку интенсивность вторичной эмиссии определяется коэффициентом  $\sigma$  ВЭЭ, то решающую роль приобретает прогнозирование вторично-эмиссионных свойств облучаемых материалов. Указанная задача не тривиальна, поскольку табличные значения коэффициента  $\sigma$  определены, как правило, для чистых материалов в высоком вакууме. В реальных электронно-лучевых технологических процессах состав обрабатываемых материалов включает несколько компонентов, а диапазон рабочих давлений может достигать среднего вакуума (единицы и десятки Па) [3–5]. Такая ситуация

реализуется, например, при электронно-лучевой модификации диэлектриков форвакуумными плазменными источниками электронов [6]. По-видимому, для этих случаев величина  $\sigma$  должна отличаться от известного значения, и ее определение является актуальной задачей. Как показано в [7], при повышенных давлениях газа и, соответственно, интенсивной генерации пучковой плазмы чувствительным к коэффициенту  $\sigma$  оказывается установившейся «плавающий» потенциал  $\phi$  изолированного коллектора.

Цель настоящей работы состояла в определении в области среднего вакуума (форвакуума) взаимосвязи между  $\phi$  и  $\sigma$  при изменении  $\sigma$  в достаточно широких пределах, для чего предложена методика, заключающаяся в использовании коллектора, составленного из двух металлических материалов с резко различающимися значениями  $\sigma$ .

### Описание экспериментальной установки и методики измерений

Эксперимент проводился на установке, схематически представленной на рис. 1. Форвакуумный плазменный электронный источник, включающий полый катод 1, анод 2 и ускоряющий электрод 3, магнитную фокусирующую систему 4, формировал цилиндрический непрерывный пучок электронов 5.

---

Золотухин Денис Борисович<sup>1</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н.

Бурдовицин Виктор Алексеевич<sup>1</sup>, профессор, д.т.н.

Окс Ефим Михайлович<sup>1,2</sup>, зав. лаб., зав. кафедрой, д.т.н.

Панченко Николай Алексеевич<sup>1</sup>, м.н.с.

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

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

E-mail: zolotukhinden@gmail.com

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

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

Статья поступила в редакцию 24 января 2019 г.

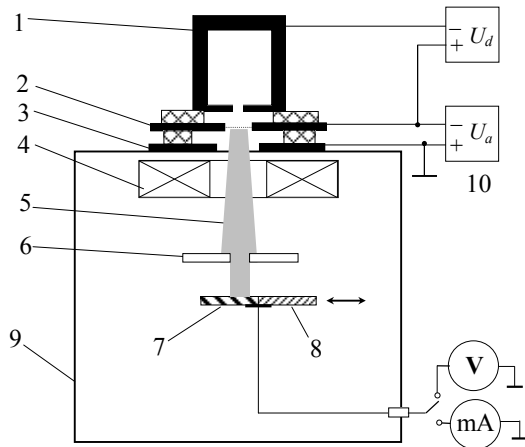


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и методики измерений: 1 – полый катод; 2 – анод с эмиссионной сеткой; 3 – экстрактор плазменного источника электронов; 4 – фокусирующая система; 5 – электронный пучок; 6 – диафрагма с квадратным отверстием; 7 – титановая и 8 – алюминиевая вставки составного коллектора; 9 – вакуумная камера; 10 – источники питания разряда и ускоряющего напряжения источника.

Металлическая диафрагма 6 обеспечивала формирование квазипараллельного пучка квадратного сечения ( $1 \times 1 \text{ см}^2$ ). Коллектор составлен из двух прямоугольных пластин (титановой 7 и алюминиевой 8) (размером  $4 \times 1,5 \text{ см}$  каждая), причём площадь каждой из которых больше площади поперечного сечения пучка. Ток пучка и потенциал коллектора контролировались амперметром и вольтметром, подключаемыми поочередно. Вакуумная камера 9 откачивалась форвакуумным насосом до минимального давления 1 Па, после чего в камеру напускался аргон до рабочего давления 5 Па.

Коллектор установлен на изолированном от него манипуляторе, позволяющем перемещать коллектор в направлении, перпендикулярном оси пучка. В процессе эксперимента измерялись значения потенциала коллектора в зависимости от координаты границы раздела пластин, отсчитываемой от границы пучка. Указанное значение координаты пересчитывалось в отношении площади  $S_{Al}$  пучка, попадающей на алюминиевую пластину, к полной площади  $S_b$  сечения пучка. Для получения количественных соотношений может быть использовано представление об эффективном коэффициенте  $\sigma_{eff}$  ВЭЭ

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_{Al} S_{Al} + \sigma_{Ti} S_{Ti}}{S_b} \quad (1)$$

где  $\sigma_{Al}$  и  $\sigma_{Ti}$  – коэффициенты ВЭЭ алюминия и титана, а  $S_{Al}$ ,  $S_{Ti}$  – площади сечения пучка, попадающие на алюминий и титан соответственно,  $S_b$  – полная площадь сечения пучка. Выражение (1) позволяет оценивать  $\sigma_{eff}$  в зависимости от  $S_{Al}/S_b$  при заданных  $\sigma_{Al}$  и  $\sigma_{Ti}$ .

## Результаты экспериментов и их обсуждение

Во всех проведенных измерениях потенциал коллектора оставался отрицательным, что свидетельствует о величине коэффициента ВЭЭ меньше единицы. Зависимости абсолютного значения потенциала, показанные на рис. 2, а, представляют собой плавные кривые, причём потенциал коллектора заметно снижается по мере увеличения доли пучка, приходящейся на алюминий.

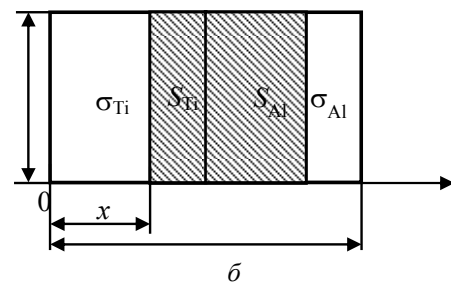
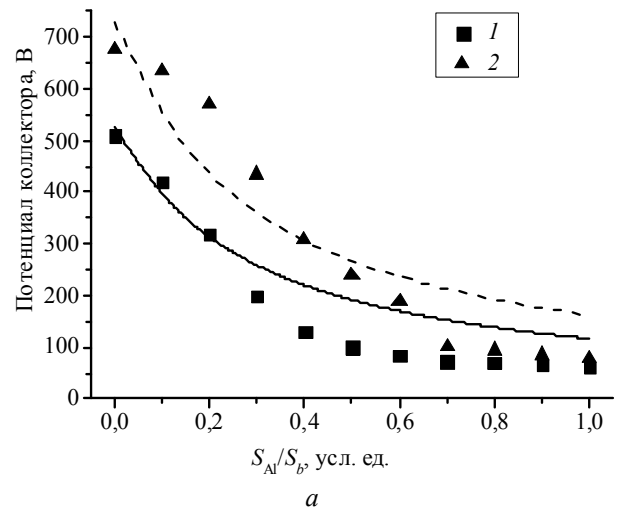


Рис. 2. Экспериментальные данные: а) абсолютные значения потенциала коллектора как функция доли пучка, попадающей на алюминий, при токе пучка 0,5 мА (точки 1) и 1 мА (точки 2); б) – схема эксперимента с двумя пластинами, облучаемыми электронным пучком квадратного сечения (вид сверху). Точки – экспериментальные значения, кривые – результат численного моделирования. Аргон, давление 5 Па, начальная энергия электронов пучка 4 кэВ.

Для объяснения измеренной зависимости может быть привлечена модель, изложенная в [8]. Согласно модели, потенциал изолированного коллектора устанавливается как результат баланса электрического заряда, приносимого на коллектор электронным пучком и ионами из пучковой плазмы, и уносимого вторичными электронами. В то же время поток ионов из пучковой плазмы определяется ее концентрацией, которая устанавливается за счет ионизации газа как первичным электронным пучком, так и вторичными электронами, ускоренными в слое, отделяющем плазму от коллектора.

Согласно полученной ранее формуле [9], для оценки потенциала  $\varphi$  облучаемой пучком изолированной пластины в форвакууме при одних и тех же неизменных параметрах эксперимента (давление и род газа, ток и энергия пучка, геометрия пучка и облучаемой пластины и т. д.) потенциал изолированного коллектора  $\varphi$  будет зависеть исключительно от коэффициента ВЭЭ материала пластины и ее площади. Для оценок по этой формуле в рамках настоящей работы пренебрежем для простоты ионно-электронной эмиссией и перепишем формулу [9] с учетом соотношения (1) в следующем виде:

$$\varphi = \frac{W_i S_p}{\sigma_{eff} \frac{I_b}{ev_i} \frac{1}{\left( (1 - \sigma_{eff}) I_b / ev_i S_b - n_0 \right)}}, \quad (2)$$

где  $W_i$  – энергия (в потенциальных единицах), затрачиваемая на образование одной ионно-электронной пары (37 эВ);  $S_p$  – площадь поверхности пучковой плазмы, с которой она теряет ионы;  $v_i$  – боровская скорость ионов;  $I_b$  – ток электронного пучка;  $n_0 = I_b n_g \sigma_i (U_a) L / 0,4 ev_i S_p$  – концентрация пучковой плазмы, формирующаяся исключительно за счет пучковых электронов ( $n_g$  – концентрация газа,  $\sigma_i(U_a)$  – сечение ионизации,  $L = 20$  см – длина пробега пучка в камере).

Будем считать, что поперечное сечение пучка и каждая из двух пластин имеют форму квадрата со стороной  $a$  и при «сканировании» пучок движется слева направо, поочередно попадая сначала на пластину из материала с низким коэффициентом ВЭЭ ( $\sigma_{Ti}$ ), а затем – с высоким ( $\sigma_{Al}$ ) (рис. 2, б). За начало отсчета ( $x = 0$ ) примем левый край пластины с низким коэффициентом ВЭЭ, направление оси  $Ox$  направим вправо, и будем отсчитывать координату  $x$  от начала отсчета до левой границы электронного пучка. Из рис. 2, а видно, что  $S_{Ti}$  и  $S_{Al}$  можно определить следующими выражениями:

$$S_{Ti}(x) = \begin{cases} a(a-x), & \text{при } 0 \leq x \leq a \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}$$

$$S_{Al}(x) = \begin{cases} a^2 - S_{Ti}, & \text{при } 0 \leq x \leq a \\ a(2a-x), & \text{при } a \leq x \leq 2a \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

Очевидно, при любой координате  $x$  в диапазоне от 0 до  $a$  сумма площадей  $S_{Ti}$  и  $S_{Al}$  равна площади поперечного сечения пучка  $S_b$ :

$$S_{Ti}(x) + S_{Al}(x) = a^2 = S_b. \quad (4)$$

Потенциал, формирующийся при «сканировании» двух разных пластин и рассчитанный по формуле (2) с учетом (3) и (4), приведен на рис. 2, а. Видно, что результаты численного моделирования качественно согласуются с экспериментальными значениями. Согласно экспериментам и расчету, абсолютное значение потенциала растет с током пучка. Непрерывный спад расчетной кривой с увеличением доли площади алюминиевой пластины с более высоким коэффициентом ВЭЭ ( $\sigma_{Al} = 0,6$ ), по сравнению с расчетным коэффициентом ВЭЭ для титана ( $\sigma_{Ti} = 0,2$ ), объясняется более эффективной компенсацией приносимого пучком избыточного заряда. Этот спад также свидетельствует о том, что именно вторично-эмиссионные свойства материала определяют потенциал составной металлической мишени при прочих неизменных параметрах эксперимента.

Характер зависимостей, измеренных в атмосфере аргона и кислорода (см. рис. 3), примерно одинаков. Повышение ускоряющего напряжения приводит к возрастанию модуля потенциала коллектора, что связано с хорошо известным снижением коэффициентов ВЭЭ материалов пластин и сечения ионизации газа с ростом энергии пучка. Это повышение напряжения приводит к ухудшению условий для нейтрализации заряда коллектора ввиду снижения тока вторичных электронов и ионного потока с поверхности более редкой плазмы.

Полученные результаты можно рассматривать как метод оценки величины коэффициента вторичной электронной эмиссии материала на основании измерения потенциала изолированного коллектора, изготовленного из этого материала.

Разработанная методика может быть применена и для диэлектриков. Поскольку непосредственное измерение потенциала диэлектрика невозможно, для его определения может быть применен способ, рассмотренный в [10] и основанный на взаимосвязи между потенциалом коллектора, концентрацией плазмы и толщиной слоя, отделяющего плазму от коллектора. Последние две величины могут быть измерены.

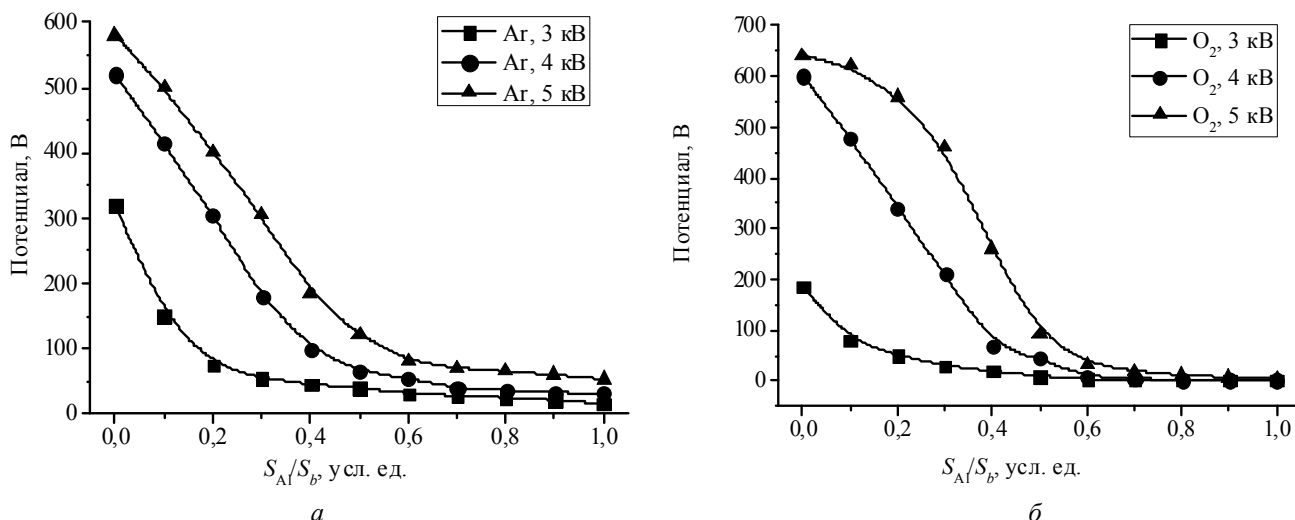


Рис. 3. Абсолютные значения потенциала коллектора как функция доли пучка, попадающей на алюминий. Газ – аргон (а), кислород (б). Ток пучка 1 мА, давление 5 Па.

### Заключение

Результаты измерений и расчетов показывают однозначную связь потенциала изолированного коллектора, облучаемого электронным пучком в среднем вакууме, с коэффициентом вторичной электронной эмиссии материала коллектора. Такая взаимосвязь между  $\phi$  и  $\sigma$  обеспечивает возможность оценки коэффициента вторичной электронной эмиссии различных материалов, включая диэлектрики.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 19-08-00170).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Добровольский А. М., Евсюков А. Н., Гончаров А. А., Проценко И. М. // Вопросы атомной науки и техники. Серия

«Плазменная электроника и новые методы ускорения». 2006. № 5. С. 122.

2. Schweigert I., Langendorf S., Walker M., Keidar M. / Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT (Hyogo-Kobe, Japan, 2015). P. 1–10.

3. Мартенс В. Я. // Журнал технической физики. 1996. № 6. С. 70.

4. Гаврилов Н. В., Меньшаков А. И., Каменецких А. С. // Журнал технической физики. 2013. № 1. С. 74.

5. Бурдовитсин В. А., Золотухин Д. Б., Зенин А. А., Окс Е. М., Тюньков А. В., Юшков Ю. Г. // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20. № 3. С. 70.

6. Burdovitsin V. A., Oks E. M. // Laser and Particle Beams. 2008. Vol. 26. Iss. 4. P. 619.

7. Бурдовитсин В. А., Золотухин Д. Б., Окс Е. М., Панченко Н. А. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 21.

8. Burdovitsin V. A., Oks E. M., Zolotukhin D. B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51. P. 304006.

9. Burdovitsin V. A., Klimov A. S., Medovnik A. V., Oks E. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19. P. 055003.

10. Zolotukhin D. B., Burdovitsin V. A., Oks E. M. // Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 093502.

## Potential of an isolated complex target during its irradiation by an electron beam in the forevacuum pressure range

*D. B. Zolotukhin<sup>1</sup>, V. A. Burdovitsin<sup>1</sup>, E. M. Oks<sup>1,2</sup>, and N. A. Panchenko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: zolotukhinden@gmail.com

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

*Received January 24, 2019*

*In this article, we present the results on measurements of potential of isolated collector, irradiated by dc electron beam at medium vacuum, at different values of  $\sigma$  – secondary electron emission (SEE) coefficient. The change of  $\sigma$  was provided by smooth movement of a complex collector, consisting of two different metals having drastically-different values of SEE coefficients (aluminum and titanium), with respect to electron beam. A numerical model that satisfactorily describes the measured dependence, and a technique that makes it possible to evaluate the coefficient of SEE for various materials, including dielectrics, using the steady-state potential of an isolated collector, are proposed.*

*Keywords:* forevacuum, electron beam, isolated collector potential, beam plasma.

### REFERENCES

1. A. M. Dobrovolsky, A. N. Evsyukov, A. A. Goncharov, and I. M. Protsenko, Problemy of atomnoy nauki i tekhnologii. Ser. Plazma elektronika, No. 5, 122 (2006)
2. I. Schweigert, S. Langendorf, M. Walker, and M. Keidar, in *Proc. Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT* (Hyogo-Kobe, Japan, 2015), pp. 1–10.
3. V. Ya. Martens, Technical Physics, No. 6, 70 (1996).
4. N. V. Gavrilov, A. I. Men'shakov, and A. S. Kameneckikh, Technical Physics, No. 1, 74 (2013).
5. V. A. Burdovitsin, D. B. Zolotukhin, A. A. Zenin, E. M. Oks, A. V. Tyunkov, and Yu. G. Yushkov, Trudy TUSUR **20** (3), 70 (2017).
6. V. A. Burdovitsin and E. M. Oks, Laser and Particle Beams **26** (4), 619 (2008).
7. V. A. Burdovitsin, D. B. Zolotukhin, E. M. Oks, and N. A. Panchenko, Prikl. Fiz., No. 5, 21 (2018).
8. V. A. Burdovitsin, E. M. Oks, and D. B. Zolotukhin, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 304006 (2018).
9. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, and E. M. Oks, Plasma Sources Sci. Technol. **19**, 055003 (2010).
10. D. B. Zolotukhin, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, Physics of Plasmas **24**, 093502 (2017).