

**Влияние материала изолированного коллектора на параметры плазмы, генерируемой электронным пучком в форвакуумной области давлений**

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

*Проведены измерения потенциала изолированного коллектора и параметров пучковой плазмы, генерируемой вблизи коллектора при давлении рабочего газа (аргон) в несколько Па. Установлена связь концентрации плазмы с потенциалом коллектора. Показано, что характер этой связи не зависит от способа изменения потенциала. В установлении потенциала изолированного коллектора решающее значение имеет материал коллектора. При изменении энергии электронов в пучке от 2 до 7 кВ потенциалы коллекторов из меди, титана и нержавеющей стали изменяются от десятков до нескольких сотен вольт, в то время как потенциал алюминиевого коллектора не превышает 100 В. Сформулировано предположение о существенной роли вторично-эмиссионных процессов как в установлении потенциала коллектора, так и в формировании пучковой плазмы.*

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

*Ссылка:* Бурдовицин В. А., Золотухин Д. Б., Окс Е. М., Панченко Н. А. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 21.

*Reference:* V. A. Burdovitsin, D. B. Zolotukhin, E. M. Oks, and N. A. Panchenko, Prikl. Fiz., No. 5, 21 (2018).

**Введение**

Необходимость рассмотрения задачи об облучении электронным пучком изолированного коллектора появляется в двух случаях. Во-первых, при электронно-лучевой обработке диэлектрических объектов [1] и, во-вторых, при обсуждении воздействия изолированного коллектора на плазму, создаваемую потоком ускоренных электронов [2, 3]. Возможности эффективной электронно-лучевой модификации диэлектриков, а также генерации плотной пучковой плазмы успешно реализованы в области повышенных давлений (1–100 Па) с использованием т. н. форвакуумных плазменных источников электронов [4]. В обоих

указанных выше случаях задачу необходимо рассматривать комплексно, учитывая все три фактора: электронный пучок, плазму и изолированный коллектор. Во взаимодействии изолированного коллектора с плазмой решающее значение имеет потенциал коллектора. Измерения, выполненные в [2, 3], показали, что при энергии электронов в несколько сотен электрон-вольт коллектор может приобретать как отрицательный, так и положительный потенциал.

В случае же энергий пучка в несколько килоэлектрон-вольт установившийся потенциал изолированного коллектора всегда отрицателен [5]. В отмеченных работах указывалось на роль вторично-эмиссионных свойств коллектора. В то же время в экспериментальном плане вопрос взаимосвязи потенциала коллектора и параметров пучковой плазмы проработан недостаточно. В [6] прослежена связь материала изолированного коллектора с параметрами плазмы в диэлектрической полости, создаваемой инжекцией электронного пучка. В [7] показано, что при генерации пучковой плазмы при свободном распространении пучка в вакуумной камере в отсутствие диэлектрических стенок в области давлений 1–10 Па зависимость концентрации плазмы  $n$  от потенциала  $\phi$  облучаемого пучком коллектора имеет максимум, причем максимум концентрации может кратно превышать концентрацию пучковой плазмы при заземленном кол-

**Бурдовицин Виктор Алексеевич**<sup>1</sup>, профессор, д.ф.-м.н.

**Золотухин Денис Борисович**<sup>1</sup>, с.н.с.

**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, Томск, проспект Ленина, 40.

E-mail: burdov@fet.tusur.ru, ZolotukhinDen@gmail.com,

oks@fet.tusur.ru, PanchenkoNA@Vtomske.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 22 августа 2018 г.

© Бурдовицин В. А., Золотухин Д. Б., Окс Е. М., Панченко Н. А., 2018

лекторе и коллекторе, находящимся под плавающим потенциалом. Установлено, что наблюдаемая немонотонность зависимости  $n(\varphi)$  обусловлена вкладом вторичных электронов с коллектора в процессы генерации плазмы.

Цель настоящей работы состояла в поиске закономерностей взаимодействия электронного пучка, изолированного коллектора, изготовленного из различных материалов, и пучковой плазмы при свободном распространении электронного пучка в вакуумной камере.

### Описание экспериментальной установки и методики измерений

Эксперименты проводились на установке, схематически изображенной на рис. 1. На верхнем фланце изготовленной из нержавеющей стали вакуумной камеры 1 размещен форвакуумный плазменный электронный источник 2 с фокусирующей системой 3. Эмиссионная плазма создается разрядом с полым катодом. Более подробно электронный источник такого типа описан в [8]. Коллекторы 4 электронного пучка 5 размещены на диэлектрических держателях, установленных на вращающейся платформе 6.

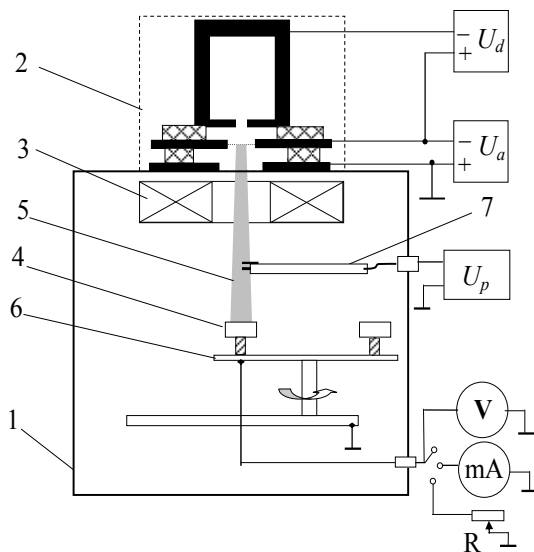


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Электропривод позволял подводить разные коллекторы под пучок без нарушения вакуума камеры. Миллиамперметр и высокоомный вольтметр, включаемые в цепь коллектора, служили для измерения тока пучка и потенциала коллектора, причем коллекторы подключались к измерительным приборам по отдельности. Рабочий газ (аргон) напускался в полый катод электронного источника. В экспериментах давление газа составляло 2 Па, ток пучка 2 мА. Коллекторы плоской формы оди-

накового диаметра, равного 40 мм, были изготовлены из различных материалов: титана, нержавеющей стали SS, меди и алюминия.

Визуальные наблюдения свечения плазмы показали, что пучковая плазма отделена от коллектора хорошо различимым слоем (см. рис. 2), протяженность которого зависит от потенциала коллектора. Для измерения параметров пучковой плазмы использовалась зондовая методика (одиночный или двойной зонд), защищенный экраном от попадания пучка. Во всех экспериментах зонд (рис. 1, поз. 7) размещался за пределами слоя.

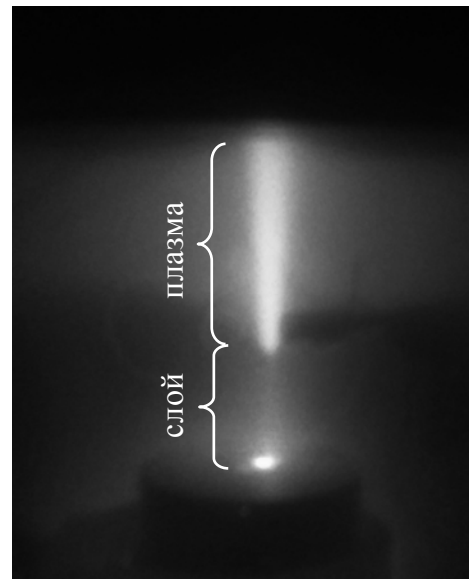


Рис. 2. Характерное свечение плазмы.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Измеренная двойным зондом электронная температура не проявляла заметных изменений и находилась в диапазоне  $0,4 \div 0,5$  эВ, что совпадает со значениями, полученными в работе [9]. Приведенные на рис. 3 результаты свидетельствуют о заметном влиянии материала коллектора на величину и характер зависимости концентрации  $n$  плазмы и установившегося потенциала  $\varphi$  изолированного коллектора от величины ускоряющего напряжения  $U_a$  электронного источника. Для всех использованных металлов характерно возрастание потенциала  $\varphi$  с повышением ускоряющего напряжения. Однако для алюминия максимальные значения  $\varphi$  не превышают 100 В, в то время как для меди, нержавеющей стали и титана  $\varphi$  может достигать 1000 В и более. Различие крутизны зависимости потенциала коллектора от ускоряющего напряжения для разных материалов коллектора (см. рис. 3, а) связано, скорее всего, с разницей коэффициентов  $\gamma_e$  вторично-электронной эмиссии.

Еще одно отличие проявляется в поведении концентрации  $n$  плазмы с повышением  $U_a$ . Для Cu, SS, Ti в указанной зависимости наблюдается максимум, а для Al – минимум (рис. 3, б). Сопоставление кривых  $\phi(U_a)$  и  $n(U_a)$  показывает, что максимум концентрации имеет место при потенциалах коллектора в диапазоне 150÷250 В, а минимум – при  $\phi = 10\div 15$  В (см. рис. 4).

Для сравнения на рис. 5 представлены результаты измерения концентрации  $n$  плазмы в зависимости от потенциала коллектора для случая, когда потенциал изменялся регулировкой сопротивления резистора  $R$ , включенного между коллектором (нержавеющая сталь) и заземленной стенкой вакуумной камеры. Сходство зависимостей, приведенных на рис. 4 и 5, указывает на общность причин, вызывающих эти зависимости.

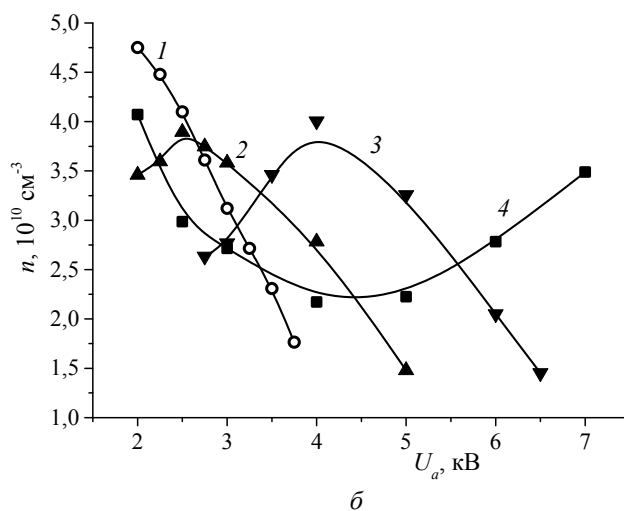
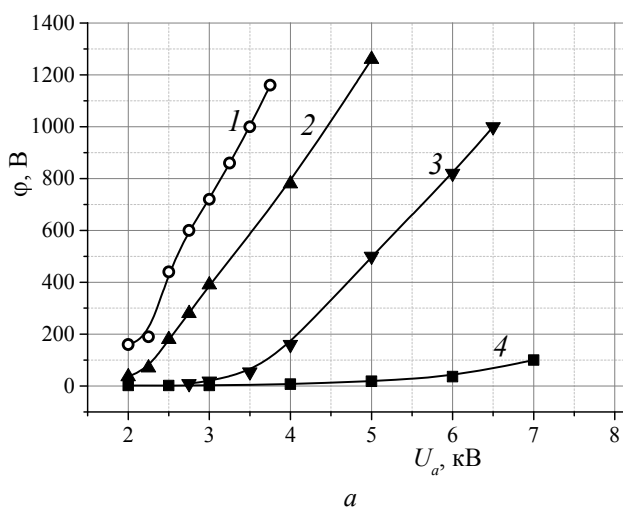


Рис. 3. Потенциал  $\phi$  коллектора (а) и концентрация  $n$  плазмы (б) как функции ускоряющего напряжения  $U_a$  электронного источника для разных материалов коллектора: 1 – Ti, 2 – SS, 3 – Cu, 4 – Al.

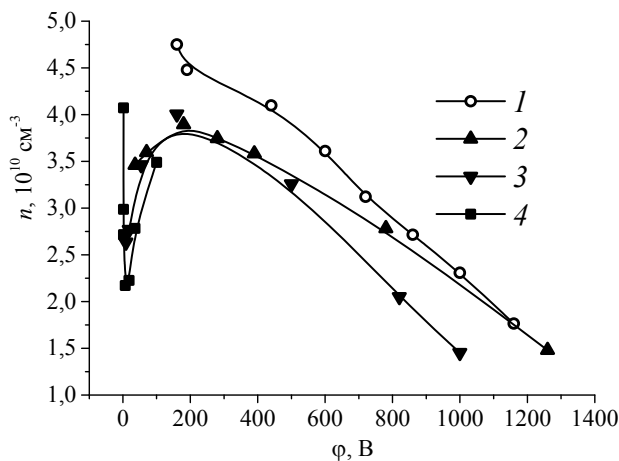


Рис. 4. Концентрация  $n$  плазмы как функция коллекторного потенциала  $\phi$ , регулируемого ускоряющим напряжением, для разных металлов: 1 – Ti, 2 – SS, 3 – Cu, 4 – Al.

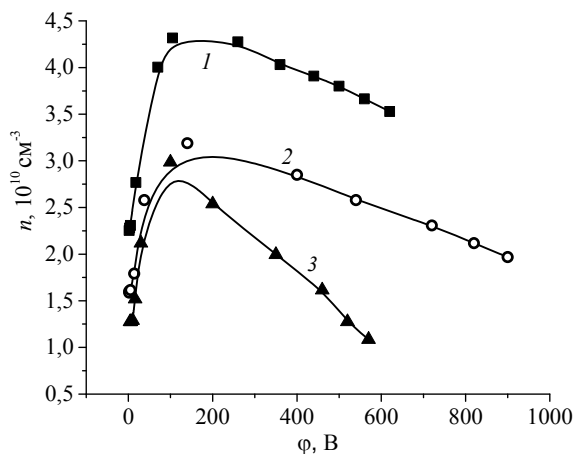


Рис. 5. Концентрация  $n$  плазмы как функция коллекторного потенциала  $\phi$ , регулируемого резистором, для разных ускоряющих напряжений  $U_a$ : 1 – 4 кВ, 2 – 4,5 кВ, 3 – 5 кВ. Материал коллектора – нержавеющая сталь.

Объяснение полученных результатов может быть построено на основе допущений, изложенных в [6]. Суть их сводится к следующему. Ионизация газа при распространении электронного пучка осуществляется четырьмя группами электронов: ускоренным электронным пучком, упруго отраженными от коллектора электронами пучка, плазменными электронами, а также вторичными электронами с коллектора. При сохранении параметров пучка его вклад в ионизацию не зависит от материала коллектора. Отраженные электроны имеют энергию, близкую к энергии электронов пучка, и по этой причине изменение потенциала коллектора слабо влияет на ионизационную способность этих электронов [10]. Вклад плазменных электронов в ионизацию газа зависит от их температуры и концентрации плазмы монотонно [11] и может лишь усиливать эффекты, обусловленные другими причинами. Таким образом, наиболее вероятная причина обнаруженных зависимостей заключается во вкладе, создаваемом вторичными электронами. Согласно оценкам, выполненным на основе модели, изложенной в [6], потенциал коллектора падает с повышением коэффициента  $\gamma_e$  вторичной электронной эмиссии. Это дает основания к предположению о более высоком значении  $\gamma_e$  для алюминия по сравнению с медью, нержавеющей сталью и титаном. Несмотря на это, концентрация плазмы для алюминиевого коллектора оказывается ниже для средних энергий пучка использованного диапазона (см. рис. 3, б). Этот факт может быть объяснен низким сечением ионизации для вторичных электронов [12], имеющих энергию, определяемую потенциалом коллектора и не превышающую нескольких десятков электрон-вольт. С другой стороны, для установления баланса токов на изолированном коллекторе с большим  $\gamma_e$  требуется меньше ионов, поток которых определяется концентрацией плазмы.

При облучении изолированного коллектора достаточно энергичным пучком установлено, что концентрация плазмы тем выше, чем ниже энергия пучка (см. рис. 5). Это может свидетельствовать о том, что эффективность ионизации газа как пучковыми, так и вторичными электронами повышается при снижении энергии упомянутых частиц до

уровня, соответствующего максимумам сечений ионизации молекул газа.

### Заключение

Полученные результаты показывают, что концентрация пучковой плазмы, генерируемой в форвакуумной области давлений, при прочих равных условиях определяется потенциалом коллектора. При этом способ изменения потенциала коллектора принципиального значения не имеет. В частности, для изолированного коллектора его установленный потенциал определяется вторично-эмиссионными свойствами материала коллектора.

Работа выполнена при поддержке Российского  
Фонда Фундаментальных Исследований  
(грант № 16-08-00183).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Dobrovols'kii A. M., Evsyukov A. N., Goncharov A. A., Protsenko I. M. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2006. № 5. С. 122.
2. Мартенс В. Я. // Журнал технической физики. 1996. № 6. С. 70.
3. Гаврилов Н. В., Меньшаков А. И., Каменецких А. С. // Журнал технической физики. 2013. № 1. С. 74.
4. Бурдовицин В. А., Бакеев И. Ю., Зенин А. А., Золотухин Д. Б., Казаков А. В., Климов А. С., Медовник А. В., Окс Е. М., Тюньков А. В. // Доклады ТУСУРа. 2016. Т. 19. № 2. С. 5.
5. Burdovitsin V. A., Klimov A. S., Medovnik A. V., Oks E. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19. P. 055003.
6. Zolotukhin D. B., Burdovitsin V. A., Oks E. M. // Physics of plasmas. 2017. Vol. 24. P. 093502.
7. Burdovitsin V. A., Oks E. M., Zolotukhin D. B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51. P. 304006.
8. Бурдовицин В. А., Жирков И. С., Окс Е. М., Осипов И. В., Федоров М. В. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 66.
9. Leonhardt D., Walton S. G., Fernsler R. F. // Physics of plasmas. 2007. Vol. 14. P. 057103.
10. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. – М.: Наука, 1969.
11. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992.
12. Hwang W., Kim Y. K. // Journal of Chemical Physics. 1996. Vol. 104. P. 2956.

## Influence of the isolated collector material on the parameters of the plasma generated by an electron beam in the forevacuum pressure range

V. A. Burdovitsin<sup>1</sup>, D. B. Zolotukhin<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: burdov@fet.tusur.ru, ZolotukhinDen@gmail.com, oks@fet.tusur.ru, PanchenkoNA@Vtomske.ru

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

Received August 22, 2018

*The results of measurements of the beam plasma parameters and the potential of isolated collector irradiated by electron beam under forevacuum conditions are presented. It is shown that these quantities are determined essentially by the collector material.*

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

### REFERENCES

1. A. M. Dobrovols'kii, A. N. Evsyukov, A. A. Goncharov, and I. M. Protsenko, *Voprosi atomnoi nauki i tekhniki. Plasmennaya electronica i metodi uskoreniya*, No. 5, 122 (2006).
2. V. Ya. Martens, *Tech. Phys.* **41**, 559 (1996).
3. N. V. Gavrilov, A. I. Men'shakov, and A. S. Kamenetskikh, *Tech. Phys.* **58**, 70 (2013).
4. V. A. Burdovitsin, I. Yu. Bakeev, A. A. Zenin, D. B. Zolotukhin, A. V. Kazakov, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, E. M. Oks, and A. V. Tyunkov, *Doklady TUSUR* **19**, 5 (2016).
5. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, and E. M. Oks, *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 055003 (2010).
6. D. B. Zolotukhin, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, *Physics of plasmas* **24**, 093502 (2017).
7. V. A. Burdovitsin, E. M. Oks, and D. B. Zolotukhin, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 304006 (2018).
8. V. A. Burdovitsin, I. S. Zhirkov, E. M. Oks, I. V. Osipov, and M. V. Fedorov, *Instruments and Experimental Techniques* **48**, 761 (2005).
9. D. Leonhardt, S. G. Walton, and R. F. Fernsler, *Physics of plasmas* **14**, 057103 (2007).
10. I. M. Bronstein and I. M. Fraiman, *Secondary Electron Emission* (Nauka, Moscow, 1969) [in Russian].
11. Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics* (Springer, New York, 1991; Nauka, Moscow, 1992).
12. W. Hwang, and Y. K. Kim, *Journal of Chemical Physics* **104**, 2956 (1996).