

Электронные, ионные и лазерные пучки

УДК 537.525

Эффективность генерации пучка электронов в стационарном открытом разряде

А. И. Головин

Предложены соотношения для оценки энергетической эффективности генерации пучков убегающих электронов в стационарном открытом разряде. Показано, что выражение для КПД генератора отличается от принятого для электронных пушек с высоковольтным тлеющим разрядом из-за образования в области катодного падения вторичных электронов.

PACS: 52.59Vi

Ключевые слова: пучок электронов, тлеющий разряд, убегание электронов

Введение

Для получения пучков электронов в разреженном газе широкое применение нашли ВТР-пушки — электронные пушки с высоковольтным тлеющим разрядом (ВТР) [1]. Важной характеристикой электронных пушек является КПД, равный отношению мощности генерируемого пучка электронов к потребляемой мощности. Легко показать, что КПД ВТР-пушек η определяется эффективным коэффициентом ионно-электронной эмиссии γ , равным отношению количества эмитируемых катодом электронов к количеству падающих на катод ионов:

$$\eta = \frac{\gamma}{\gamma + 1}. \quad (1)$$

Ионная бомбардировка катода в ВТР-пушках обеспечивается за счет поступления ионов из прианодной плазмы, имеющей потенциал, близкий к потенциалу анода. Достаточная плотность плазмы обеспечивается специальными мерами (выбор формы анода, создание условий для пучково-плазменного разряда, зажигание вспомогательного разряда).

Максимальное рабочее давление в ВТР-пушках составляет, как правило, не более 10 Па, что для многих применений недостаточно. В соответствии с критерием подобия газовых разрядов, для повышения давления необходимо уменьшать расстояние между катодом и анодом. Уменьшение расстояния до нескольких мм затрудняет создание электронно-оптических систем сложной формы, т. е. конструкция пушки упрощается до плоского катода и сетчатого анода (возможен предельный случай «сетки» с единственным отверстием). Аномальный тлеющий разряд в устройствах такого типа часто называют открытым [2], так как его поддержание обеспечивается за счет бомбардировки катода частицами, приходящими извне катод—анодного промежутка. При этом рабочее давление в открытом разряде достигает единиц кПа в непрерывном режиме и до десятков — в импульсном.

Существенным отличием устройств с открытым разрядом от обычных ВТР-пушек с анодной плазмой является то, что из-за высокого рабочего давления для самоподдержания открытого разряда достаточно бомбардировки катода ионами и возникающими при перезарядке быстрыми нейтральными молекулами, образующимися в катодном слое.

Отличие в формировании потока бомбардирующих катод частиц может привести к отличию соотношений для эффективности формирования пучков электронов в открытом разряде.

Целью данной работы является исследование КПД генераторов пучков электронов с использованием ранее разработанной модели процессов

Головин Андрей Иванович, начальник отдела.
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».
Россия, 125438, Москва, Онежская ул. 8.
Тел. (495) 456-64-13.
E-mail: aigolovin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2015 г.

в стационарном открытом разряде [3] и оценки энергетического распределения вторичных электронов [4].

Соотношения для эффективности

Как указано выше, энергетическая эффективность или КПД определяется как отношение мощности создаваемого пучка электронов W_n к полной потребляемой мощности W : $\eta = W_n / W$. Обозначим приложенное напряжение U , полный ток разряда J , ток пучка J_n , ток ионов на катод J_i , ток первичных электронов, эмитируемых катодом, J_e (здесь и далее используются принятые в [3] и [4] обозначения). Очевидно, что $W = JU$. В случае ВТР-пушек $J_n = J_e$, что с учетом $J_e = \gamma J_i$ приводит к соотношению (1). Кроме того, выполнено $\eta = J_e / J$.

В работах [5] и [6] последнее соотношение использовалось для экспериментального определения эффективности генерации электронных пучков в открытом разряде. Между плоским катодом и анодными стержнями устанавливалась кварцевая решетка, исключая прямое попадание электронов с катода на анод. За анодом устанавливался коллектор электронов. Измерялись токи, текущие на анод и на коллектор, их сумма считалась равной полному току разряда; ток в катодной цепи не измерялся. Максимальная эффективность, определяемая авторами этих работ как отношение тока коллектора к сумме токов, составляла 99,88 %.

Следует отметить, что полный ток разряда может быть больше, чем сумма токов на анод и коллектор, так как часть электронов за счет рассеяния в газе и отражения от коллектора может попадать на стенки вакуумной камеры. Кроме того, близко расположенный коллектор (минимальное расстояние от анода до коллектора в [5] сравнимо с расстоянием между катодом и анодом) может влиять на процессы в разряде, что подтверждается экспериментами в работе [7]. Там же отмечена необходимость учета «доли электронов, рожденных в объеме разрядного промежутка и достигающих коллектора».

Действительно, в открытом разряде часть электронов пучка рождается в катодном слое в результате ионизации атомов эмитируемыми с катода электронами. Но такие вторичные электроны проходят не всю приложенную разность потенциалов, поэтому $W_n \neq J_n U$ и определять КПД по отношению токов некорректно: необходимо учитывать не долю электронов, а переносимую ими мощность W_2 . Введя безразмерный параметр

$w = W_2 / (J_i U)$, при помощи несложных преобразований получим новое соотношение для КПД:

$$\eta = \frac{\gamma + w}{\gamma + 1}. \quad (2)$$

Вторичные электроны

Энергетическое распределение вторичных электронов рассмотрено в [4]. Учитывались только вторичные электроны, образующиеся в результате ионизации газа первичными, ионизация вторичными электронами не учитывалась. Из приводимого в этой работе графика видно, что значительная часть вторичных электронов имеет невысокую относительную энергию $k = K / (eU)$, где K — кинетическая энергия этих электронов. Мощность вторичных электронов можно вычислить как интеграл произведения их кинетической энергии на энергетическую плотность тока. Нижний предел интегрирования k_m соответствует энергии самых медленных учитываемых электронов, а верхний предел — максимальной возможной энергии вторичных электронов. Используя соотношения работы [4], нетрудно получить зависимость w от безразмерного напряжения $u = 2eU / I$ (I — средний потенциал ионизации газа):

$$w = \frac{1}{2\xi_1} \int_{k_m}^{1-\frac{1}{u}} \frac{\sqrt{k}}{1-k} \ln(u(1-k)) dk. \quad (3)$$

Здесь ξ_1 — логарифмически зависящая от напряжения функция (безразмерные параметры ξ_0 , ξ_1 , ξ_2 , входящие в описывающие разряд соотношения, подробно рассмотрены в [8]). Минимально возможная относительная энергия электронов пучка определена в [4] следующим образом:

$$k_{\min} = \left(\frac{I_i}{2,72 I \gamma \xi_1} \right)^2$$

где I_i — энергетическая цена образования иона. Электроны с меньшей энергией образуются в области со слабым полем, не обеспечивающим убегающего. Однако длина пробега в газе электронов с энергией, близкой k_{\min} , будет много меньше, чем длина пробега пучка с энергией eU , и их вклад в мощность пучка даже на небольшом расстоянии от генератора будет отсутствовать. Поэтому при оценке КПД необходимо выбрать минимальную относительную энергию учитываемых электронов k_m такой, чтобы длина пробега самых медленных электронов пучка соответствовала характерным масштабам расстояний решаемой технологической задачи.

Например, в работе [9] при оценке эффективности генерации пучков убегающих электронов по результатам численного моделирования учитывались электроны с энергией выше $k_m = 2/3$. Длина пробега таких электронов составляет не менее половины длины пробега электронов с энергией eU (по данным [10], длина пробега электрона в веществе пропорциональна его энергии в степени $5/3$). Если же учитывать электроны с длиной пробега более одной десятой от максимальной, то следует принять $k_m = 1/4$.

Последующие расчеты выполнены для трех вариантов: 1) $k_m = 2/3$, 2) $k_m = 1/4$, 3) $k_m = k_{\min}$. В вариантах 1 и 2 величина w не зависит от свойств газа, соответствующие кривые показаны на рис. 1. Видно, что величина w составляет от 0,2 до 0,5 для $k_m = 2/3$ и от 0,3 до 0,6 для $k_m = 1/4$.

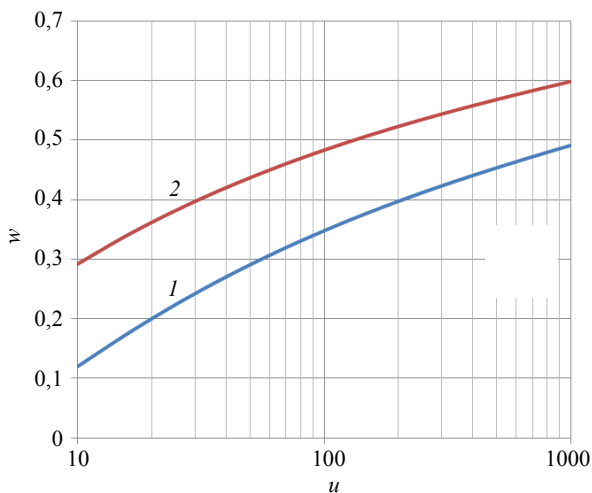


Рис. 1. Зависимость безразмерного параметра w от безразмерного напряжения и для двух вариантов выбора минимальной энергии электронов.

Расчеты эффективности

Для входящего в формулу (2) эффективного коэффициента эмиссии в [4] приведено выражение, полученное из соотношений работы [3]:

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_n \frac{eU \xi_0}{I_n \xi_1} \quad (4)$$

где γ_i и γ_n — коэффициенты эмиссии с катода под воздействием бомбардировки ионами и нейтральными атомами (или молекулами) соответственно, I_n — эффективная энергетическая цена образования достигающего катода быстрого нейтрала с учетом как процессов перезарядки, так и упругих соударений нейтралов между собой. По порядку величины I_n должна быть близка к средней кинетической энергии нейтралов вблизи катода.

Значительные трудности возникают при оценке коэффициентов эмиссии, так как они силь-

но зависят от условий, в которых проводятся измерения, а именно: от материала катода, чистоты и шероховатости его поверхности, давления газа и его химического состава. В работе [11] отмечено, что коэффициенты эмиссии, измеренные в техническом и сверхвысоком вакууме, нередко различаются на один-два порядка. Там же приведены ссылки на работы, в которых отмечено существенное влияние небольших примесей кислорода в гелии и других газах.

Для дальнейших оценок КПД генератора пучка электронов в гелии использовались данные [12], полученные для условий тлеющего разряда, т. е. при среднем давлении 1330 Па и с учетом адсорбции рабочего газа поверхностью катода из нержавеющей стали. Следует, однако, отметить, что приводимые в [12] коэффициенты эмиссии существенно меньше приводимых в других работах, например, [11] или [13].

Коэффициент γ_i , по данным [12], слабо зависит от энергии иона, для расчетов было принято $\gamma_i = 0,2$. Коэффициент γ_n растет с ростом энергии атома, особенно сильна зависимость при энергии менее 100 эВ. Однако в (4) входит отношение γ_n/I_n , которое меньше зависит от энергии. Для расчетов было принято $\gamma_n/I_n = 10^{-4} \text{ эВ}^{-1}$.

Результаты расчетов КПД для трех вариантов k_m и по формуле (1) приведены на рис. 2. Во всех случаях эффективность генерации пучка растет с ростом напряжения. Наглядно видно, что вклад вторичных электронов является определяющим. КПД, рассчитанный по формуле (1), составляет от 20 до 40 %. Вычисленный по формуле (2) КПД почти не отличается для вариантов 2 и 3 и составляет от 60 до 80 %. Для варианта 1 КПД на 10 % меньше: от 50 до 70 %.

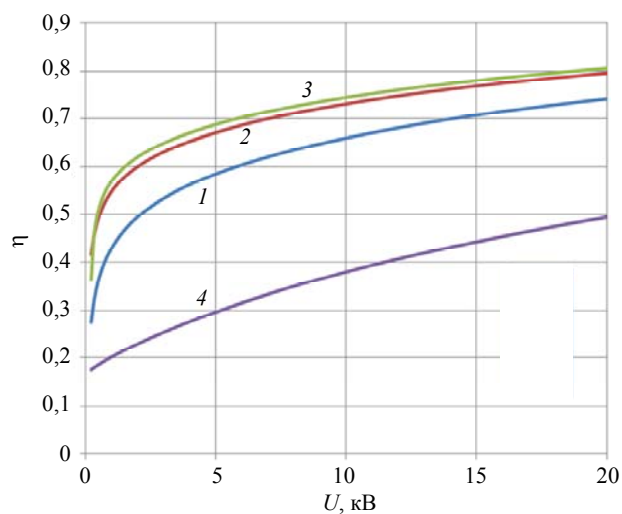


Рис. 2. Эффективность генерации пучка электронов в гелии в зависимости от напряжения для трех вариантов выбора минимальной энергии электронов (кривые 1—3 соответственно), кривая 4 — расчет по формуле (1).

Для принятых величин коэффициентов эмиссии эффективный коэффициент γ достигает 1 только при напряжении около 20 кВ. Следовательно, во всем представленном на рис. 2 диапазоне напряжений ток вторичных электронов превышает ток электронов, эмитируемых с катода. При этом обеспечивается высокая эффективность генерации пучка. Поскольку в работе [4], а, следовательно, и в формуле (3) учитываются только вторичные электроны «первого поколения», то реальные значения w и η должны быть выше.

Заключение

В работе получено выражение для КПД формирования пучка убегающих электронов в открытом разряде. Показано, что возможна эффективная генерация пучков электронов даже при низких значениях коэффициентов эмиссии за счет рождения электронов в катодном слое в области с напряженностью поля, обеспечивающей режим убегания. При этом эффективность генерации пучка оказывается существенно выше, чем в предположении, что все электроны эмитируются катодом. Этот эффект может оказывать существенное влияние на эксперименты по измерению коэффи-

циента эмиссии электронов с катода, приводя к заметному завышению результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завьялов М. А., Крейнделъ Ю. Е., Новиков А. А. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Хомич В. Ю., Ямицков В. А. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 84.
3. Головин А. И., Егорова Е. К., Шлойдо А. И. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 10. С. 27.
4. Головин А. И. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 54.
5. Бохан А. П., Закревский Д. Э. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 2. С. 74.
6. Бохан А. П., Закревский Д. Э. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 11. С. 21.
7. Сорокин А. Р. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 10. С. 15.
8. Головин А. И. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 43.
9. Ткачев А. Н., Феденев А. А., Яковленко С. И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 6. С. 22.
10. Капуа К., Okayama S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1972. Vol. 5. P. 43.
11. Сорокин А. Р. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 17. С. 1.
12. Бохан А. П., Закревский Д. Э. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 1. С. 109.
13. Medved B. D., Strausser Y. E. // Advances in Electronics and Electron Phys. 1965. Vol. 21. P. 101.

Efficiency of electron beam generation by a stationary open discharge

A. I. Golovin

Keldysh Research Centre
8 Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russia
E-mail: aigolovin@yandex.ru

Received November 20, 2015

Equations were suggested to estimate energetic efficiency of a run-away electron beam generation by stationary open discharge. It was shown that equation for the efficiency differs from that for electron guns with high-voltage glow discharge because of formation of secondary electrons in cathode potential drop area.

PACS: 52.59.Bi

Keywords: electron beam, glow discharge, run-away electrons.

REFERENCES

1. M. A. Zav'yalov, Yu. E. Kreindel', and A. A. Novikov, *Plasmic Processes in Technological Electron Guns* (Energoatomizdat, Moscow, 1989) [in Russian].
2. V. Yu. Khomich and V. A. Yamshchikov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 84 (2010).
3. A. I. Golovin, E. K. Egorova, and A. I. Shloido, *Tech Phys.* **84** (10), 27 (2014).
4. A. I. Golovin, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 54 (2015).
5. A. P. Bokhan and D. E. Zakrevskii, *Tech. Phys. Lett.* **28** (2), 74 (2002).
6. A. P. Bokhan and D. E. Zakrevskii, *Tech. Phys. Lett.* **28** (11), 21 (2002).
7. A. R. Sorokin, *Tech. Phys. Lett.* **29** (10), 15 (2003).
8. A. I. Golovin, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 43 (2015).
9. A. N. Tkachev, A. A. Fedenev, and S. I. Yakovenko, *Tech Phys.* **77** (6), 22 (2007).
10. K. Kanya and S. Okayama, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **5**, 43 (1972).
11. A. R. Sorokin, *Tech. Phys. Lett.* **29** (17), 1 (2003).
12. A. P. Bokhan and D. E. Zakrevskii, *Tech Phys.* **77** (1), 109 (2014).
13. B. D. Medved and Y. E. Strausser, *Advances in Electronics and Electron Phys.* **21**, 101 (1965).

* * *