

УДК 621.385.6

А. С. ТИЩЕНКО,  
Н. С. ЗИНЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук

## О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИЗОТОКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПЕРВЕАНСНЫХ ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК

Для высокопервеансных трехэлектродных электронных пушек с продольной компрессией заряда [1—4] существуют соотношения, устанавливающие взаимосвязь между электрическими и геометрическими параметрами. Они получены в предположении о постоянстве температуры катода [5]. Зависимость от температуры потенциала ускоряющей диафрагмы, коэффициента токопрохождения и первеанса пушки исследовалась в [6]. В результате теоретических исследований получены выражения, описывающие эту зависимость в режиме насыщения катодного тока. Однако до сих пор не учитывалось влияние эффекта Шоттки, хотя, как известно, этот эффект у катодов, обычно применяемых в пушках, в определенных условиях имеет аномальный характер.

При экспериментальной проверке теории высокопервеансных трехэлектродных пушек было отмечено, что для одного и того же значения тока пучка кривые  $V_1 = f(V_2)$ , представляющие собой зависимость потенциала ускоряющей диафрагмы от потенциала замедляющей диафрагмы при постоянном токе пучка (так называемые изотоковые характеристики), располагаются на различных уровнях напряжения  $V_1$ . Такое поведение изотоковых характеристик являлось результатом изменения мощности накала, т. е. температуры катода. Таким образом, изменяя температуру катода как параметр в режимах, отличных от режима ограничения тока пространственным зарядом, можно получить семейство кривых  $V_1 = f(V_2)$  при одном и том же токе.

Одним из основных преимуществ пушки с продольной компрессией заряда является возможность полного использования эмиссионной способности катода при больших величинах первеанса пушки. Иными словами, в такой пушке можно получить медленный пучок электронов с большой плотностью заряда, в то время как ее диодный (ускоряющий) участок работает в режиме насыщения тока.

Учитывая значение изотопных характеристик высокопереванной трехэлектродной пушки и то, что наиболее полно ее преимущества реализуются в режиме насыщения катодного тока, необходимо количественно учитывать влияние температуры катода на ускоряющий потенциал при постоянном токе пучка.

Зависимость тока пучка в замедляющем поле от потенциалов на электродах пушки описывается известным выражением:

$$I_{e2} = I_{e1} \frac{(V\sqrt{V_1} + V\sqrt{V_2})^2 V\sqrt{V_1}}{4V_2^3}, \quad (1)$$

которое после решения относительно  $V_1$  — потенциала ускоряющей диафрагмы — представляет аналитическую запись зависимости  $V_1 = f(V_2, I_{e2})$ :

$$V_1 = V_2 \left( \sqrt{\frac{2}{27} + 4 \frac{I_{e2}}{I_{e1}}} - \frac{2}{3} \right)^2. \quad (1a)$$

Здесь  $I_{e2}$  — ток пучка в замедляющем поле;  $I_{e1}$  — ток пучка в эквипотенциальном режиме, когда  $V_1 = V_2$ . Погрешность формулы (1a) не более одного процента.

Ток пучка в пушке, ускоряющий участок которой работает в режиме насыщения катодного тока, можно представить в виде

$$I_{e2} = \eta_T I_{\text{кат}} = \eta_T I_0 \exp \left\{ \frac{4,39 V E_{\text{кат}}}{T} \right\}, \quad (2)$$

где

$$I_0 = AST^2 \exp \left\{ -\frac{e\varphi}{kT} \right\}$$

$I_{\text{кат}}$  — ток катода;  
 — ток насыщения;  
 $E_{\text{кат}}$  — напряженность внешнего электрического поля у поверхности катода;  
 $\eta_T$  — коэффициент прохождения пучка в трехэлектродной пушке, определяемый как отношение  $I_{e2}/I_{\text{кат}}$  при  $V_1 > V_2$ .

Ток пучка, формируемого при условии  $V_1 = V_2$  ( $V_2$  мало), практически не зависит от температуры катода, так как в этом случае при температуре, достаточной для получения больших токов, диодный участок трехэлектродной пушки работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом.

Считая ускоряющий участок пушки сферическим диодом [5], можно записать

$$I_{e1} = \eta_D \left( \frac{2e}{m} \right)^{\frac{1}{2}} t_1^{-3} V_2^{\frac{3}{2}}. \quad (3)$$

Здесь  $\eta_D$  — коэффициент прохождения пучка в эквипотенциальном режиме ( $V_1 = V_2$ ). Выражение (3) для тока, протекающего в сферическом конденсаторе и ограниченного пространственным

зарядом, было получено в [7]. Параметр  $t_1$  в этом выражении определяется из уравнения

$$\frac{t_1 \sqrt{\rho_1}}{2^{1/3}} = u'(x_k) v'(x_1) - u'(x_1) v'(x_k),$$

а  $x_1$  — из уравнения

$$\sqrt{\rho_1} = u'(x_k) v(x_1) - u(x_1) v'(x_k), \quad \rho_1 = \frac{r_1}{r_k},$$

где  $r_1, r_k$  — радиусы кривизны анода и катода соответственно;  $u, v$  — функции Эйри;  $u', v'$  — первые производные от этих функций;  $x_k, x_1$  — аргументы функций Эйри на катоде и аноде. В режиме ограничения тока пространственным зарядом аргумент  $x_k$ , характеризующий электрическое поле на поверхности катода, равен нулю.

Определив таким образом значения токов  $I_{e2}, I_{e1}$  и подставив их в (1а), получим

$$V_1 = V_2 \left( \sqrt[3]{\frac{2}{27} + \frac{4\gamma_T AST^2 \exp\left\{-\frac{e\varphi}{kT} + \frac{4,39\sqrt{E_{кат}}}{T}\right\}}{\gamma_D \left(2\frac{e}{m}\right)^{1/2} t_1^{-3} V_2^{3/2}}} - \frac{2}{3} \right)^2. \quad (4)$$

Потенциал ускоряющей диафрагмы  $V_1$  в высокоперевансной гребнеэлектродной пушке при постоянном токе пучка является функцией потенциала замедляющей диафрагмы [5]. При условии независимости от температуры потенциала  $V_2$  выражение (4) описывает зависимость между током насыщения и потенциалом насыщения в том смысле, в каком эти термины можно употреблять, учитывая наличие эффекта Шоттки. Изменение температуры катода и, следовательно, его тока приведет к изменению потенциала ускоряющей диафрагмы, необходимого для сохранения величины тока пучка постоянной. Отметим, что полученное выражение (4) справедливо для режима насыщения и это нужно учитывать при экспериментальной проверке расчетов.

Температурная зависимость ускоряющего напряжения рассчитывалась для следующих значений плотности катодного тока: 0,5; 1,0; 2,0 и 3,0 а/см<sup>2</sup> (катод импрегнированный алюминатный).

Выражение (4) в таком виде неудобно для расчетов. В связи с этим было изучено поведение множителя  $\exp\left\{4,39\sqrt{E_{кат}}/T\right\}$  при изменении в широких пределах ускоряющего напряжения, определяющего величину внешнего электрического поля у поверхности катода. Оказалось, что плотность эмиссии мало меняется с изменением ускоряющего напряжения на 1000 и даже

на 4000 вольт. В процентном отношении изменение плотности тока при изменении ускоряющего напряжения с 1000 и до 2000 *v* равно 3,9 процента, а при изменении  $V_1$  с 1000 до 1500 *v* — всего лишь двум процентам. Это объясняется тем, что формула, учитывающая влияние на эмиссию катода внешнего электрического поля, получена для чисто металлических катодов с гладкой эмиттирующей поверхностью. Гораздо большее влияние на величину плотности тока эмиссии оказывает изменение температуры катода.

С достаточной степенью точности для облегчения расчетов можно положить, что множитель  $\exp\{4,39\sqrt{E_{\text{кат}}/T}\}$  остается постоянным при изменении напряжения в небольших пределах. Опыт показывает, что ошибка, допускаемая при этом предположении, меньше двух процентов. Значения коэффициентов токопрохождения  $\eta_t$  и  $\eta_d$ , входящих в (4), почти не отличаются друг от друга вплоть до наступления электростатической неустойчивости. В связи с этим выражение (4) значительно упрощается.

Для сравнения расчетных результатов с экспериментальными были проведены измерения в пушке с импрегнированным (алюминатным) катодом. Конструкция пушки описана в [8]. Измерения проводились в два этапа. Сначала были получены вольт-амперные характеристики при температурах катодов, соответствующих указанным выше значениям плотности тока эмиссии. Вольт-амперные характеристики позволили определить границы режимов насыщения. Достаточно четкие режимы насыщения наблюдались лишь для токов плотностью 0,5 и 1,0  $a/cm^2$ . Для токов плотностью 2,0 и 3,0  $a/cm^2$  в пушке данной конструкции не удавалось получить режимов насыщения при напряжениях, допустимых с точки зрения пробоев.

Изотоковые характеристики для токов 0,5 и 1,0  $a/cm^2$  снимались в определенной заранее области насыщения. Температура катода для каждого семейства кривых  $V_1=f(V_2)$  повышалась каждый раз на 5—7 градусов, начиная со значения, соответствующего глубокому режиму насыщения. Верхний предел интервала изменения температуры ограничивался режимом ограничения тока пространственным зарядом. Температура катода измерялась оптическим пирометром ЭОП-66, среднеквадратичная погрешность которого в интервале измеряемых температур от 900 до 2000° С не более  $\pm 0,1$  процента.

Имея набор изотоковых характеристик, нетрудно построить кривые температурной зависимости ускоряющего потенциала  $V_1$ . На рис. 1 и рис. 2 сравниваются расчетные и экспериментальные величины абсолютного изменения потенциала  $V_1$  в зависимости от изменений температуры катода. Наиболее удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов наблюдается для тока плотностью 0,5  $a/cm^2$ , так как для

этого тока можно получить наиболее четко выраженный режим насыщения.

С увеличением температуры катода и увеличением абсолютного значения катодного тока происходит изменение режима работы катода, который все больше отличается от насыщения и переходит, наконец, в режим ограничения тока пространственным

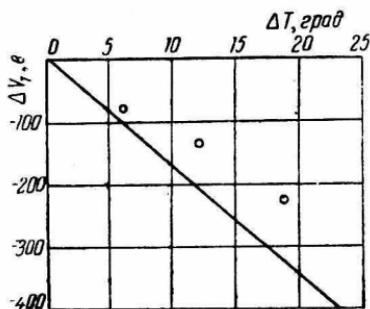


Рис. 1. Изменение ускоряющего потенциала в зависимости от температуры катода при плотности тока в пучке ( $i_0=0,5$  а/см<sup>2</sup> и  $V_2=500$  в).

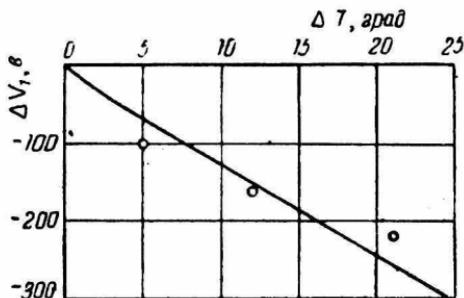


Рис. 2. Изменение ускоряющего потенциала в зависимости от температуры катода при плотности тока в пучке ( $i_0=1,0$  а/см<sup>2</sup> и  $V_2=800$  в).

зарядом. Этим объясняется возрастающее расхождение результатов при больших плотностях тока пучка.

Таким образом, в результате теоретических исследований получена формула, позволяющая заранее производить оценочный расчет изотоковых характеристик высокоперевансной трехэлектродной пушки при любой заданной температуре катода с учетом влияния эффекта Шоттки, которое становится заметным при больших абсолютных значениях температуры катода. При расчетах стал возможным учет типа катода, что имеет большое значение в работе с новыми высокоэффективными эмиттерами. В известных пределах расчетные результаты находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными.

Авторы благодарят В. В. Яковлева за помощь, оказанную при подготовке и проведении эксперимента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зинченко Н. С. Ионный источник, генерирующий ионы путем ударной ионизации молекул газа. Авт. свид. № 140918 от 20 июня 1960. «Бюллетень изобретений», 1961, № 17, 39 с.
2. Зинченко Н. С., Моторненко А. П. Способ ионной фокусировки электронного потока при высоком вакууме. Авт. свид. № 139022 от 2 июня 1960. «Бюллетень изобретений», 1961, № 12, с. 33.
3. Зинченко Н. С., Саенко В. И. Расчет распределения потенциала в системе цилиндрический электронный пучок — постоянное электростатическое поле. — «Ж. техн. физ.», 1963, т. 33, № 2, с. 154—163.

4. Зинченко Н. С. Высокопереванские трехэлектродные электронные пушки, использующие продольную компрессию. В кн.: Тез. докл. на XVI Укр. республ. конфер., посвященной Дню радио. Киев, 1966. 189 с.
5. Зинченко Н. С. Теория, экспериментальные результаты и некоторые применения высокопереванских электронных пушек.— «Укр. физ. ж.», 1967, 12, 11, с. 1828—1831; Теория трехэлектродных электронных пушек, использующих продольную компрессию; — «Ж. тех. физ.», 1968, 38, 1, с. 184—189; Экспериментальная проверка теории высокопереванских трехэлектродных электронных пушек путем моделирования; — «Укр. физ. ж.», 1968, 13, 11, с. 1828—1832; Расчет коэффициента токопрохождения высокопереванских трехэлектродных электронных пушек,— «Укр. физ. ж.», 1969, 14, № 2, с. 213—215; Состояние и перспективы развития высокопереванских электронных пушек (обзор).— «Укр. физ. ж.», 1971, 16, 6, с. 915—965.
6. Зинченко Н. С., Тищенко А. С. О температурной зависимости параметров высокопереванских трехэлектродных электронных пушек.— Сб. «Радиотехника». Вып. 21. Харьков, 1972, с. 101—106.
7. Поплавский Р. П. Распределение потенциала в шаровом конденсаторе в случае тока насыщения. — «Ж. техн. физ.», 1950, 20, 2, с. 149—159.
8. Зинченко Н. С., Лопатин И. В. Высокопереванская трехэлектродная электронная пушка с повышенным сроком службы.— «Изв. вузов. Радиоэлектроника», 1970, 11, с. 1379—1381.