

УДК 621

Исследование устойчивости тока в автоэмиссионных источниках электронных пучков

В. А. Васин

Федеральное государственное унитарное предприятие «Полигон МТ»,
пос. Новый Быт, Чеховский район, Московская обл.

Экспериментально исследованы два типа неустойчивости тока в автоэмиссионных источниках электронов. Зарегистрированы долговременные дрейфы тока в узких вакуумных промежутках этих источников. Они объясняются адсорбционно-десорбционными процессами на поверхности катода. Были изучены флуктуации токов эмиссии в источниках со свежими катодами. Зарегистрированы энергетические спектры флуктуаций тока и сравнены с известными законами шумовых спектров эмиссии.

В целях получения ярких электронных пучков и увеличения плотности тока в них в электронной микроскопии применяются автоэмиссионные источники с микронными зазорами [1]. В автоэмиссионных источниках электрон-

ных пучков используются острийные катоды, у вершины которых создается сильное электрическое поле, достаточное для возникновения заметной электронной эмиссии. Электронная яркость таких источников в 10^3 – 10^4 раза выше яркости источников с традиционными термокатадами. Однако острийные катоды часто демонстрируют флуктуации тока и долговременную неустойчивость, если не применяются специальные меры, среди которых важнейшими являются сверхвысокий вакуум и дегазация и очистка элементов источника электронов [2]. Ранее проведенные исследования стабильности тока в таких системах [3] показали, что нестабильность тока в таких системах связана с изменением эффективной работы выхода ϕ материала катода под действием молекул остаточных газов и, возможно, ионной бомбардировки катода частицами, десорбированными с поверхности анода.

Цель настоящей работы — изучение характера долговременного дрейфа автоэмиссионного тока (на протяжении минут и часов) и сравнительно высокочастотных ($f = 10$ Гц — 50 кГц) флуктуаций электронного тока с вольфрамовых острий (поликристаллических и монокристаллических с ориентацией $\langle 110 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$) как при широких, так и при узких зазорах ($d \sim 10^{-4} \div 10^{-3}$ см), обеспечивающих сравнительно низкие напряжения возникновения автоэмиссии (в пределах ~ 1 кВ).

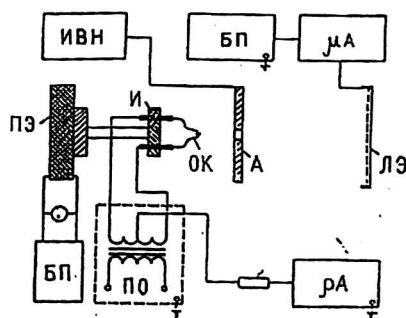
Экспериментальная часть

Исследования проводились в металлической вакуумной камере, прогретаемой до температуры 250 — 300 °С для обезгаживания. Безмасляная откачка камеры сорбционным и электроразрядным насосами, а также использование в некоторых экспериментах криопанели позволяли понижать давление остаточных газов до $2,5 \cdot 10^{-8}$ Па. Давление измерялось ионизационным манометром Байярда-Альперта.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Острийный катод крепился на манипуляторе, имеющем три поступательные и одну вращательную степени свободы. С помощью микровинта манипулятора осуществлялось поступательное перемещение катода в диодной системе в широком диапазоне с точностью установки расстояния между катодом и анодом ± 5 мкм. Более тонкое изменение зазора создавалось пьезоэлементом с чувствительностью $3 \cdot 10^{-2}$ мкм/В.

Рис. 1. Схема измерений эмиссионного тока:

- ПЭ — пьезоэлемент; И — изолятор;
- ОК — острийный катод на дужке; А — анод;
- ЛЭ — люминесцентный экран;
- рА — пикоамперметр; БП — блок питания;
- ПО — цепь накала дужки катода;
- ИВН — источник высокого напряжения;
- мА — микроамперметр



Зазор в диодной системе изменялся в интервале $d = 5 - 5 \cdot 10^4$ мкм. Поворот манипулятора выводил катод из диодной системы и позволял устанавливать его напротив люминесцентного экрана, покрытого прозрачной пленкой окиси олова. Изменения эмиссионной способности катода, вызываемые его очисткой или загрязнением при выдержке в вакууме, наблюдались визуально

и регистрировались фотографически. В качестве анода в диодах с малыми зазорами использовались либо алюминиевые фольги толщиной 3 мкм, либо медная никелированная сетка с размером ячейки 25×25 мкм и прозрачностью 85 %. Использование сетчатого анода позволяло регистрировать изменения эмиссионных изображений катода в процессе регистрации графиков долговременной стабильности.

Катод изготавливался электрохимическим травлением вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм в однонормальном растворе NaOH как на переменном, так и на постоянном токе [4]. Радиус получающегося конического острия при вершине составлял $r = 0,1-0,5$ мкм. Острие крепилось точечной сваркой к дужке из вольфрамовой проволоки диаметром 0,2 мм, которая нагревалась током для очистки поверхности катода от адсорбированных газов и различных поверхностных примесей. Температура нагрева дужки составляла 1500 – 2500 К.

Источник питания обеспечивал регулировку напряжения с точностью 0,1 В в пределах 0–5 кВ с уровнем нестабильности 5 мВ. Ток эмиссии измерялся электрометром Keithly 416 и находился в пределах $10^{-12} \div 10^{-5}$ А.

Низкочастотные флуктуации тока (в диапазоне частот до 20 Гц) регистрировались самописцем. По записям тока I вычислялось среднеквадратичное значение флуктуаций $\langle \Delta I^2 \rangle = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle$, где угловые скобки обозначают усреднение по длине реализации флуктуационного процесса, зафиксированного на ленте самописца. Характеристики нестабильности автоэлектронного тока более высокой частоты ($f = 20-10\ 000$ Гц) исследовались с помощью анализатора спектра шума ЕМС-10, а селективным нановольтметром измерялись компоненты шума частотой до 50 000 Гц.

Исследование флуктуаций тока автоэмиссионного источника

Измерения флуктуаций эмиссионного тока показали, что максимум амплитуды колебаний приходится на частоты до 100 Гц. Пример записи частотного спектра флуктуаций тока, зарегистрированных прибором ЕМС-10, показан на рис. 2. Видно, что относительный уровень флуктуаций тока убывает с частотой. В диапазоне $f \sim 10^3-10^4$ Гц среднеквадратичный уровень флуктуаций тока составляет $10^{-3} \div 10^{-4}$ от уровня флуктуаций в диапазоне десятков герц. Поэтому с точки зрения приложений автоэмиссионных источников электронных пучков, например применения их в электронной микроскопии, наиболее нежелательными являются низкочастотные флуктуации.

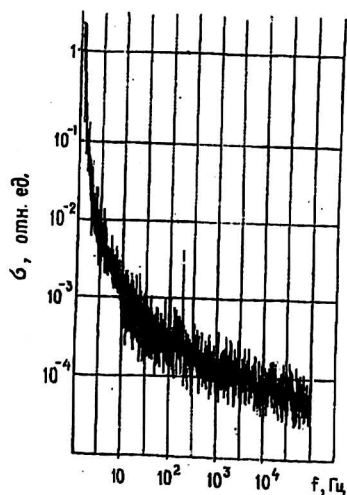
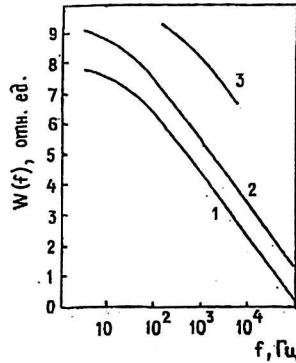


Рис. 2. Пример записи частотного спектра флуктуаций тока

На рис. 3 приведены результаты измерения энергетического спектра флуктуаций $W(f)$ при двух значениях расстояния между катодом и анодом. Из графиков видно, что спектральная плотность флуктуаций убывает с частотой как $1/f^n$, причем при $f < 100$ Гц $n = 1,0 - 1,25$, а при $f > 100$ Гц $n = 2,3 - 2,5$. Полученные данные хорошо согласуются по величине $W(f)$ и показателю степени n с аналогичными результатами, полученными как при микронных [5], так и при сантиметровых [6] межэлектродных зазорах и различных режимах работы.

Рис. 3. Энергетический спектр флуктуаций эмиссионного тока:
 1 — средний ток $3 \cdot 10^{-8}$ А;
 2 и 3 — средний ток 10^{-7} А;
 1 и 2 — снято при зазоре $d = 130$ мкм;
 3 — при $d = 10$ мкм



Было установлено также, что с уменьшением величины межэлектродного зазора меньше ~ 150 мкм уровень флуктуаций увеличивается. Ориентировочные параметры эмиссионного источника: зазор $d \sim 10$ мкм, напряжение 430 В, средний ток $\langle I \rangle = 3 \cdot 10^{-8}$ А. В случае свежего острейного катода, находящегося в вакууме $p = 2 \cdot 10^{-10}$ торр, уровень флуктуаций составлял 12 – 15 % от $\langle I \rangle$.

Нагрев дужки до 2500 К импульсами тока в течение 3–5 с приводил к очистке поверхности катода от адсорбированных газов и примесей. При этом средний эмиссионный ток $\langle I \rangle$ и в еще большей степени его флуктуации уменьшались.

Относительный уровень флуктуаций тока после очистки составил $\sqrt{\langle I_2^2 \rangle} / \langle I \rangle \cong 0,015$. Последующая выдержка катода в неработающем состоянии в вакууме $8 \cdot 10^{-10}$ торр в течение 24 ч приводила к возрастанию этого отношения до $\sim 0,08 - 0,1$.

Исследование долговременной стабильности эмиссионного тока

После прогрева дужки и очистки острейного катода основным типом неустойчивости тока электронной эмиссии остается дрейф тока, т. е. медленное и монотонное изменение тока. На рис. 4 приведены графики изменения тока после прогрева и очистки катода. $I(t)$ — текущее значение тока эмиссии, I_0 — начальное значение тока с предварительно очищенного прогревом остря.

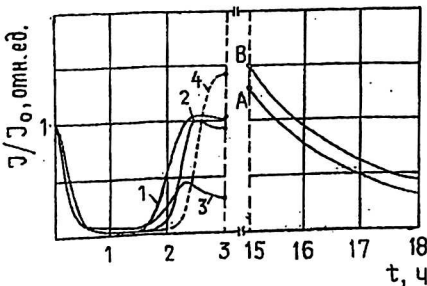


Рис. 4. Графики долговременного изменения тока при $d = 130$ мкм:
 1 — начальное значение среднего тока $I_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ А;
 2 — $I_0 = 2 \cdot 10^{-8}$ А; 3 — $I_0 = 2 \cdot 10^{-8}$ А (снято по точкам), везде анод — сетка; 4 — $I_0 = 2 \cdot 10^{-8}$ А, сплошной анод из алюминиевой фольги

Во всех исследованных случаях (при разных давлениях остаточного газа, разных зазорах d и разных анодах) получается качественно один и тот же ход зависимости $I(t)$.

Вначале ток убывает (стадия I), затем выходит на некоторый почти стационарный уровень (стадия II), потом начинается рост тока (стадия III) и выход в новое почти стационарное состояние (стадия IV). Качественно аналогичное поведение тока было описано в [7]. После выдержки катода в течение 15–18 ч в неэмиттирующем состоянии ток I возрастает. Например, точка B на рис. 4 получена при подаче напряжения, соответствующего точке A . Дальнейшее изменение тока после выдержки в вакууме обнаруживает тенденцию к убыванию (стадия V).

Наблюдения долговременных эволюций тока при различных зазорах и разных давлениях остаточных газов, а также наблюдения эмиссионных изображений вершин острых катодов на люминесцентном экране указывают на то, что изменения тока вызваны адсорбцией молекул газовой фазы на катоде. На стадии убывания (I) тока адсорбция на первоначально атомно-чистой поверхности катода приводит к увеличению работы выхода ϕ -электронов и уменьшению плотности тока J согласно уравнению Фаулера-Нордгейма:

$$J = \frac{AE^2}{\phi} \exp\left[-\frac{B\phi^{3/2}}{E}\right]. \quad (1)$$

Здесь A и B – постоянные; E – напряженность электрического поля на катоде.

Для подтверждения этого вывода воспользуемся подходом, предложенным в работе [8]. Согласно уравнению Фаулера-Нордгейма, для постоянства тока эмиссии необходимо выполнение условия $\phi^{3/2}/E = \text{const}$. Так как при неизменности геометрии источника электронов напряженность поля E прямо пропорциональна напряжению на источнике V , то это условие переходит в

$$\frac{\phi^{3/2}}{V} = \text{const}. \quad (2)$$

Таким образом, для $I = \text{const}$, изменение работы выхода электронов ϕ , происходящее в результате адсорбции, необходимо компенсировать изменением напряжения V . Адсорбция простых газов на металлы, как правило, подчиняется кинетическому уравнению первого порядка:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\lambda(1-\theta). \quad (3)$$

Здесь λ – константа скорости адсорбции;

θ – степень покрытия поверхности катода адсорбатом.

Связь изменения работы выхода $\Delta\phi$ с величиной θ устанавливается уравнением Гельмгольца [8]:

$$\Delta\phi = g\eta\theta, \quad (4)$$

где η – дипольный момент молекул адсорбата;

g – постоянная, $g = 2 - 4$.

Тогда из (2) – (4) следует закон изменения напряжения V во времени, который должен компенсировать изменение ϕ вследствие адсорбции, чтобы ток эмиссии I оставался постоянным:

$$y = \frac{V_{\infty}^{2/3} - V^{2/3}}{V_{\infty}^{2/3} - V_0^{2/3}} = \exp(-\lambda t),$$

V_0 — начальное значение напряжения при регистрации дрейфа эмиссионного тока;

V_{∞} — асимптотическое значение напряжения при t , стремящемся к бесконечности. Если эта модель справедлива, то зависимость $\ln y$ от t должна быть линейной.

На рис. 5 представлены графики зависимости $\ln y$ от времени, полученные для ряда экспериментальных условий. Из графиков видно, что действительно полученные зависимости близки к линейным. При этом за V_{∞} взято значение напряжения, которое компенсирует спад тока до значения на стадии II, согласно рис. 4. Иными словами, считается, что асимптотическое состояние практически наступает ко времени, когда ток должен выйти на стадию II. На самом деле, это не вполне верно, так как на этой стадии в игру вступают другие процессы, которыми ранее можно было пренебречь из-за их малой интенсивности, и которые ведут к последующему росту тока эмиссии.

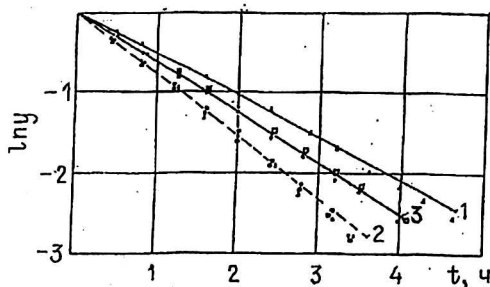


Рис. 5. Зависимость параметра y от времени t для стадии I спада тока при зазоре $d = 130$ мкм:

- 1 — сплошной анод, $I = 10^{-7}$ А;
 2 — анод — сетка, $I = (10^{-9} - 3 \cdot 10^{-8})$ А;
 3 — сплошной анод, $I = 2 \cdot 10^{-9}$ А;
 ○ — $I = 3 \cdot 10^{-8}$ А; □ — $I = 10^{-8}$ А; ▽ — $I = 10^{-9}$ А;
 × — $I = 10^{-8}$ А; + — $I = 2 \cdot 10^{-9}$ А; ▽ — $I = 10^{-7}$ А

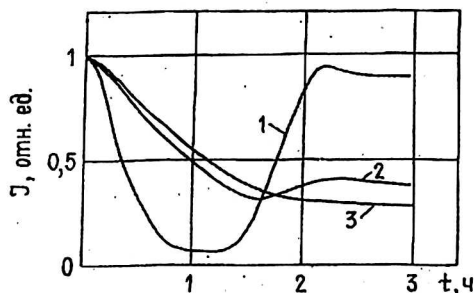


Рис. 6. Влияние ширины межэлектродного зазора d на долговременной эволюции тока (анод сплошной), $I = 2 \cdot 10^{-8}$ А:
 1 — $d = 80$ мкм; 2 — $d = 60$ мкм;
 3 — $d = 30$ мкм

Дальнейший рост тока (на стадии III), по-видимому, не может быть приписан только адсорбции или десорбции на катоде. В пользу этого говорит то, что скорость возрастания тока на стадии III и уровень, на который он выходит на стадии IV, зависят от величины тока. На эти же величины влияет также вид анода (сплошной из алюминиевой фольги, сетчатый или анод в виде люминофорного экрана), тогда как убывание тока на стадии I практически не зависит от этих условий, а определяется давлением остаточных газов и шириной зазора d . На рис. 6 представлены графики долговременной неустойчивости тока для ряда значений d , иллюстрирующее это обстоятельство. Видно, что чем уже межэлектродный зазор, тем меньше темп спада тока эмиссии, т. е. интенсивность адсорбции на поверхности катода уменьшается с уменьшением зазора.

Можно предположить, что на третьей стадии эволюции тока в действие вступает анод. Это действие может состоять в изменении состава остаточных газов внутри зазора в результате десорбции вещества с поверхности анода и в усилении бомбардировки катода ионами, образовавшимися из десорбированных с анода газов.

В пользу предположения об участии анода в росте тока эмиссии свидетельствует также то, что уровень, на который выходит отношение I/I_0 на стадии IV, тем выше, чем меньше I_0 . Предельный случай, показанный на рис. 4 кривой 3, соответствует практически нулевому среднему токоотбору. При этом значения тока измерялись не непрерывно, как в остальных случаях, а в течение ~ 10 с с промежутками в 15 мин, когда ток от источника не отбирался. Можно считать, что в этом случае имеет место чисто адсорбционно-десорбционный механизм изменения эмиссионного тока, а состояние анода в этом случае не менялось, так как воздействие электронного пучка на анод было минимально возможным.

Заключение

Были изучены два типа неустойчивости тока электронной эмиссии в источниках электронных пучков на основе автоэлектронных катодов — флуктуации тока в диапазоне частот от единиц герц до десятков килогерц и дрейфовые изменения тока в течение десятков минут и часов.

Первый тип флуктуаций в определенной степени устраняется прогревом и очисткой острийных автокатодов, а второй — требует для своего уменьшения применения специальных технических решений. В частности, использование устройств с обратной связью для стабилизации дрейфа тока и отчасти его флуктуаций [9, 10] позволяет создавать приемлемые по стабильности источники электронных пучков.

Литература

1. Brodie I., Spindt C.A.//Adv. Electron. Electron. Phys. 1992. V. 83. № 1.
2. Ненакаливаемые катоды/Под ред. М. И. Елинсона. — М. 1974.
3. Васин В. А., Запорожченко В. И., Невровский В. А., Раховский В. А.//Изв. АН СССР. Сер. Физическая. 1980. Т. 44. № 2. С. 415—421.
4. Карпенко А. Д., Лобачев Ю. С., Шишкин В. А.//Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 12. С. 2646.
5. Spindt C. A. et al.//J. Appl. Phys. 1976. V. 47. P. 5248.
6. Swanson L. W.//Surface Sci. 1978. V. 70. P. 165.
7. Juttner B., Wolff H.//Phys. Stat. Solidi (a). 1975. V. 27. P. 403.
8. Staib G. F., Moll E.//J. Phys. D: Appl. Phys. 1973. V. 6. P. 243.
9. Васин В. А., Запорожченко В. И., Раховский В. И.: А. с. 594540/Бюлл. изобр. 1978. № 7. 193.
10. Васин В. А., Запорожченко В. И., Невровский В. А., Раховский В. И.: А. с. 974907. 1979.

Study of current instability in cold-emission sources of electron beams

V. A. Vasin

Federal State Enterprise «Polygon MT», Novyi Byt, Chekhov district, Moscow region

Two types of current instability were studied experimentally in cold-emission electron sources. Long term drifts were recorded in narrow ($d = 10 - 100 \mu\text{m}$) vacuum gaps of the sources. They are explained by adsorption-desorption processes at cathode surfaces. Fluctuations of emission currents in the sources with fresh cathodes were studied. Power spectra of current fluctuations were recorded and compared with known laws of noise spectra of emission.