

УДК 539.1.04:539.2:669.292

DOI: 10.53815/20726759_2021_13_3_118

*С. В. Зайцев¹, В. П. Бабаев², К. А. Иншакова², О. Д. Зидан², Е. П. Шешин³,
И. Н. Косарев³, А. В. Кудряшов³, Б. И. Маснавиев³*

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет

²Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Воздействие ультразвуковых колебаний на стабильность эмиссии точечного автокатода

Предложен метод повышения стабильности и устойчивости к ионной бомбардировке точечных (острийных) автоэлектронных катодов. К катоду подводят ультразвуковые колебания, которые вследствие его конусообразной формы фокусируются на его вершине. Ионы остаточных газов, создаваемые электронным ударом, ранее бомбардировавшие вершину катода, теперь расфокусируются. В результате снижается эрозия эмиттирующей области и повышается стабильность тока. Это позволяет снизить требования к вакуумным условиям.

Ключевые слова: ультразвуковое колебание, эмиссия, стабильность, катод, математическое моделирование.

*S. V. Zaitsev¹, V. P. Babaev², K. A. Inshakova², O. D. Zidan², E. P. Sheshin³,
I. N. Kosarev³, A. V. Kudryashov³, B. I. Masnaviev³*

¹Faculty of Physics M.V.Lomonosov Moscow State University

²Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology

Effect of ultrasonic vibrations on the emission stability of a point tip autoelectronic cathode

We propose a method for increasing the stability and resistance to ion bombardment of point tip autoelectronic cathodes. Ultrasonic vibrations are brought to the cathode, which, due to its conical shape, are focused on its top. Residual gas ions generated by an electron impact, previously bombarding the top of the cathode, are now defocused. As a result, the erosion is reduced and current stability is increased. This reduces the requirements for vacuum conditions.

Key words: ultrasonic vibration, emission, stability, cathode, mathematical modeling.

1. Введение

Повышение стабильности автоэлектронной эмиссии в техническом вакууме – важная научно-техническая проблема. Ее актуальность определяется тем, что имея рекордные параметры (высокая электронная яркость, низкий разброс энергий электронов) точечные автоэлектронные катоды-микроострия устойчиво работают лишь в вакууме 10^{-8} Па [1]. Одной из основных причин неустойчивости и флуктуаций автоэлектронного тока является бомбардировка эмиттирующей поверхности катода [2]. Для уменьшения этого неблагоприятного воздействия предложен ряд методов. Так, [3] в катодном узле предусматривается

© Зайцев С. В., Бабаев В. П., Иншакова К. А., Зидан О. Д., Шешин Е. П., Косарев И. Н., Кудряшов А. В., Маснавиев Б. И., 2021

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2021

разделение траекторий электронов и ионов за счет введения дополнительного анода. В [4] для этой же цели вводится источник магнитного поля. В результате снижается ионная бомбардировка. Однако это значительно усложняет конструкцию и увеличивает ее габариты. В обзорах [5, 6, 7] проанализирован ряд методов повышения стабильности автокатодов. Это – использование материалов, более устойчивых к ионной бомбардировке, подогрев эмиттера для залечивания повреждений, использование в качестве рабочей среды слабодисперсионных газов. Для устранения адсорбированных слоев и некоторого сглаживания поверхности эмиттера применяется его кратковременный нагрев при отключенном поле. В [8] предложено подавать на катод высокочастотное высокое напряжение. При этом налетающие ионы остаточного газа довольно успешно отклоняются. Однако использование высокочастотного высокого напряжения допустимо далеко не во всех конструкциях, в которых используются автоэлектронные катоды. Таким образом, ни один из известных методов не позволяет полностью решить проблему. В связи с этим не лишен смысла вопрос о комбинировании различных методов.

2. Методика эксперимента

В данной работе предлагается использовать для дополнительной защиты автокатада высокочастотные ультразвуковые колебания, которые прикладываются к вершине автокатада. Держатель катода приводят в акустический контакт с излучателем ультразвука. При этом ультразвуковые колебания распространяются по держателю и доходят до вершины катода-острия. Его вершина начинает совершать быстрые колебательные движения. Определим условия, при которых особенно заметно проявление эффекта. Если острие совершает поперечные колебания по закону:

$$Y = A \sin(2\pi t/T),$$

где A – амплитуда колебаний, T – период колебаний, тогда скорость поперечного смещения будет:

$$v(t) = dY/dt = (2\pi A/T) \cos(2\pi t/T).$$

Вероятность найти вершину острия в области dY со смещением Y от положения равновесия будет пропорциональна времени нахождения его в этой области

$$dt = dY/v(Y),$$

где

$$v(Y) = (2\pi A/T) \cos(\arcsin(Y/A)) = (2\pi A/T) \sqrt{1 - (Y/A)^2}.$$

Аппроксимируем острие заряженным шариком радиусом $R_0 = 10^{-7}$ м с напряженностью электрического поля у его поверхности $E_0 = 10^9$ В/м. Предположим, что ион кислорода с единичным зарядом q образовался в результате электронного удара на расстоянии R^* от острия, при изменении радиуса от R^* до R ион приобретет энергию

$$\frac{mv^2(R)}{2} = \int_R^{R^*} qE(R) dR = \frac{qE_0 R_0^2 (R^* - R)}{RR^*}, \quad (1)$$

где $v(R)$ – скорость иона, m – масса иона, q – заряд иона,

$$E(R) = E_0 R_0^2 / R^2$$

– зависимость напряженности электрического поля от R . Из (1) можно определить скорость иона в каждой точке и, следовательно, время его полета t :

$$\begin{aligned}
 t &= \int_{R_0}^{R^*} \frac{dR}{v(R)} = -\frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{mR^*}{2qE_0}} \int_{R^*}^{R_0} \frac{\sqrt{RdR}}{\sqrt{R^*-R}} = \\
 &= \frac{R^*}{R_0} \sqrt{\frac{2mR^*}{qE_0}} \left(\frac{\sqrt{R_0(R^*-R_0)}}{2R^*} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R^*-R_0}{R_0}} \right).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Из формулы (2) для однозарядного иона атомарного кислорода, образовавшегося в результате электронного удара без начальной скорости, на расстоянии 1 мм от эмиттирующей поверхности получаем время пролета мкс. Следовательно, при частотах приложенного ультразвука 100 кГц за время пролета иона произойдет несколько полных колебаний, что полностью «дезориентирует» налетающий ион. Для проверки этого вывода было произведено математическое моделирование процесса пролета ионов при данных условиях, которые случайным образом возникали без начальной скорости в области перед колеблющимся острием. Колебания острия аппроксимировались движением притягивающего центра между двумя точками. Подавляющее большинство ионов попадают в ту область, где вероятность нахождения острия минимальна или бомбардируют боковую неэмиттирующую поверхность, что не оказывает значительного влияния на стабильность эмиссии и даже может оказаться очень полезным, так как при этом сдираются загрязнения, которые также являются одной из причин нестабильности [7, 9, 10].

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Пример. Был опробован острый автоэлектронный эмиттер из вольфрама в вакууме 10^{-5} Па и наложении ультразвуковых колебаний с частотой 500 кГц. Ультразвуковые колебания создавались с помощью пластинки из пьезокерамики типа ЦТС19 диаметром 10 мм, подвешенной в вакууме на двух проводниках, по которым подводилось питание от ультразвукового генератора. Острие-катод было припаяно к боковой поверхности пластинки. В данной схеме для удобства подачи ультразвука катод был заземлен, а на противоположный электрод подавали положительное высокое напряжение. При этом флуктуации автоэлектронного тока в вакууме 10^{-5} Па снижаются не менее чем вдвое по сравнению с исходным состоянием. Хотя стабильность значительно повышается, но все же встречаются отдельные всплески тока, которые можно объяснить попаданием отдельных ионов на эмиттирующую поверхность. Вследствие усиленной бомбардировки боковой поверхности возможна заточка острия образца внутри вакуумной камеры. Это обстоятельство является особенно важным в случаях большой химической активности материала катода на воздухе (так, образец из циркония покрывается на воздухе окисной пленкой, которая насквозь проедает острие) или, когда для образца сложного состава не подобраны подходящие условия его изготовления.

4. Выводы

Предложенный метод позволит использовать точечные автоэлектронные катоды в техническом вакууме. Это должно дать значительный экономический эффект. Так, стоимость электронного микроскопа с автоэлектронным катодом на порядок выше, чем с традиционным катодом. Это вызвано необходимостью создания гораздо более высокого вакуума.

Литература

1. Marcus R.B., Ravi T.S. Atomically sharp silicon and metal field emitters // IEEE Trans. Electron Devices. 1991. V. 38, N 10. P. 2289–2293.
2. Елмисон М.И. Ненакаливаемые катоды. Москва : Сов. Радио, 1974. 336 с.
3. Елмисон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. Москва : Физматгиз, 1958. 274 с.
4. Бондаренко В.В. Способы повышения стабильности и срока службы автоэлектронных катодов // Электронная техника. 1973. Сер. 1, вып. 6. С. 74–82.

5. *Бондаренко Б.В., Рыбаков Ю.Л., Шешин Е.П., Щука А.А.* Автоэлектронные катоды и приборы на их основе. Москва : ЦНИИ «Электроника», 1981. 58 с.
6. *Павлов В.Г.* Влияние объемного заряда эмитированных электронов на полевую электронную эмиссию // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, вып. 12. С. 72–79.
7. *Бондаренко Б.В.* Проблема стабильности автоэлектронной эмиссии и некоторые пути ее решения // Электронная техника. Серия Электроника СВЧ, 1980.
8. *Баскин Л.М., Ананьев Л.Л., Борисов Д.А., Кантонистов А.А., Фурсей Г.Н.* Эффект устранения ионной бомбардировки автоэлектронного катода // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28, № 12, С. 2462–2464.
9. *Tsong T.T.* Dynamic behaviour and instability of field emitter surfaces IEEE Trans // Electron Devices. 1991. V. 38, N 10. P. 2317–2319.
10. *Баскин Л.М., Глазанов Д.В., Фурсей Г.Н.* Влияние термоупругих напряжений на процессы разрушения острийных автокатодов и переход к взрывной эмиссии // Журнал технической физики. 1989. Т. 59, вып. 5. С. 130–133.

References

1. *Marcus R.B., Ravi T.S.* Atomically sharp silicon and metal field emitters. IEEE Trans. Electron Devices. 1991. V. 38, N 10. P. 2289–2293.
2. *Elinson M.I.* Nenakalivaemye katody [Non-flammable cathodes]. Moscow : Sovetskoe Radio [Soviet radio]. 1974. 336 p. (in Russian).
3. *Elinson M.I., Vasil'ev G.F.* Avtoelektronnaya emissiya [Field emission]. Moscow : Fizmatgiz [State publishing house of physical and mathematical literature], 1958. 274 p. (in Russian).
4. *Bondarenko B.V.* Sposoby povysheniya stabil'nosti i sroka sluzhby avtoelektronnnykh katodov [Methods for increasing the stability and service life of autoelectronic cathodes]. Elektronnaya tekhnika [Electronic]. 1973. Ser. 1, N 6. P. 74–82. (in Russian).
5. *Bondarenko B.V., Rybakov Yu.L., Sheshin E.P., Shchuka A.A.* Avtoelektronnnye katody i pribory na ih osnove [Autoelectronic cathodes and devices based on them]. Moscow : CSRII «Elektronika» [Electronic], 1981. 58 p. (in Russian).
6. *Pavlov V.G.* Vliyanie ob'emnogo zaryada emitirovannykh elektronov na polevuyu elektronnuyu emissiyu [Influence of the volume charge of emitted electrons on the field electron emission]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of technical physics]. 2004. V. 74, I. 12. P. 72–79. (in Russian).
7. *Bondarenko B.V.* Problema stabil'nosti avtoelektronnnoy emissii i nekotorye puti ee resheniya [The problem of stability of car electronic emissions and some ways to solve it]. Elektronnaya tekhnika [Electronic]. Seriya Elektronika SVCH. 1980. (in Russian).
8. *Baskin L.M., Anan'ev L.L., Borisov D.A., Kantonistov A.A., Fursey G.N.* Effekt ustraneniya ionnoj bombardirovki avtoelektronnogo katoda [Effect of elimination of ion bombardment of an autoelectronic cathode]. Radiotekhnika i elektronika [Radio Engineering and Electronics]. 1983. V. 28, N 12. P. 2462–2464. (in Russian).
9. *Tsong T.T.* Dynamic behaviour and instability of field emitter surfaces IEEE Trans. Electron Devices. 1991. V. 38, N 10. P. 2317–2319.
10. *Baskin L.M., Glazanov D.V., Fursey G.N.* Vliyanie termouprugih napryazhenij na processy razrusheniya ostrijnykh avtokatodov i perekhod k vzryvnoj emissii [The effect of thermoelastic stresses on fracture of the tip-shaped autocathodes and the transition to explosive emission]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of technical physics]. 1989. V. 59, I. 5. P. 130–133. (in Russian).