

# Исследование автоэмиссионных активированных катодов

© В.А.Смирнов, \*В.И. Кочнев, \*А.В. Коннов, Е.П. Шешин

torlab144@gmail.com

Московский физико-технический институт (государственный университет)  
\*АО «НПП «Торий»

*Рассмотрены различные типы активированных автоэмиссионных катодов с подачей эмиссионно-активных компонентов на эмиттер из постороннего источника и изнутри материала эмиттера. Показаны возможные пути снижения работы выхода автоэмиссионных катодов.*

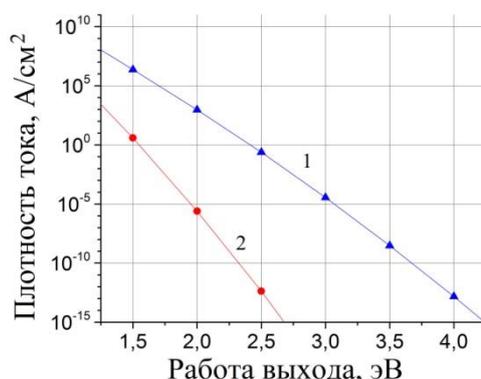
*Study of field emission activated cathodes. V.A. Smirnov, V.I. Kochnev, A.V. Konnov, E.P. Sheshin. Various types of activated cathodes with the supply of emission-active components to the emitter from the external source and from the bulk of the emitter are considered. Possible ways to reduce work function of field emission cathodes are shown.*

В технике электровакуумных приборов (ЭВП) при использовании автоэмиссионных катодов (далее автокатод, автоэмиттер) на основе тугоплавких металлов (Ta, W, Mo) и модифицированного углерода с работой выхода 4,2 – 4,5 эВ для получения приемлемых плотностей тока  $\sim 0,1$  А/см<sup>2</sup> необходима напряженность электрического поля порядка  $10^7$  В/см [1]. Это условие затрудняет применение автокатодов, особенно в мощных СВЧ приборах, работающих с анодным напряжением до 20 кВ и более, несмотря на прогресс в конструировании электронно-оптических систем с многоячейстой структурой эмиттеров [2]. При больших напряжениях трудно избежать пробоев и искрений, разрушающих эти структуры. Поэтому, появились работы по активированным автокатадам [3], которые, согласно теории Фаулера – Нордгейма, с меньшей работой выхода эмиттера могут обеспечить заданную плотность тока при значительно пониженной напряжённости поля.

На рис. 1. представлены результаты расчёта по формуле (1) зависимости отбора тока от работы выхода. Видно, что при одинаковой напряжённости поля для автоэмиттеров с  $\phi$  2 – 2,5 эВ возможен отбор тока на несколько порядков выше, чем для эмиттеров на основе традиционно используемых материалов с работой выхода  $\phi$  4 – 4,5 эВ. Также возможно существенно снизить напряжённость поля при сохранении величины отбираемого тока.

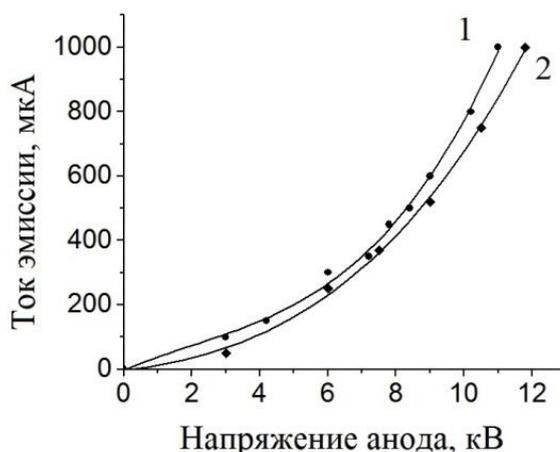
Однако, такая активация должна обеспечивать непрерывное восстановление эмиссионной способности катода, подвергающегося дезактивирующим факторам – ионной бомбардировке и нагреву проходящим током. Работы по исследованию доставки эмиссионно – активного вещества, например, Ва, на рабочую поверхность эмиттера, ведутся в двух основных направлениях: первое – напыление из посторонних источников; второе – подача изнутри материала эмиттера. Во втором случае эмиттер должен быть выполнен из композита (например, сплава), содержащего эмиссионно –

активное вещество, и иметь температуру, обеспечивающую нужную скорость диффузии этого вещества к поверхности эмиттера. Таким образом, необходим подбор композита, у которого возможен разогрев его структуры (иглы, фольги) проходящим током эмиссии, а также с нужной прочностью физико-химической связи эмиссионно-активного вещества в композите.

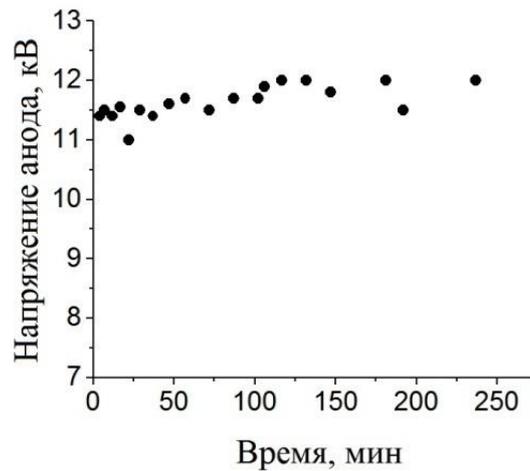


**Рис. 1.** Зависимость плотности тока катода от работы выхода;  
1 – напряжённость поля  $10^7$  В/см; 2 – напряжённость поля  $5 \times 10^6$  В/см.

Успехи по первому направлению позволили создать СВЧ приборы с автозапуском – маломощные магнетроны [4,5], в которых комбинированный катод содержит автоэмиттер из тонкой Та фольги и вторичный эмиттер из Pd-Wa сплава. Под действием электронной бомбардировки и нагрева вторичный эмиттер испаряет Ва, который активирует автоэмиттер, снижая его работу выхода. В макете такого магнетрона с анодом и коаксиально размещенным внутри него катодом нами исследовалась автоэмиссия в диодном режиме (без магнитного поля). Автоэмиттер выполнен в виде 5 колец из танталовой фольги толщиной 4 мкм с наружным диаметром 3,5 мм, т. е. с общей площадью эмитирующих торцов  $0,66 \text{ мм}^2$  (с учётом боковой поверхности фольги шириной 4 мкм). С одной стороны он выступает над вторичным эмиттером на 0,12 мм, а с другой его расстояние до анода составляло 0,45 мм, просвет между кольцами равен 0,5 мм. Прибор откачивался с прогревом до  $10^{-7} - 10^{-8}$  мм рт. ст. На рис. 2. представлена вольт – амперная характеристика автоэмиттера до 12 кВ, а на рис. 3. – изменение анодного напряжения во времени при отборе постоянного тока 1 мА.



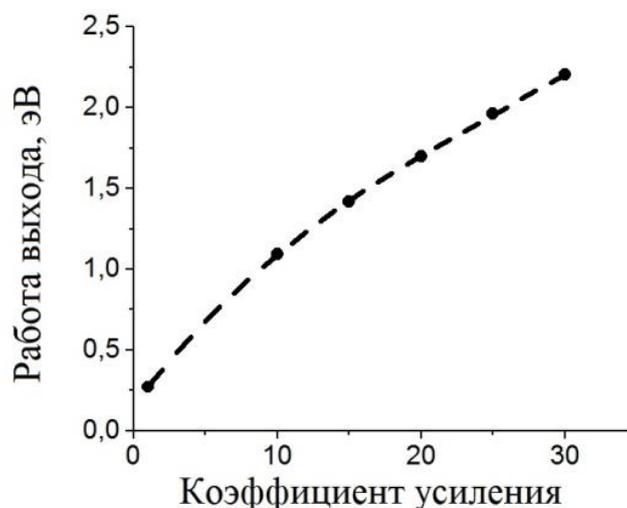
**Рис. 2.** ВАХ автокатода: 1 – начальные измерения; 2 – после 5 часов прогона.



**Рис. 3.** Зависимость анодного напряжения во время испытания автокатода с отбором тока 1 мА.

Видно, что свойства автоэммитера в течение 5 часов испытаний были практически стабильны. При токе  $I = 1\text{ мА}$  (соответствующем анодному напряжению 12 кВ) плотность автоэмиссионного тока для эффективной поверхности автоэммитеров ( $j$ ) составила  $1,5 \times 10^{-1} \text{ А/см}^2$ . Расчётная напряженность электрического поля  $E_0 = 2,7 \times 10^5 \text{ В/см}$  без учёта коэффициента усиления поля, который можно представить как отношение выступа фольги к её толщине  $K = 0,12 \text{ мм} / 0,004 \text{ мм} = 30$ . Тогда максимальное поле  $E = E_0 \times K = 8,1 \times 10^6 \text{ В/см}$ . На рис. 4. приведены значения работы выхода ( $\phi$ ) автоэммитера в зависимости от  $K$ , полученные в результате решения уравнения Фаулера – Нордгейма в форме [1]:

$$j = 1,4 \times 10^{-6} \left( \frac{E^2}{\phi} \right) \times 10^{\left( \frac{4,39}{\sqrt{\phi}} \right)} \times 10^{-2,82 \times 10^7 \left( \frac{\phi^{3/2}}{E} \right)}. \quad (1)$$

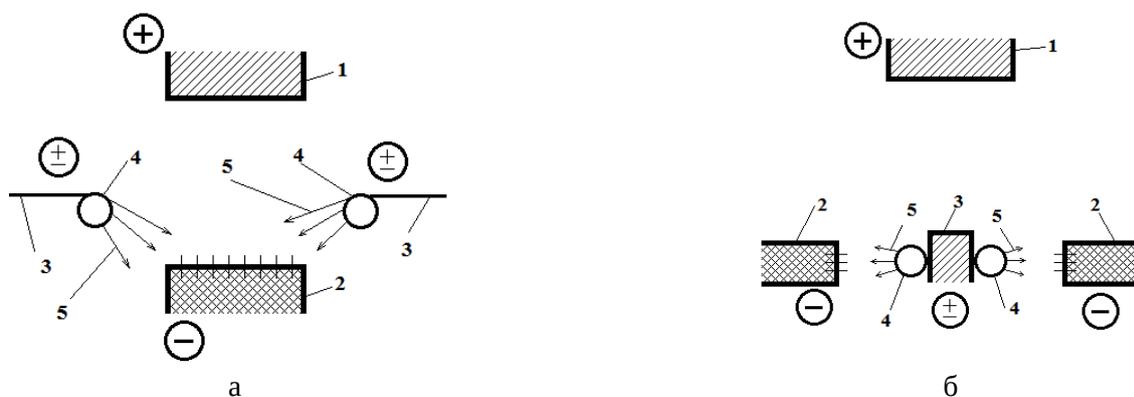


**Рис. 4.** Зависимость работы выхода от коэффициента усиления поля.

Величина  $\phi$  при  $E_0$  для системы Та-Ва неправдоподобно мала, также  $\phi$  при  $E$  требует коррекции в меньшую сторону, т. к. есть некоторое экранирование фольг друг другом, и максимальное значение  $K$  будет несколько меньше. Наиболее вероятный диапазон значений  $\phi$  2,0 – 2,2 эВ, что соответствует литературным данным для адсорбционных систем Та – Ва, Та – Ва,О (наличие следов кислорода всегда возможно) [6] и экспериментально подтверждает активирование автоэмиттера напылением Ва со вторичного эмиттера.

Для более эффективного активирования автоэмиттеров в магнетронах с автозапуском и с целью уменьшения расхода драгметаллов в [7] предлагается вторичный эмиттер выполнять из спечённых порошков, содержащих один из металлов – Ni, Fe, Co и один из интерметаллидов Ва с Cu, Al или Pd, при этом содержание Ва во вторичном эмиттере должно составлять 2 – 10% вес., а в качестве интерметаллидов Ва использовать вещества  $BaAl_4$ ,  $BaCu_{13}$  и  $BaPd_5$ .

При использовании автоэмиссионных катодов в приборах О-типа нами предложены схемы СВЧ приборов [8], в которых эмитирующие поверхности находятся в прямой видимости источника – испарителя эмиссионно – активного вещества. Этот источник может быть расположен на аноде или управляющем электроде. Примеры вариантов такой схемы показаны на рис. 5 а, б. Здесь интересно отметить имеющиеся факты паразитной автоэмиссии в практике серийно выпускаемых генераторов мощных импульсов (ГМИ) с оксидным термокатодом. Наблюдались значительные устойчивые токи автоэмиссии до 100 – 200 мА с сеток (охлаждённых водой), запылённых продуктами испарения с катода и подогревателя ( $BaO$ , Ва,  $MgO$ ) при напряжениях сетка – анод 70 – 90 кВ и расстояниях 14 мм. Аноды (охлаждаемые водой) прорезались насквозь потоком автоэлектронов.



**Рис. 5.** Варианты схемы изготовления катода

1 - анод, 2 – автокатод, 3 – управляющий электрод, 4 – источник-испаритель эмиссионно-активного вещества, 5 – поток бария.

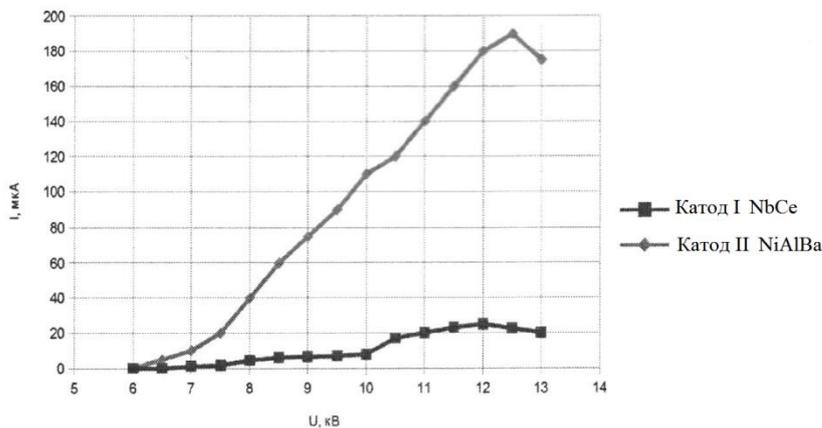
По второму направлению исследовалась автоэлектронная эмиссия образцов NiAlBa и NbCe сплавов. Эти материалы разработаны как альтернатива вторично – электронным эмиттерам на основе сплавов PtBa и IrLa с целью замены драгметаллов. Поскольку Ni с Ва не дают сплавов, был введён Al в качестве связки между основой и эмиссионно – активным элементом. Nb с Се образуют ограниченные твёрдые растворы [9]. По данным [10] рабочая температура NiAlBa сплава лежит в диапазоне 650-900

Исследование автоэмиссионных активированных катодов [Электронный ресурс] / В.А.Смирнов, В.И. Кочнев, А.В. Коннов, Е.П. Шешин // Вестник РВО. – 2019. – № 1 (23.03.2019). – Режим доступа:

<https://www.vestnik-rvo.ru/ru/issues/2019-01/188/>

°С, работа выхода 2,2 – 2,4 эВ. Для NbCe сплава рабочая температура – 1000 – 1400 °С, а работа выхода по измерениям термоэмиссии составила 2,7 – 2,8 эВ при 1400 °С.

Исследовались образцы 5×5 мм из фольги толщиной 0,3 мм. С одного торца катод затачивался с двух сторон до толщины 10 мкм. Измерения проводились в разборной установке при вакууме  $10^{-5}$  мм. рт. ст., расстояниях катод – анод 3 мм и напряжениях 6-12 кВ. На рис. 6. представлены первые ВАХ для 2-х образцов. Получены токи 190 мкА для NiAlBa сплава (плотность тока  $1,27 \times 10^{-1}$  А/см<sup>2</sup> с учётом эмиссии боковой поверхности шириной в 10 мкм) и 25 мкА для NbCe сплава (плотность тока  $1,67 \times 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>).



**Рис. 6.** ВАХ автокатода: 1 – на основе NbCe сплава, 2 – на основе сплава NiBa

Работы выхода, рассчитанные по формуле (1) и при  $K = 200$ , соответственно равны 2.2 и 2.3 эВ, что согласуется также с параметрами адсорбционных систем Ni-Ba, Nb-La, Nb-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [6]. После 70 минут работы наблюдалось медленное падение эмиссии возможно из-за плохого вакуума. В дальнейшем предполагается продолжить исследования на тонкой фольге в высоком вакууме.

Результаты измерений указывают на перспективность применения сплавов с пониженной работой выхода в качестве автоэммиттеров.

#### Литература

1. Елинсон М. Н., Ненакаливаемые катоды, М. «Советское радио», 1974 г.
2. Дармаев А. Н., Комаров Д. А., Морев С. П., Шестёркин В.Н., Шалаев П. Д., Экспериментальные исследования и численное моделирование электронного потока, формируемого матричными углеродными автоэмиссионными ячейками Григорьева – Шестёркина, Радиотехника и электроника 2014 г., том 59, №8, с. 774-781.
3. Федоров А. Н., Лобанов С. В., Шешин Е. П., Термо- и автоэмиссионные свойства наноструктурированных катодов, изготовленных на основе интеркалированного пирографита, Труды 25 международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела», Севастополь, 2015 г., стр. 358-366.
4. Пипко Ю. А., Семёнов Л. А., Галактионова И. А., Еремеева Г. А., Есаулов Н. П., Ильин В. Н., Марголис Л. М., Магнетрон с безнакальным катодом. Патент РФ №2019877 приоритет от 17 апреля 1991 г.

5. Ли И. П., Калушин С. В., Пути совершенствования конструкции и технологии изготовления катодов малогабаритных магнетронов импульсного действия, XX юбилейная научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника», материалы конференции сентябрь 2013 г., стр. 243.
6. Фоменко В. С., Эмиссионные свойства материалов, справочник, «Наукова Думка», Киев, стр. 219, 1981г.
7. Смирнов В. А., Чудин В. Г., Мельничук Г. В., Гурко А. А., Потапов Ю. А., Судаков Ю.С., Сигалаев В. Н., Магнетрон с безнакальным катодом, патент РФ на полезную модель №146140, приоритет 18.04.2014 г.
8. Смирнов В. А., Мельничук Г. В., Чудин В. Г., Комаров Д. А., Кочнев В. И., Морев С. П., СВЧ прибор О-типа с безнакальным катодом, патент РФ на полезную модель №155052, приоритет 29.10.2014 г.
9. Савицкий Е. М., Терёхова В. Ф., Буров И. В., Журнал неорганической химии, 1462-1463, 1959 г.
10. Судаков Ю. С., Смирнов В. А., Гугнин А. А., Мазин А. М., Горлова В. В., Эмиссионные свойства сплавов Ni – Cu – Ва и Ni – Al – Ва., Электронная техника, Серия I, Электроника СВЧ, Выпуск 6, стр. 76-77, 1976 г.