

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНОГО СОСТОЯНИЯ НА АВТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА КПУ МАГНЕТРОНОВ С МГНОВЕННОЙ ГОТОВНОСТЬЮ

INFLUENCE OF THE VACUUM STATE ON THE FIELD EMISSION PROPERTIES OF THE CATHODE-HEATING UNIT OF MAGNETRONS WITH INSTANT READINESS

И.П.Ли, В.И.Капустин¹, А.В.Шуманов, Д.В.Бычков, Н.Е.Леденцова, А.А.Полунина, Ю.В.Поляков / i.li@pluton.msk.ru, kapustin@mirea.ru

I.P.Li, V.I.Kapustin, A.V.Shumanov, D.V.Bychkov, N.E.Ledentsova, A.A.Polunina, Y.V.Polyakov

АО «Плутон», Москва

¹МИРЭА-Российский технологический университет, Москва

Вакуумное состояние играет важную роль в работе электровакуумных СВЧ-приборов. Этот параметр оказывает определяющее влияние на эмиссионные свойства катодов в приборах, поэтому важно определить уровень максимально допустимого давления остаточных газов. В данной статье представлены результаты исследования влияния вакуумного состояния на автоэлектронную эмиссию катодов безнакальных магнетронов.

The vacuum state plays an important role in the operation of the electrovacuum microwave devices. This parameter has a decisive influence on the emission properties of cathodes in devices, that is why it is important to determine the level of maximum allowable pressure for cathodes. This article presents the results of the research of the vacuum state effect on the field emission of the cathodes of non-incandescent magnetrons.

Ключевые слова: безнакальные магнетроны, вакуумное состояние, эмиссионные свойства катодов.

Keywords: non-incandescent magnetrons, vacuum state, emission properties of cathodes.

ВВЕДЕНИЕ

АО «Плутон» занимается серийным выпуском магнетронов с безнакальным (б/н) запуском, которые представляют собой особую группу электровакуумных СВЧ-приборов и обладают огромным преимуществом перед другими магнетронами по времени готовности. В таких приборах ток автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) с автоэмиссионного катода (АЭК) обеспечивает запуск магнетрона в режиме генерации, а ток вторичной электронной эмиссии с Pd-Ва вторично-эмиссионных катодов (ВЭК) – поддержание этой генерации. На рис. 1 схематически представлен узел «катод-анод» безнакального магнетрона, на котором обозначено: 1 — анодный блок, 2 — kern катода, 3 — технологический подогреватель, 4 — концевые экраны, 5 — автоэмиссионные катоды, представляющие собой танталовые кольца стандартной толщины, выступающие над поверхностью катода на 100–200 мкм, 6 — вторично-эмиссионные палладий-бариевые катоды [1].

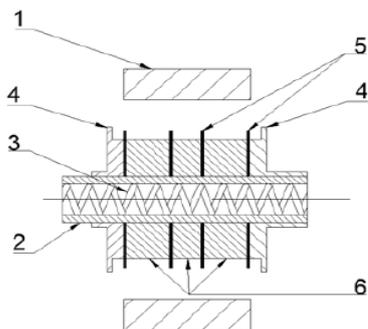


Рис. 1. Схема катодного узла безнакального магнетрона.

Долгое время считалось, что в качестве рабочей поверхности автоэмиссионных катодов выступают острые кромки Та колец, которые в процессе активирования катода покрываются пленкой ВаО, что, как следствие, снижает работу выхода электронов со значения 4,12 эВ (Та) [2] до 2,1-2,3 эВ (ВаО). На основании проведенных исследований в АО «Плутон» выяснилось, что на боковой поверхности танталовых АЭК в процессе активирования катода во время откачки и тренировки прибора происходит формирование системы палладиевых острий – вискерсов, частично или полностью покрытых ВаО, обеспечивающее уровень автоэмиссии, достаточный для запуска прибора в режим генерации [3]. При этом уровень автоэлектронной эмиссии, как показали исследования, зависит от давления остаточных газов, в частности низкий вакуум способствует деградации автоэмиссионных свойств таких катодов. Поэтому исследования оценки влияния вакуумного состояния на автоэмиссионные характеристики катода являются актуальной и важной задачей, а результаты этих исследований необходимо учитывать при конструировании и выпуске магнетронов с б/н запуском.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе в высоковакуумной установке УИАС-1, показанной на рис. 2, проводилось экспериментальное исследование зависимости тока автоэлектронной эмиссии от значения давления остаточных газов в камере. Форвакуумная откачка помещённого в камеру анодного блока с катодно-подогревательным узлом (КПУ) магнетрона с мгновенной готовностью производилась пластинчато-роторным насосом с азотной ловушкой, либо безмасляными цеолитовыми насосами, а высоковакуумная - магниторазрядным насосом НМД-0,25 до давления в камере $\approx 3 \cdot 10^{-8}$ Торр. Контроль давления в камере осуществлялся магниторазрядным вакуумметром ПММ-32, размещенным непосредственно под образцом. Первоначально проводилось обезгаживание камеры с внешним нагревом стенок гибким ленточным нагревателем и выполнялся первоначальный замер автоэлектронной эмиссии. Далее происходило активирование катода в последующем режиме: $T_{\text{ярк}} = 960^\circ\text{C}$; $U_a = 100 \text{ В}$; $t = 120 \text{ мин}$, при давлении не хуже $5 \cdot 10^{-8}$ Торр. Измерение тока автоэмиссии производили высоковольтным импульсным источником с амплитудой импульса напряжения до - 5 кВ, длительностью импульса (изменяемая) – 0,5/1/6 мкс, скважностью – 1000. Регистрация значений U_a и I_{a0} по времени выполнялась на персональный компьютер в программном пакете Excel.

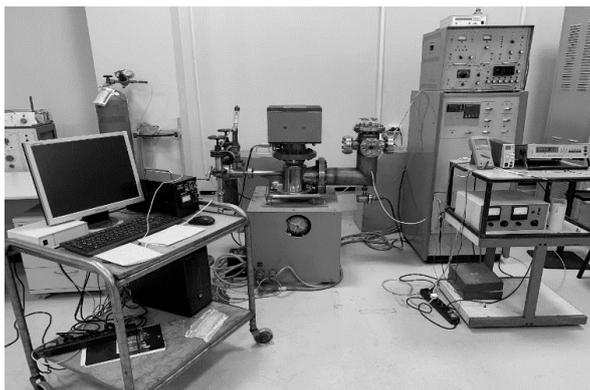


Рис. 2. Внешний вид установки для исследования автоэмиссионных свойств катодных материалов (УИАС-1).

Регулирование давления в камере осуществлялось частичным перекрытием клапана высоковакуумного насоса. Длительная регистрация импульсного значения $I_{aэ}$ производилась при подаче $U_a = 4500V$, при этом проводилась регистрация давления в камере по времени. График зависимости спада тока автоэлектронной эмиссии от давления остаточных газов и полученные значения представлены на рис. 3 и в табл. 1.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

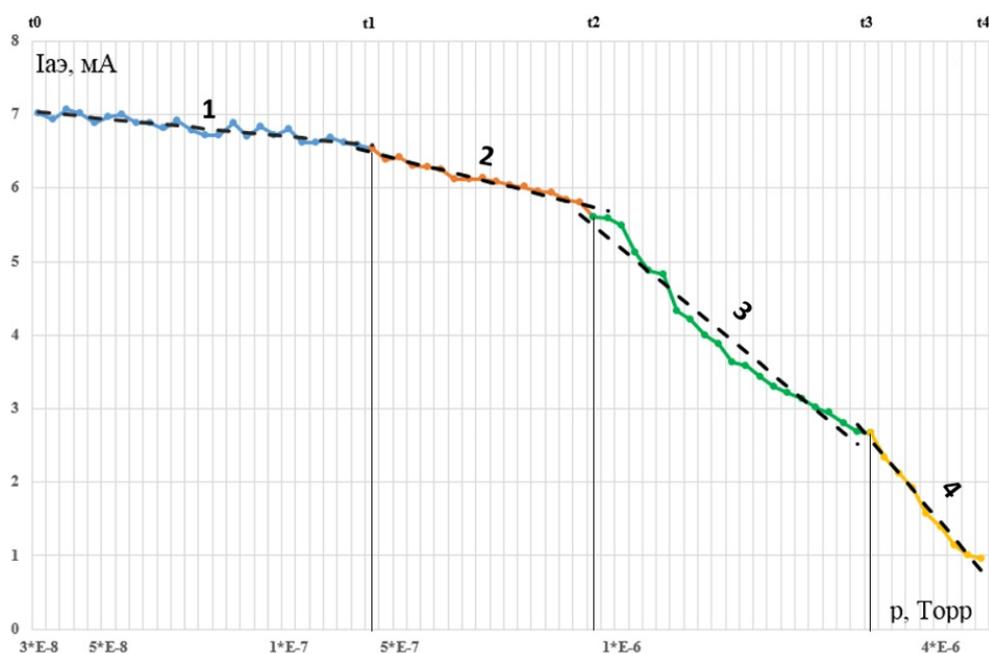


Рис. 3. Зависимость тока автоэлектронной эмиссии от давления в камере.

Таблица 1.

№	$I_{нач}, mA$	$I_{конеч}, mA$	$P_{нач}, Torr$	$P_{конеч}, Torr$	Время, сек	Уравнение линии тренда
1	7	6,5	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	51	$I = -0,0188 \cdot P + 7,0538$
2	6,5	5,6	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$9,5 \cdot 10^{-7}$	21	$I = -0,0466 \cdot P + 7,6466$
3	5,6	2,6	$9,5 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	140	$I = -0,1566 \cdot P + 11,909$
4	2,6	0,9	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	748	$I = -0,2223 \cdot P + 16,129$

На рис. 3 видно, что характер спада тока автоэмиссии можно аппроксимировать 4 линейными участками в диапазоне давлений от $3 \cdot 10^{-8}$ до $4 \cdot 10^{-6}$ Торр. При этом в области давлений выше $1 \cdot 10^{-6}$ Торр наблюдалось резкое падение тока, что вероятно связано со сменой механизма «травящего» фактора. Для этого была проведена обработка ВАХ, снятых при различном давлении по методике [4], результаты которой представлены в координатах С и D на рис. 4. В области давлений $3 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6}$ Торр происходило увеличение работы выхода ϕ и снижение коэффициента усиления поля β , вероятно, вследствие дрейфа и диффузии кислородных вакансий в ВаО в электрическом поле и полевого испарения вискероов, а в области $> 1 \cdot 10^{-6}$ Торр – происходило увеличение работы выхода ϕ и незначительное увеличение коэффициента усиления поля β , вероятно, вследствие работы механизма газовой адсорбции.

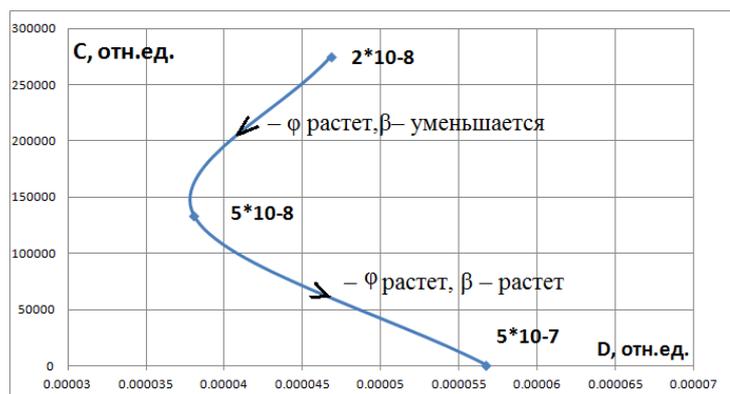


Рис. 4. Изменение параметров АЭК в системе координат С и D.

Во всех случаях, как видно из рис.4, при ухудшении вакуума происходит рост работы выхода и уменьшение плотности тока с АЭК, что соответствует теоретической модели [4].

Для проверки гипотезы о преобладающем влиянии механизма газовой адсорбции при давлении выше $1 \cdot 10^{-6}$, катод был повторно термически активирован при $T_{\text{ярк}} \approx 750^\circ\text{C}$ и $P = 3 \cdot 10^{-8}$ Торр, при этом автоэмиссионные свойства восстановились до уровня $\sim 70\%$ от начального значения. Известно [5], что при таких температурах роста вискероов не происходит, то есть происходит либо газовая десорбция с поверхности АЭК, либо покрытие поверхности АЭК барьером с последующим его окислением до нестехиометричного оксида, что при парциальном давлении $\text{O}_2 = 10^{-9}$ Торр и $T \approx 750^\circ\text{C}$ термодинамически разрешено [6].

Был также исследован характер спада $I_{\text{аэ}}$ по времени при различных постоянных значениях давления в камере. Проводилось 4 выдержки и во всех случаях активирование катода проходило по одинаковому режиму:

$$T_{\text{активир}} = 960^\circ\text{C}; U_{\text{а}} = 100 \text{ В}; t_{\text{активир}} = 120 \text{ мин}$$

Замер тока автоэлектронной эмиссии и длительная выдержка проводились при подаче импульсного напряжения амплитудой $U_{\text{а}} = 4500 \text{ В}$. Полученные результаты представлены на рис. 5 и таблице 2.

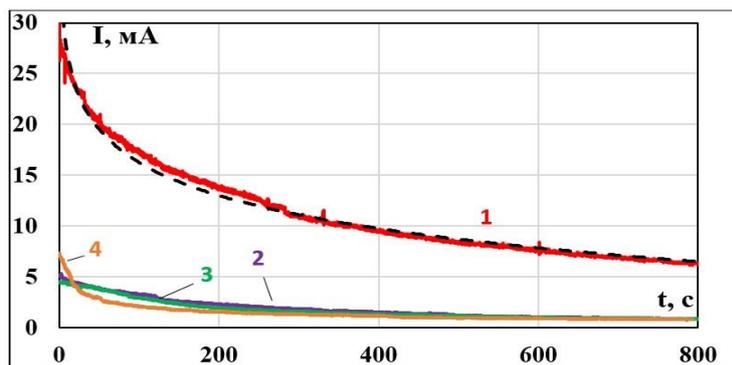


Рис. 5. Зависимость тока автоэлектронной эмиссии от времени выдержки для различных постоянных значений давления в камере.

Таблица 2.

№	$I_{нач},$ мА	$I_{конеч},$ мА	Время выдержки, мин	Давление в камере, Торр	Уравнение линии тренда
1	32	5,7	13	$3 \cdot 10^{-8}$	$I = -4,695 \ln(t) + 37,896$
2	5,1	0,8		$1 \cdot 10^{-7}$	$I = -0,981 \ln(t) + 7,4351$
3	4,5	0,8		-	-
4	7,3	0,8		$5 \cdot 10^{-6}$	$I = 14,354t^{0,423}$

Рис. 5 наглядно иллюстрирует спад тока автоэлектронной эмиссии при разных давлениях в камере при одном и том же времени выдержки. Как видно из таблицы 2, при выдержке 1 и 2 график функции $I(t)$ имеет логарифмическую зависимость, в 3 случае происходят переходные процессы, а в 4 случае график представляет собой степенную зависимость и имеет более резкий спад на начальном этапе выдержки.

ВЫВОДЫ

Проведены исследования зависимости $I_{ав}$ от вакуумного состояния. Предложено 2 механизма влияния давления остаточных газов на автоэмиссионные свойства катодов. Установлено, что в области давлений ниже $1 \cdot 10^{-7}$ Торр спад тока автоэмиссии от времени имеет логарифмическую зависимость, а в области давлений выше $1 \cdot 10^{-7}$ Торр - степенную. Определение характера спада тока автоэлектронной эмиссии может способствовать примерной оценке давления остаточных газов и послужить новым неразрушающим методом контроля вакуумного состояния в отпаянных приборах с безнакальным запуском.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ли И.П. Одновременное активирование автоэлектронного и вторично-эмиссионного катодов магнетрона с безнакальным запуском // Известия вузов. Электроника. — 2014. — Т. 30. — № 3 (107). — С. 30—36.
2. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов // Киев. «Наукова думка» 1981. — С. 339.
3. Капустин В.И., Ли И.П. Теория, электронная структура и физикохимия материалов катодов СВЧ-приборов // Научная мысль. М. Инфра-М, 2020.
4. Ли И.П. Наноструктуры в палладий — бариевых катодах СВЧ-приборов // Электроника. Наука. Технологии. Бизнес. — 2018. — № 5. — С. 144—151.
5. Капустин В.И. Методика контроля параметров автоэлектронной эмиссии катодов магнетронов с холодным запуском // Материалы XXV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». — М.: Новелла, 2018. — С. 324-329.
6. Куликов И.С. Термическая диссоциация соединений. М.: Металлургия, 1969. — 250 с.