

# Наноструктуры в палладий-бариевых катодах СВЧ-приборов

И. Ли, к. т. н.<sup>1</sup>

УДК 621.385.73(088.8) | ВАК 05.27.01

Магнетроны с безнакальным запуском – один из наиболее востребованных классов электровакуумных СВЧ-приборов. Катодные узлы этих приборов состоят из комбинации чередующихся автоэмиссионных катодов из танталовой фольги и вторично-эмиссионных палладий-бариевых катодов. Эмиссионные свойства и долговечность данных катодных узлов определяют наноструктуры, формирующиеся на этапе их активирования и работы. В статье представлены результаты комплексных исследований наноструктур палладий-бариевых катодов магнетронов с безнакальным запуском, позволившие сформулировать кристаллитную модель работы данных катодов в СВЧ-приборах.

## ВВЕДЕНИЕ

Палладий-бариевые материалы катодов магнетронов с безнакальным запуском представляют собой композицию из порошка Pd и порошка интерметаллида Pd<sub>5</sub>Ba с содержанием бария в композиции на уровне 2,0–6,0%. Катоды формируют путем прессования и последующего спекания композиции в вакууме ( $P \leq 1 \cdot 10^{-4}$  Па) при температуре порядка 1050 °С в течение четырех часов. Рабочая температура катодов, в зависимости от типа прибора, – в пределах 600–900 °С.

Начальная генерация в безнакальном магнетроне обеспечивается током автоэлектронной эмиссии с одной части катода, выполненной из танталовой фольги, а поддержание генерации – током вторичной электронной эмиссии с другой части катода, выполненной из палладий-бариевого материала [1]. Автоэмиссионные катоды в составе катодного узла магнетрона (рис. 1) представляют собой танталовые шайбы толщиной 4 мкм, выступающие над поверхностью катода на 100–200 мкм. Автоэлектронная эмиссия с торцевой поверхности шайб происходит преимущественно с вискерсов, формирующихся в виде палладиевых столбиков диаметром в доли микрона и высотой в несколько микрон. На рис. 2 приведена микрофотография профиля танталового автоэмиссионного катода, на котором сформированы острия из палладия из состава вторично-эмиссионного катода. Эмиссионные свойства и долговечность Pd-Ba катодов зависят от технологических параметров их изготовления и активирования в приборах [2].

Цель данной работы – исследование наноструктур, которые формируются на этапе активирования и работы палладий-бариевых катодов электровакуумных

СВЧ-приборов и определяют их эмиссионные свойства и срок службы в приборах.

## МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ Pd-Ba КАТОДОВ БЕЗНАКАЛЬНЫХ МАГНЕТРОНОВ

В настоящее время распространено представление о «пленочном» механизме работы Pd-Ba катода [3–5]. Согласно данной модели, на поверхности катода формируется либо моноатомная пленка Ba, либо пленка «слой кислорода – слой бария», которые снижают потенциальный барьер на поверхности катодного материала, уменьшая тем самым величину работы выхода  $\phi$  и увеличивая величину коэффициента вторичной электронной эмиссии  $\sigma$ . Однако,

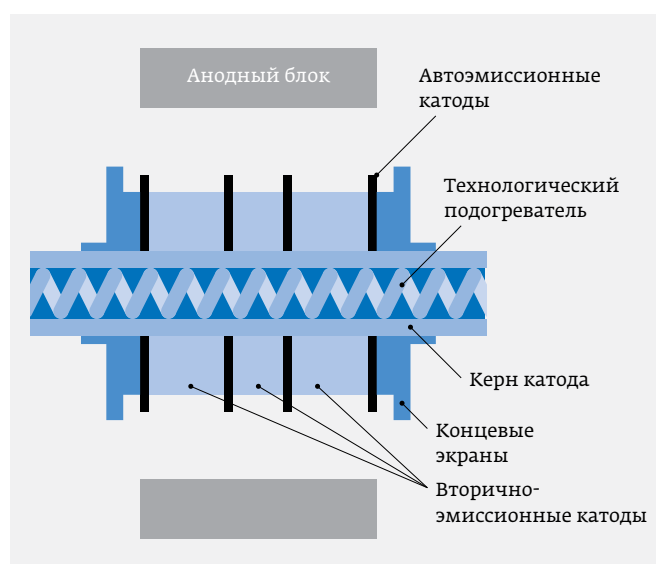


Рис. 1. Конструкция катодного узла магнетрона с безнакальным запуском

\* НТЦ «Базовые технологии ЭВП» АО «Плутон», директор, i.li@pluton.msk.ru.

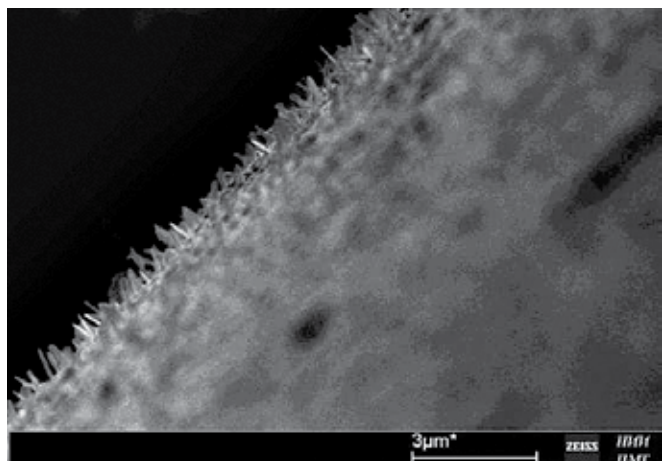
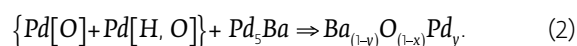
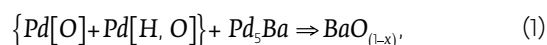


Рис. 2. Вид торца танталовых автоэмиссионных катодов

во-первых, для формирования пленки Ва на поверхности катода не требуется длительного времени для активирования катода при высокой температуре, и, во-вторых, существование таких пленок при температуре выше 700 °С невозможно из-за интенсивного испарения Ва с поверхности или взаимодействия Ва с кислородом из газовой фазы прибора [6]. В то же время наличие пленок типа «слой кислорода – слой бария» в магнетронах при повышенной температуре в условиях электронной бомбардировки невозможно из-за эффекта электронно-стимулированной десорбции таких пленок [7–8].

Методом электронной микроскопии установлено, что после активирования Pd-Ba катода при температуре 1000 °С в течение четырех часов в вакууме  $1 \cdot 10^{-6}$  Па на поверхности катода формируются бугорки (зародыши) со средними линейными размерами 0,5–1 мкм, как показано на рис. 3а. В то же время активирование катода при температуре 900 °С не приводит к образованию бугорков, как показано на рис. 3б, при этом катод не обладает требуемыми эмиссионными свойствами. Исследование элементного состава бугорков показало, что они содержат

барий, палладий и значительное количество кислорода. Это дает основание полагать, что поверхность катодного материала после активирования состоит из фаз Pd и Pd<sub>5</sub>Ba, а также фазы ВаО, которая и может обеспечить требуемые значения  $\sigma$  и  $\varphi$  Pd-Ba катода [9]. Так как вакуум в приборах при активировании катодов высокий, а парциальный состав его невоспроизводим, то кислород из остаточных газов в приборе не может быть источником формирования кристаллитов ВаО при активировании катодов. Источником кислорода, обеспечивающим формирование кристаллитов ВаО на этапе активирования катода, могут быть нанокристаллиты Pd, которые формируются при выплавке фазы Pd<sub>5</sub>Ba с избытком палладия по схемам:



В квадратных скобках у палладия указаны растворенные в кристаллитах атомы кислорода и водорода. При формировании в катодном материале кристаллитов оксида бария ВаО<sub>(1-x)</sub>, содержащего кислородные вакансии, может иметь место растворение в данных кристаллитах атомов палладия с формированием фазы Ва<sub>(1-y)</sub>О<sub>(1-x)</sub>Pd<sub>y</sub>.

Элементарная ячейка Pd<sub>5</sub>Ba – гексагональная. Поэтому определенные кристаллографические направления в элементарной ячейке интерметаллида могут быть эффективнее для протекания реакций (1) и (2). Аналогичным образом размеры и кристаллографическая ориентация нанокристаллитов палладия, а также количество растворенного в них кислорода будут оказывать влияние на процессы формирования кристаллитов ВаО по реакциям (1) и (2).

На рис. 4 показана модель торцевой поверхности танталовой шайбы, на которой в ходе тренировки и работы СВЧ-прибора на зародышах сформировались палладиевые висеры. В рамках предлагаемой модели

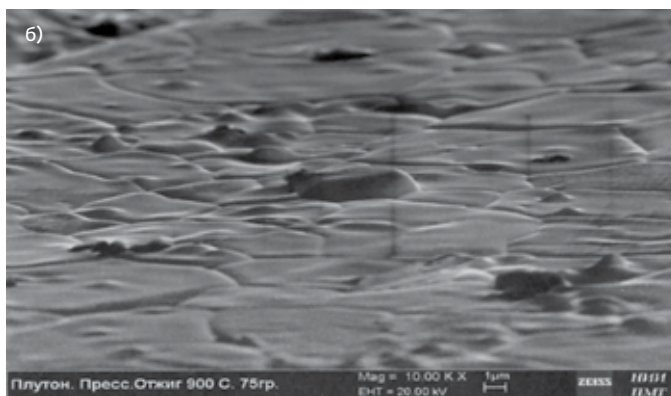
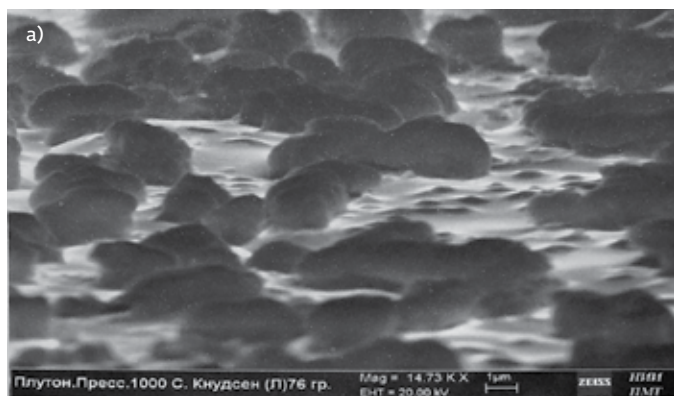
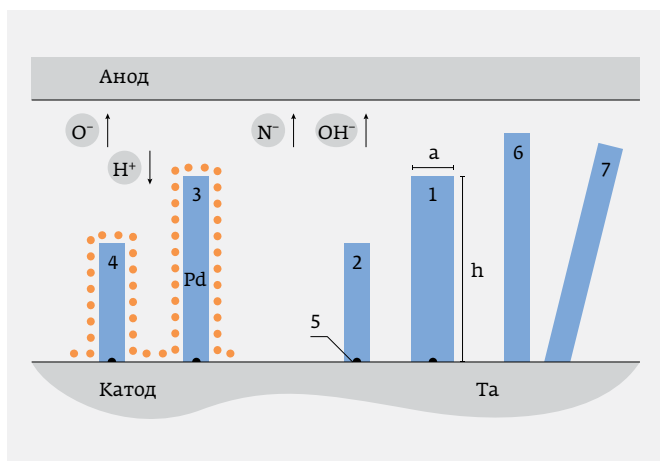


Рис. 3. Структура поверхности Pd-Ba катода после активирования при температурах 1000 °С (а) и 900 °С (б) в течение 4 ч



**Рис. 4.** Модель структуры поверхности автокатада СВЧ-прибора: 1 и 3 – длинные висеры; 2 и 4 – короткие висеры; 3 и 4 – висеры, покрытые барием; 5 – центры зарождения висеро́в; 6 – длинные висеры, образовавшиеся на этапах активирования катода; 7 – наклонные висеры

принимается наличие в среднем двух типов висеро́в – длинных и коротких, которые могут быть покрыты барием. В процессе тренировки приборов коэффициент усиления поля  $\beta \approx h/a$  [10] может изменяться, где  $h$  – высота острия,  $a$  – его поперечный размер. В процессе откачки электровакуумного прибора с прогревом катода острия могут покрываться барием, снижающим работу выхода, а при подаче высокого напряжения и роста висеро́в барий может «уходить», что приведет к повышению работы выхода. На рис. 4 обозначены ионы, которые могут образовываться при ионизации остаточных газов прибора, и направления их движения в поле между анодом и катодом, имеющим отрицательный потенциал относительно анода.

Так как температура тренировки катодов не превышает  $950^\circ\text{C}$ , можно считать, что поверхностная плотность центров роста постоянна, но происходит перераспределение с образованием висеро́в различной длины и наклона (см. рис. 4). Состав и структура поверхности висеро́в могут изменяться в результате полевого испарения. Величина электронного сродства Pd равна  $0,56$  эВ, Ba не создает отрицательных ионов, но может образовываться ион  $\text{BaO}^-$ . Поэтому в электрическом поле будут испаряться ионы  $\text{Pd}^-$ , меняя форму вершин висеро́в, и ионы  $\text{BaO}^-$  при наличии в остаточной среде кислорода, меняя покрытие поверхности висеро́в барием. Термическая диффузия Pd по поверхности висеро́в не может обеспечить их рост из-за отсутствия градиента концентрации Pd на поверхности висеро́в. Поэтому переход от коротких висеро́в к длинным (см. рис. 4) может быть из-за электродиффузии ионов  $\text{Pd}^-$  по поверхности висеро́в. В то же

время перенос бария может проходить вследствие градиента концентрации бария и при подаче напряжения, но при наличии следов кислорода в остаточных газах.

## МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изготовления образцов материалов использовали Ba металлический (ТУ 48-4-465-85) и Pd порошкообразный марки ПдАП-1 (ГОСТ 14836-82) фракции 20–45 мкм. Фазу  $\text{Pd}_5\text{Ba}$  выплавляли в электродуговой печи с нерасходуемым электродом в среде очищенного аргона. После выплавки интерметаллид размалывали в шаровой мельнице, просеивали на ситах. Для изготовления катодов использовали фракцию интерметаллида 20–45 мкм. Исследования в растровом электронном микроскопе показали, что частицы порошков Pd и  $\text{Pd}_5\text{Ba}$  состоят из кристаллитов размером 1–3 мкм. Размеры кристаллитов Pd зависят от технологических параметров их производства на заводе-изготовителе и от режимов термообработки на этапе изготовления катода. Размеры кристаллитов  $\text{Pd}_5\text{Ba}$ , а также характер и содержание в них примесей зависят от скорости охлаждения при кристаллизации и режима термообработки на этапе изготовления катода.

Размеры кристаллитов Pd и  $\text{Pd}_5\text{Ba}$  и значения параметров их кристаллических структур исследованы на установке ДРОН-3 с внутренним эталоном, в качестве которого использовали порошок Ge фракции 20–25 мкм, полученный путем размола монокристалла Ge, который добавляли в порошки в количестве 20–25%. Все исследования выполнены с использованием  $\text{Cu-K}\alpha 1$  излучения с длиной волны  $1,540598 \text{ \AA}$ . Положение пиков на рентгеновских спектрах с поправкой на положение пиков эталона позволило определить значения параметров кристаллической решетки кристаллитов Pd и  $\text{Pd}_5\text{Ba}$ , а уширение пиков Pd и  $\text{Pd}_5\text{Ba}$  с учетом аппаратного уширения пиков эталона – определить размеры кристаллитов по основным кристаллографическим направлениям. Для расчета размеров кристаллитов использовали уравнение Шеррера – Селякова:

$$L_{hkl} = \frac{180 a \lambda}{\pi (\Delta - b) \cos \theta} \quad (3)$$

где  $L_{hkl}$  – средний размер частиц в  $\text{Å}$ ,  $a$  – коэффициент, близкий к единице (0,94),  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения,  $\Delta(2\theta_{hkl})$  – ширина пиков на половине высоты,  $\theta$  – угловое положение пика в спектре,  $b$  – ширина германиевого пика, приведенного к положению пика исследуемого вещества.

В качестве примера на рис. 5 приведена рентгенограмма фазы  $\text{Pd}_5\text{Ba} + 8\% \text{Pd}$  (навеска при плавке 50 г). На рис. 6 показана угловая зависимость уширения пиков фазы  $\text{Pd}_5\text{Ba} + 8\% \text{Pd}$  (навеска при плавке 50 г) с добавлением эталона – порошка Ge. Величину уширения пиков фаз Pd

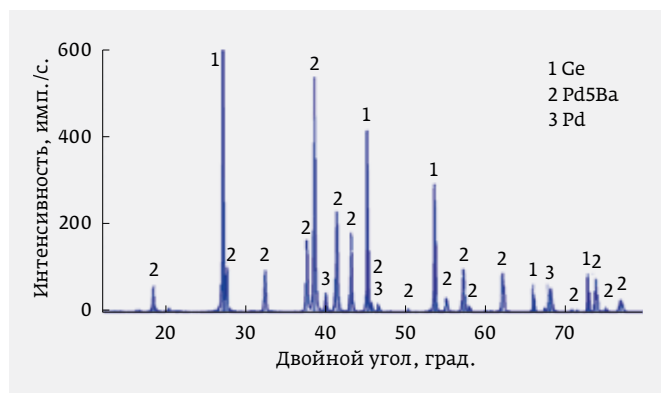


Рис. 5. Рентгенограмма фазы Pd5Ba + 8%Pd

и Pd<sub>5</sub>Ba определяли по расстоянию от значений уширения для каждого пика фаз до кривой, описывающей угловую зависимость уширения пиков Ge. В табл. 1 представлены параметры кристаллической структуры Pd и размеры кристаллитов по кристаллографическим направлениям. Образцы 1 и 3 соответствуют партиям 1 и 2 порошков Pd, полученным с завода-изготовителя. Образцы 2 и 4 – это образцы 1 и 3 после вакуумного отжига при температуре 1000 °С в течение 30 мин.

В табл. 2 приведены сводные параметры кристаллической структуры фаз в слитке Pd<sub>5</sub>Ba + 8%Pd и размеры кристаллитов по кристаллографическим направлениям. Образец А получен путем переплавки компонентов с избытком палладия при общей массе навески 50 г, образец В – переплавки компонентов с избытком палладия

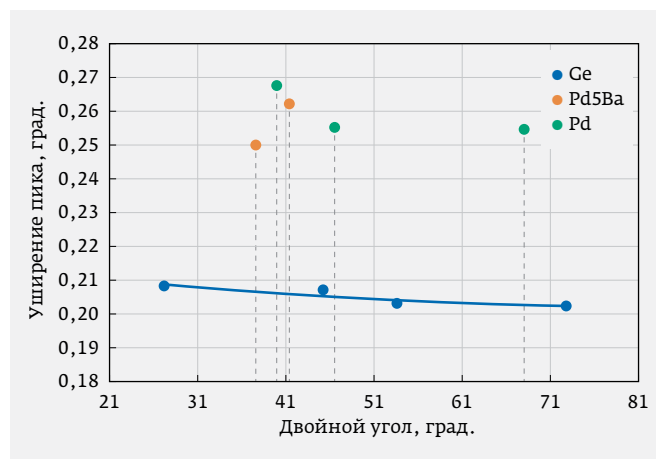


Рис. 6. Уширение пиков фазы Pd5Ba + 8%Pd и германия

при общей массе навески 100 г. Основное различие образцов А и В состоит в том, что скорость охлаждения образца В при кристаллизации меньше, чем у образца А.

На рис. 7 приведена вольт-амперная характеристика автоэлектронного катода прибора, представленного на рис. 1, выраженная в координатах Фаулера – Нордгейма. Кривая, показанная на рис. 7, имеет три области: первая – область с большим разбросом данных, видимо, из-за автоэмиссии с вершин нерегулярных вискеро́в типа 6–7; вторая и третья – области с малым разбросом данных, которые относятся к остриям 1–2 или 3–4. Участок 1 в общем случае может содержать два участка, обусловленных электродиффузией Pd<sup>-</sup> и BaO<sup>-</sup> на поверхности вискеро́в.

Таблица 1. Параметры кристаллической структуры Pd и размеры кристаллитов

Образец	Фаза	Параметр ячейки $a$ , Å	Изменение параметра ячейки $\Delta a$ , Å	Индекс направления (hkl)	Размер кристаллитов по направлению, нм
1	Pd, партия 1, исходный	3,8898(8)	$\Delta a = -0,0003(2)$	(111)	360
				(002)	290
				(202)	350
2	Pd, партия 1, отжиг	3,8898(1)	$\Delta a = -0,0003(9)$	(111)	680
				(002)	230
				(202)	400
3	Pd, партия 2, исходный	3,8899(1)	$\Delta a = -0,0002(9)$	(111)	420
				(002)	170
				(202)	145
4	Pd, партия 2, отжиг	3,8898(3)	$\Delta a = -0,0003(7)$	(111)	640
				(002)	500
				(202)	660

**Таблица 2.** Параметры кристаллической структуры фаз Pd<sub>5</sub>Ba + 8%Pd

Образец	Фаза	Параметры ячейки <i>a</i> и <i>c</i> , Å	Изменение параметров ячейки $\Delta a$ и $\Delta c$ , Å	Индекс направления ( <i>hkl</i> )	Размер кристаллитов по направлению, нм
Фазы Pd <sub>5</sub> Ba + 8%Pd, навеска при плавке 50 г					
А	Pd <sub>5</sub> Ba	<i>A</i> = 5,5016(3), <i>c</i> = 4,3520(3)	$\Delta a = -0,0383(7)$ , $\Delta c = +0,0220(3)$	(0001)	240
				(10 $\bar{1}$ 0)	195
	Pd	<i>a</i> = 3,8901(4)	$\Delta a = -0,0000(6)$	(111)	170
				(002)	235
			(202)	420	
Фазы Pd <sub>5</sub> Ba + 8%Pd, навеска при плавке 100 г					
В	Pd <sub>5</sub> Ba	<i>A</i> = 5,5026(2), <i>c</i> = 4,3514(2)	$\Delta a = -0,0373(8)$ , $\Delta c = +0,0214(2)$	(0001)	2620
				(10 $\bar{1}$ 0)	290
	Pd	<i>A</i> = 3,8905(5)	$\Delta a = +0,0003(5)$	(111)	130
				(002)	160
			(202)	660	

Известно, что плотность тока автоэмиссии с катода описывается уравнением Фаулера – Нордгейма [11]

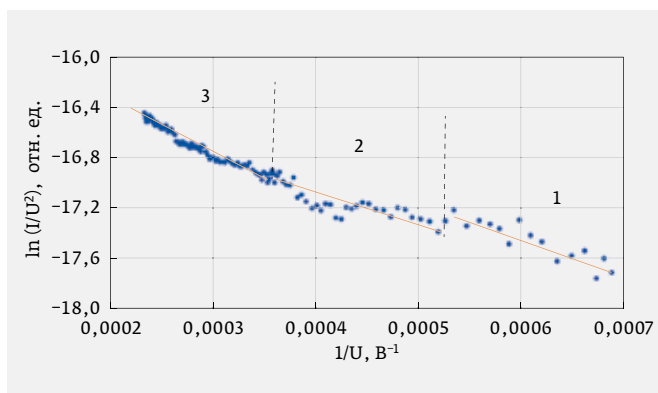
$$j = B \cdot \frac{E^2}{\Phi} \exp\left[-S \cdot \frac{\Phi^{3/2}}{E} \cdot \theta(\gamma)\right], \quad (4)$$

где константы

$$B = \frac{e^2}{8\pi m}; \quad S = \frac{8\pi(2m)^{1/2}}{3h}, \quad (5)$$

при этом функция Нордгейма

$$\theta(\gamma) = 0,965 - 0,739\gamma^2; \quad \gamma = \frac{(eE)^{1/2}}{\Phi}. \quad (6)$$



**Рис. 7.** Вольт-амперная характеристика автокатода прибора в координатах Фаулера – Нордгейма

Подставляя (6) в (4), получаем

$$j = B \cdot \frac{E^2}{\Phi} \exp\left[0,739 \cdot S \cdot \frac{e}{\Phi^{1/2}} \cdot \theta(\gamma)\right] \cdot \exp\left[-0,965 \cdot S \cdot \frac{\Phi^{3/2}}{E}\right]. \quad (7)$$

Если принять, что  $E = \frac{U}{d}\beta$ , где *d* – расстояние катод – анод,

то, логарифмируя (7), получаем

$$\ln\left(\frac{j}{U^2}\right) = \ln\left(\frac{B}{d^2}\right) + \ln\left(\frac{\beta^2}{\Phi}\right) + 0,739 \cdot S \cdot \frac{e}{\Phi^{1/2}} - 0,965 \cdot S \cdot \frac{\Phi^{3/2}d}{\beta} \cdot \frac{1}{U}. \quad (8)$$

В координатах  $\ln\left(\frac{j}{U^2}\right) \div \frac{1}{U}$  соотношение (8) будет прямой линией вида

$$y = a - bx, \quad (9)$$

где параметры

$$a = \ln\left(\frac{B}{d^2}\right) + \ln\left(\frac{\beta^2}{\Phi}\right) + 0,739 \cdot S \cdot \frac{e}{\Phi^{1/2}}, \quad b = 0,965 \frac{Sd\Phi^{3/2}}{\beta}. \quad (10)$$

В [11] предложено строить диаграмму в координатах *a*–*b*, но она недостаточно информативна, так как оба параметра сложным образом зависят от параметров  $\Phi$  и  $\beta$ . Для анализа экспериментальных результатов выберем следующие координаты:

$$C = b^2 \exp(a) = \alpha_1 \cdot \Phi^2 \exp\left(\frac{\alpha_2}{\Phi^{1/2}}\right) \equiv "y", \quad (11)$$



# ПЛУТОН

Научно-производственный комплекс

Разработка и производство  
электровакуумных приборов  
СВЧ-диапазона

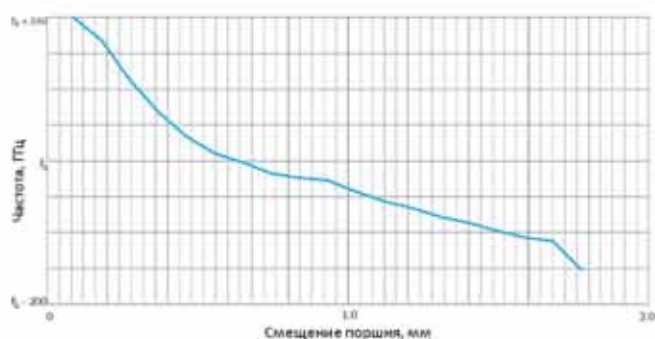


макет 3 мм  
перестраиваемого  
магнетрона

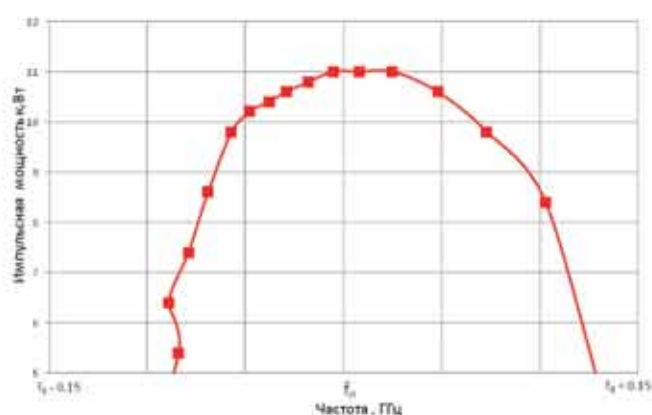
АО «Плутон» – Научно-производственный комплекс по разработке и производству электровакуумных СВЧ приборов широкого спектра применения, таких как: импульсные магнетроны, лампы бегущей волны (ЛБВ) и клистроны, а также радиопередающие модули на их основе.

## АО «Плутон» представляет новую разработку: перестраиваемый импульсный магнетрон 3мм диапазона длин волн

Наименование	Напряжение анода, кВ	Ток анода, А	Скважность	Время готовности, сек	Длительность ВЧ огибающей, нс
макет 3 мм перестраиваемого магнетрона	не более 13	номинал не более 11	800-2000	не более 60	150-300



Изменение частоты от перемещения поршня вспомогательного вывода.



Изменение мощности в диапазоне перестройки частоты.

АО «Плутон»  
105120, Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 11  
+7 (495) 730 36 19  
info@pluton.msk.ru www.pluton.msk.ru

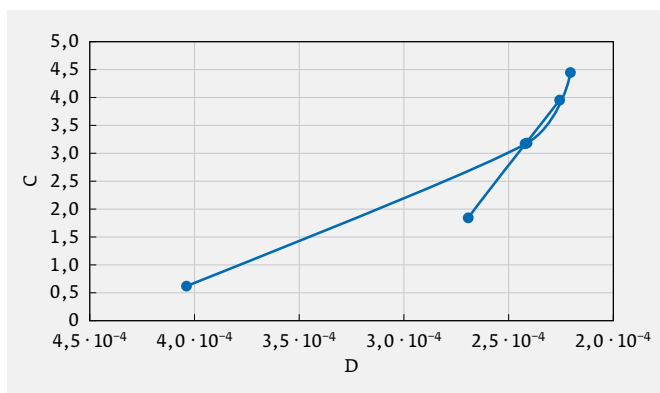


Рис. 8. Изменение соотношения между параметрами C и D для участка 2 рис. 7

$$D = \frac{1}{b} = \alpha_3 \cdot \frac{\beta}{\varphi^{3/2}} \equiv "x", \quad (12)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – константы, не зависящие от работы выхода и геометрии вискерев.

Видно, что параметр C зависит только от работы выхода  $\varphi$ , а параметр D прямо пропорционален  $\beta$  и обратно пропорционален  $\varphi^{3/2}$ . На рис. 8 показано изменение соотношения между параметрами C и D для участка 2 вольт-амперной характеристики, приведенной на рис. 7.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В кубической кристаллической решетке наибольшей плотностью упаковки атомов отличается плоскость [111], поэтому при кристаллизации таких веществ направлением роста кристаллов является направление (111). Средний размер кристаллитов в образцах 1 и 3 по направлению (111) составляет 390 нм, причем различие этого размера по образцам 1 и 3 не превышает 8%, а параметров кристаллической решетки – не превышает 5%. Поперечные размеры кристаллитов в исходных материалах различаются в два раза, что связано с вариациями параметров технологий их производства. Вакуумный отжиг приводит к увеличению размеров кристаллитов вдоль направления наибольшей плотности упаковки в среднем в 1,7 раза. В других направлениях кристаллиты материала из партии 1 после отжига изменяются мало, а в материале из партии 2 увеличиваются в два-три раза, причем различие в размерах кристаллитов в исходных материалах из партии 1 и 2 после отжига уменьшается. При этом отжиг приводит к изменению параметра кристаллической решетки в материалах из партии 1 и 2 примерно на 25% по отношению к значениям параметров кристаллической решетки до отжига образцов.

Величина скорости кристаллизации интерметаллида Pd<sub>5</sub>Va практически не влияет на размер кристаллитов вдоль направления a, однако уменьшение скорости кристаллизации приводит к увеличению размера вдоль

направления c в 10 раз. Независимо от скорости кристаллизации параметры кристаллической решетки интерметаллида a и c изменяются разнонаправлено: решетка сжимается вдоль направления a и растягивается вдоль направления c.

Параметры кристаллической решетки кристаллитов Pd, образовавшихся после выплавки интерметаллида с избытком Pd, принципиально отличаются от параметров кристаллитов Pd из табл. 1. Размеры кристаллитов Pd после переплавки соизмеримы с размерами кристаллитов исходного Pd и Pd после отжига из табл. 1. При кристаллизации с высокой скоростью охлаждения, как видно для Pd из образца A табл. 2, параметр его кристаллической решетки практически не отличается от параметра решетки для массивного образца Pd, хотя должен был уменьшиться с учетом наноразмерности кристаллитов. Более того, при кристаллизации с более низкой скоростью охлаждения, как видно для Pd из образца B табл. 2, параметр его кристаллической решетки, несмотря на наноразмерность кристаллитов, даже превышает параметр кристаллической решетки для массивного образца Pd.

Анализ результатов, приведенных на рис. 7 и 8, показал, что на начальном участке тренировки прибора в течение 20 мин кривая на диаграмме C–D для вискерев, ответственных за данный участок кривой Фаулера – Нордгейма, возрастает, однако при дальнейшей тренировке катода отмечается заметный спад кривой. Участок 1 при малом напряжении на катоде можно приписать вискерам типа 6 и 7, участок 2 – вискерам типа 1 и 3, участок 3 – вискерам типа 2 и 4. В контексте данной интерпретации экспериментальных результатов тренировка автоэмиссионного катода при подаче на него высокого напряжения приводит к изменению степени покрытия вискерев пленкой бария, а для некоторых типов вискерев – и изменению их геометрических размеров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволили сформулировать кристаллитную модель работы Pd-Va катодов СВЧ-приборов, которая состоит в следующем:

- компоненты Pd-Va катодов нанокристаллитной структуры, при этом размеры кристаллитов по различным направлениям могут сильно различаться и зависят от технологической предыстории материалов;
- технологическая предыстория определяет значения параметров кристаллической структуры нанокристаллитов, которые зависят также от типа и концентрации растворенных в них микропримесей;
- диффузионная подвижность микропримесей (C, O, H), а также компонентов катодного материала (Va, Pd), зависящая от размеров и параметров решетки нанокристаллитов по кристаллографическим направлениям, определяет эффективность формирования новых фаз

на этапе активирования катода, которые, в свою очередь, определяют его эмиссионные свойства;

- эмиссионные свойства Pd-Va катодов определяют кристаллиты фазы  $VaO_{(1-x)}$  и фазы  $Va_{(1-y)}O_{(1-x)}Pd_y$ , содержащие кислородные вакансии и формирующиеся на этапе изготовления и активирования катода; при этом поставщиком кислорода для образования данных кристаллитов являются кристаллиты Pd (преимущественно те, которые прошли электродуговую переплавку в качестве избыточной фазы при синтезе интерметаллида  $Pd_5Va$ ), а поставщиком бария – кристаллиты фазы  $Pd_5Va$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ли И.П., Петров В.С., Поляков В.С. и др.** Одновременное активирование автоэлектронного и вторично-эмиссионного катодов магнетрона с безнакальным запуском // Известия вузов. Электроника. 2014. Т. 30, № 3 (107). С. 30–36.
2. **Ли И.П.** Формирование структуры и физических свойств катодов для разработки малогабаритных магнетронов с безнакальным запуском: Дисс. канд. техн. наук: 01.04.07. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 123 с.
3. **Дюбуа Б.Ч., Култашев О.К., Поливникова О.В.** Эмиссионная электроника, нанотехнология, синергетика (к истории идей в катодной технологии) // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2008. Вып. 4 (497). С. 3–22.
4. **Дюбуа Б.Ч., Поливникова О.В.** О некоторых особенностях и проблемах современных эффективных катодов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2013. Вып. 4(519). С. 187–190.
5. **Дюбуа Б.Ч., Королев А.Н.** Современные эффективные катоды (К истории их создания на ФГУП «НПП «Исток» // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2011. Вып. 1 (509). С. 5–25.
6. **Фоменко В.С.** Эмиссионные свойства материалов: справочник / 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1981. 340 с.
7. **Агеев В.Н., Кузнецов Ю.А., Потехина Н.Д.** Электронно-стимулированная десорбция атомов редкоземельных металлов // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 5. С. 945–952.
8. **Агеев В.Н., Кузнецов Ю.А.** Электронно-стимулированная десорбция атомов натрия с вольфрама, покрытого пленкой германия // ФТТ. 2007. Т. 49. Вып. 5. С. 940–944.
9. **Капустин В.И.** Физико-химические основы создания многокомпонентных оксидосодержащих катодных материалов // Перспективные материалы. 2000. № 2. С. 5–17.
10. **Бельский М.Д., Бочаров Г.С., Елецкий А.В., Sommerer T.J.** Усиление электрического поля в холодных полевых катодах на основе углеродных нанотрубок // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 130–137.
11. **Егоров Н.В., Шешин Е.П.** Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. – М.: Интеллект. 704 с.

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1600 руб.

### НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ Дансмор Джоэль П.

*Издание осуществлено при поддержке Keysight Technologies*

За последнюю четверть века в радиоэлектронной промышленности произошли революционные изменения, и немаловажную роль в этих переменах сыграла техника сверхвысоких частот. Успех разработки устройств СВЧ-диапазона непосредственно связан с качеством и широтой возможностей по анализу их параметров. Автор книги – инженер-разработчик с 30-летним стажем – работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне: от компонентов сотового телефона до спутниковых мультиплексов.

Написанная им книга – это совокупность основ и передового опыта, теории и практики, в центре внимания которой – измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, в том числе конфигурации современных векторных анализаторов цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов измерений, неопределенностей и составляющих систематической погрешности. Значительная часть книги посвящена описанию наглядных практических примеров измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители, усилители и смесители, балансные устройства и пр.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ/СВЧ-устройств.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2018. – 736 с.  
ISBN 978-5-94836-505-3

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)