



Получено: 15.09.2022 г. | Принято: 24.09.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.442.449>

Научная статья

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ВАРИАНТОВ СКАНДАТНЫХ КАТОДОВ

В.И.Капустин¹, д.ф.-м.н., проф., гл. специалист / kapustin@mirea.ru
И.П.Ли², д.т.н., зам. ген. директора
А.В.Шуманов², директор, ORCID: 0000-0002-6284-2700

Аннотация. Методами электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА) и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) исследована электронная структура кристаллитов оксида бария, легированного другими химическими элементами, в том числе скандием из скандий-содержащих фаз. Сформулированы физические и физико-химические условия, выполнение которых позволяет сформировать электронную структуру скандатного катода с высоким уровнем термоэлектронной эмиссии.

Ключевые слова: малопористые катоды, катодный материал, влияние микропримесей, термоэлектронная эмиссия

Для цитирования: В.И. Капустин, И.П. Ли, А.В. Шуманов. Электронная структура вариантов скандатных катодов. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 7-8. С. 442-449. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.442.449>

Received: 15.09.2022 | Accepted: 24.09.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.442.449>

Original paper

ELECTRONIC STRUCTURE OF THE SCANDATE CATHODE VARIANTS

V.I.Kapustin¹, Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Prof., Chief specialist / kapustin@mirea.ru
I.P.Li¹, Doct. of Sci. (Tech), Deputy Director
A.V.Shumanov¹, Director, ORCID: 0000-0002-6284-2700

Abstract. The electronic structure of barium oxide crystallites doped with other chemical elements, including scandium from scandium-containing phases, has been studied by electron spectroscopy for chemical analysis (ESCA) and characteristic electron energy loss spectroscopy (EECE). Physical and physicochemical conditions are formulated, their fulfillment makes it possible to form the electronic structure of a scandate cathode with a high level of thermionic emission.

Keywords: metal-porous cathodes, cathode material, influence of micro-impurities, thermionic emission

For citation: V.I. Kapustin, I.P. Li, A.V. Shumanov. Electronic structure of the scandate cathode variants. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 7-8. PP. 442-449. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.442.449>

¹ Российский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия / Russian Technology University (MIREA), Moscow, Russia

² АО "Плутон", Москва, Россия / JSC "Pluton", Moscow, Russia



ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 90-х годов прошлого века научные лаборатории университетов и промышленных предприятий в различных странах проводят исследования, направленные на создание скандатных катодов, то есть металлопористых катодов, содержащих в своем составе скандий. По результатам исследований установлено, что такой катод может обеспечить получение плотности тока термоэлектронной эмиссии до 100 A/cm^2 , а в перспективе и до 400 A/cm^2 [1-3]. Это открывает возможность создания принципиально новых типов электровакуумных СВЧ-приборов. В то же время полученные результаты свидетельствуют о плохой технологической воспроизводимости эмиссионных свойств скандатных катодов, поэтому до настоящего времени никакие промышленные предприятия не освоили серийный выпуск СВЧ-приборов с катодами такого типа. Вместе с тем, возможное синергетическое проявление влияния микропримесей в кристаллитах оксида бария на его электронную структуру оказалось недостаточно изученным, а также недостаточно исследованным оказалось влияние фазового состояния, в частности, компонентов, содержащих скандий, на электронную структуру эмиссионно-активной фазы катодного материала. Изучению данных вопросов и посвящена данная работа.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Образцы материалов в виде таблеток диаметром 7 мм и толщиной 1 мм получали спеканием и последующим прессованием таблеток из смеси порошка вольфрама (90% весовых), предварительно синтезированного и размолотого в порошок алюмината бария-кальция состава $2.5\text{BaO} \cdot 0.4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и дополнительных компонентов в виде порошков интерметаллида Re_2Sc , порошка сплава 80%W+20%Re, порошка гидрида скандия ScH_2 . Спекание порошков также проводили в вакууме при температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч, но на вольфрамовой пластине. В результате спекания в образцах материалов формировались кристаллиты оксида бария, содержащие кислородные вакансии, а также кристаллиты оксида бария, содержащие кислородные вакансии и, в зависимости от состава смесей, легированные атомами вольфрама, рения, скандия и комбинацией указанных элементов. Порошок интерметаллида Re_2Sc был получен нами электродуговой переплавкой компонентов в среде очищенного аргона с последующим размолотом в шаровой мельнице. Порошок гидрида скандия ScH_2 был получен

INTRODUCTION

Since the 1990s scientific laboratories of universities and industrial enterprises in various countries have been carrying out the research aimed at creating scandate cathodes, i.e. metal-porous cathodes containing scandium in their composition. According to the research results it was found that such cathode can provide thermoelectronic emission current density up to 100 A/cm^2 , and in future up to 400 A/cm^2 [1-3]. This fact opens a possibility of creating fundamentally new types of electrovacuum microwave devices. At the same time, the obtained results show poor technological reproducibility of the scandate cathodes emission properties so, until now, no industrial enterprises have mastered mass production of the microwave devices with cathodes of this type. At the same time, a possible synergistic effect of micro impurities in barium oxide crystallites on its electronic structure turned out to be insufficiently studied, and influence of the phase state, in particular, the components containing scandium, on the electronic structure of the emission-active phase of cathode material was also insufficiently studied. The present work is devoted to investigate these issues.

RESEARCH METHODS AND RESULTS

Powder samples with a diameter of 7 mm and thickness of 1 mm were produced by sintering and pressing tablets made from a mixture of tungsten powder (90% by weight), pre-synthesized and ground barium-calcium aluminate powder of $2.5\text{BaO} \cdot 0.4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ composition and additional components in the form of powders of intermetallic Re_2Sc , 80%W+20%Re alloy powder and scandium hydride powder ScH_2 . The powders were also sintered in vacuum at $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ for 2 hours, but on a tungsten plate. As a result of sintering, barium oxide crystallites containing oxygen vacancies as well as barium oxide crystallites containing oxygen vacancies and, depending on composition of the mixtures, doped with tungsten, rhenium, scandium atoms and combination of these elements were formed in the material samples. The powder of Re_2Sc intermetallic was obtained by electric arc re-melting of the components in purified argon followed by milling in a ball mill. The powder of scandium hydride ScH_2 was obtained by annealing of scandium in a hydrogen medium followed by milling in a ball mill. The alloy powder 80%W+20%Re was made in the Research and Production Complex "Advanced Powder Technology" (Tomsk) by atomizing wire BP-20 (their alloy 80%W+20%Re) by electric explosion. Electronic states of elements in samples of materials were studied by electron spectrometry for chemical analysis (ESCA). The spectra were decoded by division of spectra peaks of ESCA into Gaussian peaks taking into account the influence of the fact that the atom is surrounded by other elements and, thereby, impacts on the shifts of atoms peaks which depend on the value

Таблица 1. Расшифровка $3d_{5/2}$ -электронных спектров бария в образцах материаловTable 1. Interpretation of $3d_{5/2}$ -electron spectra of barium in material samples

№ пика Peak no.	Энергия пика, эВ Peak energy, eV	Интенсивность пика, отсчетов/с Peak intensity, counts/s	Ширина пика, эВ Peak width, eV	Барий в фазе Barium in phase
1	90%W + 5% 2.5BaO · 0.4CaO · Al₂O₃ + 5%Re₂Sc			
1.1	779,86	478,98	1,08	Ba _(1-y) O _(1-x) W _y
1.2	780,84	2176,37	1,98	Барий в алюминате бария-кальция Barium in barium-calcium aluminate
1.3	782,30	1174,76	1,55	Ba _(1-y) O _(1-x) Sc _y
1.4	782,66	192,66	0,72	Ba _(1-y) O _(1-x) Al _y
1.5	783,63	2364,52	1,96	Ba _(1-y-z) O _(1-x) Re _y Sc _z
1.6	784,68	685,53	1,23	Ba _(1-y) O _(1-x) Ca _y
1.7	785,84	497,79	1,98	BaO ₂
2	90%W + 5% 2,5BaO · 0,4CaO · Al₂O₃ + 5%(80%W + 20%Re)			
2.1	780,61	1978,24	1,74	Барий в алюминате бария-кальция Barium in barium-calcium aluminate
2.2	781,75	591,98	1,12	BaO _(1-x)
2.3	782,77	1656,22	1,66	Ba _(1-y) O _(1-x) Re _y
2.4	784,19	2550,55	1,99	Ba _(1-y-z) O _(1-x) Re _y W _z
2.5	785,66	860,26	1,99	BaO ₂
3	90%W + 5% 2,5BaO · 0,4CaO · Al₂O₃ + 5%ScH₂			
3.1	780,26	1289,40	1,45	Барий в алюминате бария-кальция Barium in barium-calcium aluminate
3.2	781,36	2379,82	1,98	Ba _(1-y) O _(1-x) Sc _y
3.3	782,46	560,63	0,99	Ba _(1-y) O _(1-x) Al _y
3.4	783,44	1868,78	1,99	BaC ₂ O ₃
3.5	785,09	1423,08	1,96	Ba _(1-y-z) O _(1-x) Sc _y W _z
3.6	786,38	316,12	1,10	BaO ₂

нами отжигом скандия с среде водорода с последующим размолом в шаровой мельнице. Порошок сплава 80%W+20%Re был изготовлен в Научно-производственном комплексе "Передовые порошковые технологии" (г. Томск) распылением проволоки ВР-20 (из сплава 80%W+20%Re) методом электровзрыва. Электронные состояния элементов в образцах материалов исследовали методом электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА), при этом расшифровку спектров проводили путем разбиения пиков в спектрах ЭСХА на гауссовы пики с учетом влияния окружения

of electronegativity of specified elements. The deciphering of the electronic states of barium samples is given in Table 1.

The oxygen vacancies concentration in the material samples was investigated by characteristic electron energy loss spectroscopy (SELE) at the primary electron energy of 1005 eV at a detection step of 0.05 eV. The spectra were digitally differentiated to increase the method sensitivity.

Since non-stoichiometric barium oxide containing oxygen vacancies is a donor type semiconductor and other oxide phases in the material are dielectrics, the



атома другими элементами на сдвиги пиков атомов, которые зависят от величины электроотрицательности указанных элементов. Расшифровка электронных состояний бария образцах материалов приведена в табл.1.

Концентрацию кислородных вакансий в образцах материалов исследовали методом спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) при энергии первичных электронов 1005 эВ с шагом регистрации 0,05 эВ. Для повышения чувствительности метода проводили цифровое дифференцирование спектров.

Так как нестехиометричный оксид бария, содержащий кислородные вакансии, является полупроводником донорного типа, а остальные оксидные фазы в материале – диэлектрики, характеристические потери электронов в катодном материале обусловлены возбуждением объемных и поверхностных плазмонов в оксиде бария, энергии которых соответственно $\Delta E_{об}$ и $\Delta E_{пов}$ определяются выражениями:

$$\Delta E_{об} = \sqrt{\frac{e^{*2} \hbar^2 N_{об}^*}{\epsilon \epsilon_0 m^*}}, \quad (1)$$

$$\Delta E_{пов} = \sqrt{\frac{e^{*2} \hbar^2 N_{пов}^*}{2\epsilon \epsilon_0 m^*}}, \quad (2)$$

где e^* – эффективный заряд кислородной вакансии; m^* – эффективная масса электронов кислородных вакансий; \hbar – постоянная Планка; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; $\epsilon = 3,6$ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость оксида бария; $N_{об}^*$ – объемная концентрация кислородных вакансий; $N_{пов}^*$ – поверхностная концентрация кислородных вакансий [3]. Таким образом, полные потери ΔE на возбуждение плазмонных колебаний можно представить в виде

$$\Delta E = n_1 E_{об} + n_2 E_{пов}, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 – целые числа.

В табл.2 приведены сводные данные по указанным параметрам электронной структуры фаз, сформировавшихся в составе исследованных образцов материалов в результате их отжига в вакууме. При расшифровке фаз в табл.2 учитывали результаты табл.1, а также принимали во внимание значение интенсивностей пиков характеристических потерь.

Для проведения всестороннего анализа влияния фазового состояния скандия в катодном материале на процесс формирования кислородных вакансий в кристаллитах оксида бария,

characteristic losses of electrons in the cathode material are caused by excitation of volume and surface plasmons in barium oxide, which energies are, respectively, $\Delta E_{об}$ and $\Delta E_{пов}$ determined by the following expressions:

$$\Delta E_{об} = \sqrt{\frac{e^{*2} \hbar^2 N_{об}^*}{\epsilon \epsilon_0 m^*}}, \quad (1)$$

$$\Delta E_{пов} = \sqrt{\frac{e^{*2} \hbar^2 N_{пов}^*}{2\epsilon \epsilon_0 m^*}}. \quad (2)$$

where e^* is the effective charge of oxygen vacancy, m^* is effective electron mass of oxygen vacancies, \hbar is the Planck constant, ϵ_0 is the dielectric constant, $\epsilon = 3.6$ is the high frequency permittivity of barium oxide, $N_{об}^*$ is the bulk concentration of oxygen vacancies, $N_{пов}^*$ is the surface concentration of oxygen vacancies [3]. Thus, the total loss ΔE for plasmon oscillation excitation can be represented as

$$\Delta E = n_1 E_{об} + n_2 E_{пов}, \quad (3)$$

where n_1 and n_2 – integers.

Table 2 summarizes parameters of the electronic structure of phases formed in the studied samples of materials as a result of their annealing in vacuum. At deciphering of phases in Table 2, the results of Table 1, and also value of peaks intensities of characteristic losses have been taken into account.

To carry out a comprehensive analysis of the scandium phase state effect in the cathode material on formation of oxygen vacancies in barium oxide crystallites, Fig.1 data shows concentration dependences (on the scandium oxide content) of volume and surface oxygen vacancy concentration in material samples based on tungsten powder and $2.5\text{BaO} \cdot 0.4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ phase, in which the aluminum oxide was completely or partially replaced with scandium oxide [5].

When calculating the surface and volume concentration of oxygen vacancies the effective mass values of electrons on oxygen vacancies and the effective charge of vacancies in pure barium oxide crystals and in crystals doped with one type of micro-impurities were taken from [4-5] where they were determined experimentally by optical absorption. Values of indicated parameters for barium oxide crystallites doped with two types of micro-impurities have not been determined experimentally at present. Therefore, for the mentioned case of double doping in calculations by relations (1) and (2) the values of effective mass and effective charge for the component which is contained in material in the maximal concentration were taken. Such a choice could lead to a certain inaccuracy when calculating the absolute values of surface and bulk vacancy concentrations, but did not affect the

Таблица 2. Параметры характеристических потерь и объемной и поверхностной концентрации кислородных вакансий в материалах

Table 2. Characteristic loss parameters and volumetric and surface oxygen vacancy concentrations in materials

№ фазы Phase no.	Фаза Phase	Параметр Parameter				
		$E_S, \text{эВ} \text{eV}$	$E_D, \text{эВ} \text{eV}$	$N_S, \text{м}^{-3} \text{m}^{-3}$	$N_D, \text{м}^{-3} \text{m}^{-3}$	N_S / N_D
1	90%W + 5% 2.5BaO·0.4CaO·Al₂O₃ + 5%Re₂Sc					
1.1	Ba _(1-y) O _(1-x) Sc _y	2,22	3,41	$6,25 \cdot 10^{24}$	$7,37 \cdot 10^{24}$	0,85
1.2	Ba _(1-y) O _(1-x) W _y	8,61	11,72	$1,32 \cdot 10^{26}$	$1,22 \cdot 10^{26}$	1,08
1.3	Ba _(1-y-z) O _(1-x) Re _y Sc _z	8,80	12,24	$8,41 \cdot 10^{25}$	$8,14 \cdot 10^{25}$	1,03
1.4	W	7,82	11,26	$8,89 \cdot 10^{28}$	$9,21 \cdot 10^{28}$	0,97
2	90%W + 5% 2,5BaO·0,4CaO·Al₂O₃ + 5%(80%W + 20%Re)					
2.1	BaO _(1-x)	2,35	3,23	$7,00 \cdot 10^{24}$	$6,61 \cdot 10^{24}$	1,06
2.2	Ba _(1-y-z) O _(1-x) Re _y W _z	5,81	8,85	$3,67 \cdot 10^{25}$	$4,26 \cdot 10^{25}$	0,86
2.3	Ba _(1-y) O _(1-x) Re _y	9,70	13,50	$1,68 \cdot 10^{26}$	$1,63 \cdot 10^{26}$	1,03
2.4	W	7,86	10,94	$8,98 \cdot 10^{28}$	$8,70 \cdot 10^{28}$	0,72
3	90%W + 5% 2,5BaO·0,4CaO·Al₂O₃ + 5%ScH₂					
3.1	Ba _(1-y) O _(1-x) Sc _y	2,15	3,58	$5,86 \cdot 10^{24}$	$8,12 \cdot 10^{24}$	0,72
3.2	Ba _(1-y-z) O _(1-x) Sc _y W _z	5,40	8,09	$1,86 \cdot 10^{25}$	$2,09 \cdot 10^{25}$	0,89
3.3	W	7,27	10,23	$7,68 \cdot 10^{28}$	$7,60 \cdot 10^{28}$	1,01

на рис.1 приведены концентрационные зависимости (от содержания оксида скандия) объемной и поверхностной концентрации кислородных вакансий в образцах материалов на основе порошков вольфрама и фазы 2.5BaO·0.4CaO·Al₂O₃, в которой оксид алюминия полностью или частично заменялся на оксид скандия [5].

При расчете поверхностной и объемной концентрации кислородных вакансий значения эффективной массы электронов на кислородных вакансиях и эффективного заряда вакансий в чистых кристаллитах оксида бария и в кристаллитах, легированных одним типом микропримесей, брали из [4-5], где они были определены экспериментально методом оптического поглощения. Значения указанных параметров для кристаллитов оксида бария, легированного двумя типами микропримесей, в настоящее время экспериментально не определены. Поэтому для указанного случая двойного легирования при расчетах по соотношениям (1) и (2)

most important parameter – the ratio of surface and bulk vacancy concentrations in each sample.

During annealing of barium-calcium aluminate in vacuum in the presence of other phases, the established volume concentration of oxygen vacancies in barium oxide crystallites depends not only on the initial phase composition of the material but also on temperature and annealing time, material porosity and granulometric composition of powder components. In fact, optimization of particle size distribution, porosity, temperature and annealing time causes activation of the cathode material which results in formation of the required concentration of oxygen vacancies in the volume of barium oxide crystallites. However, the upper monolayer of the barium oxide crystallites is in thermodynamic equilibrium with the crystallite volume at any given time, with:

- surface vacancy concentration, as first shown in [6] and seen from the results of this work, is determined not only by the equilibrium between the volume and surface of the crystal, but also by the presence of dopant (impurity) atoms in the upper monolayer of the crystal;



брали значения эффективной массы и эффективного заряда для компонента, содержащегося в материале в максимальной концентрации. Такой выбор мог приводить к определенной погрешности при расчете абсолютных значений поверхностной и объемной концентрации вакансий, но не влиял на важнейший параметр – отношение поверхностной и объемной концентрации вакансий в каждом образце.

При отжиге алюмината бария-кальция в вакууме в присутствии других фаз, установившаяся объемная концентрация кислородных вакансий в кристаллитах оксида бария зависит не только от исходного фазового состава материала, но и от температуры и времени отжига, пористости материала и гранулометрического состава порошковых компонентов. Собственно, в оптимизации гранулометрического состава, пористости, температуры и времени отжига и состоит суть активирования катодного материала, в результате которого в объеме кристаллитов оксида бария формируется требуемая концентрация кислородных вакансий. Однако верхний монослой кристаллитов оксида бария в каждый момент времени находится в термодинамическом равновесии с объемом кристаллитов, при этом:

- поверхностная концентрация вакансий, как впервые показано в [6] и видно из результатов данной работы, определяется не только равновесием между объемом и поверхностью кристаллита, но и наличием легирующих (примесных) атомов в верхнем монослое кристаллита;
- в свою очередь именно поверхностная концентрация кислородных вакансий определяет величину искривления энергетических зон у поверхности кристаллитов оксида бария: чем меньше величина искривления, тем меньше и величина работы выхода [6].

В работе [6] была предложена теория скандатных катодов, согласно которой низкую работу выхода кристаллита оксида бария можно обеспечить путем формирования нанокристаллита оксида бария, в верхнем монослое которого атомы бария полностью или частично заменены атомами скандия. Признаком формирования такой структуры является снижение поверхностной концентрации кислородных вакансий по сравнению с объемной концентрацией кислородных вакансий. Условием формирования такой структуры является размерный фактор легирующего элемента – его ионный радиус должен быть примерно равен 0,60 от ионного радиуса бария. На основе теоретического подхода [13] можно

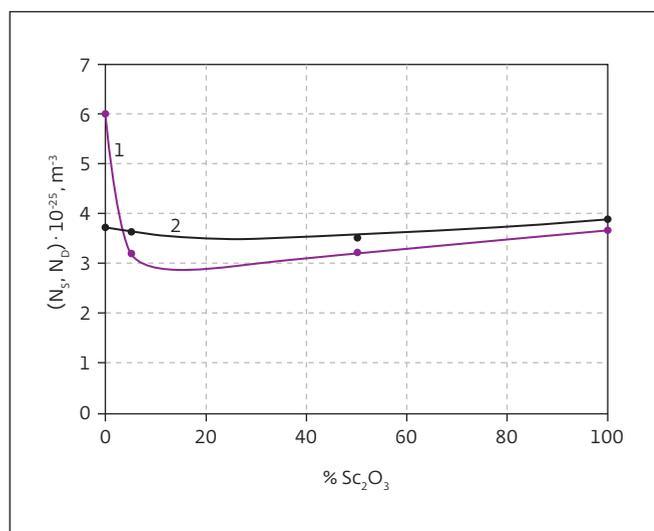


Рис.1. Зависимости объемной 1 и поверхностной 2 концентрации кислородных вакансий от содержания Sc₂O₃ в катодных материалах

Fig.1. Volumetric 1 and surface 2 oxygen vacancies concentrations versus Sc₂O₃ content in cathode materials

- it is surface concentration of oxygen vacancies which determines the value of the energy zones distortion at the barium oxide crystallite surface: the smaller distortion value, the smaller value of the work release [6].

In [6] theory of scandium cathodes was proposed, according to which the low output work of the barium oxide crystallite can be provided by barium oxide nanocrystallite formation, in the upper monolayer of which barium atoms are completely or partially replaced with scandium atoms. An indication of formation of such structure is a decrease in the surface concentration of oxygen vacancies compared with the bulk concentration of oxygen vacancies. The condition required for formation of such a structure is the size factor of the alloying element – its ionic radius must be about 0.60 of the ionic radius of barium. Based on the theoretical approach [13], we can also formulate more general conditions which ensure reduction of the surface concentration of oxygen vacancies in barium oxide crystallites relative to its bulk concentration:

- the formation enthalpy of the alloying element oxide must be higher than the enthalpy of the barium oxide formation, i.e. the energy of the "oxygen ion – alloying element ion" bond must be higher than the energy of the "oxygen ion – barium ion" bond;
- for effective alloying of barium oxide crystallites by other element, such element at the initial phase should be in a poorly bound form, for example, as a part of intermetallide, hydride or nanocrystalline oxide with high excess surface energy;

сформулировать и более общие условия, обеспечивающее снижение поверхностной концентрации кислородных вакансий в кристаллитах оксида бария относительно ее объемной концентрации:

- энтальпия образования оксида легирующего элемента должна быть выше энтальпии образования оксида бария, то есть энергия связи "ион кислорода – ион легирующего элемента" должна быть выше энергии связи "ион кислорода – ион бария";
- для эффективного легирования кристаллитов оксида бария другим элементом, этот элемент в исходной фазе должен находиться в слабо связанной форме, например, в составе интерметаллида, гидрида или нанокристаллического оксида с высокой избыточной поверхностной энергией;
- для сегрегации легирующего элемента именно в верхнем монослое кристаллита оксида бария, указанный кристаллит должен находиться в виде нанокристаллов, в которых имеет место значительное различие межплоскостного расстояния между первым и вторым монослоями и монослоями в объеме нанокристаллита. В этом случае и вступает в действие размерный фактор легирующего элемента.

Именно указанные условия, как видно из табл.2, выполняются при введении в исходный карбонат бария дополнительных компонентов в виде интерметаллида Re_2Sc и гидрида ScH_2 , выполняются при малом содержании дополнительного компонента в виде оксида скандия и нарушаются при высокой концентрации оксида скандия в материале. Эти же условия выполняются и при совместном легировании оксида бария никелем и стронцием, на чем, собственно, и основаны высокие термоэмиссионные свойства оксидно-никелевых катодов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие заключения.

Высокие термоэмиссионные свойства скандатного катода могут быть обеспечены путем формирования в катодном материале кристаллитов оксида бария, в которых в верхнем монослое атомы бария полностью или частично заменены на атомы скандия.

Обеспечить эффективное легирование кристаллитов атомами скандия возможно при использовании в составе катодного материала скандия в составе интерметаллида скандия,

- for segregation of the alloying element exactly in the upper monolayer of the barium oxide crystal, such crystal must be in the form of nanocrystals in which there is a significant difference of interplanar distance between the first and second monolayers and monolayers in the volume of the nanocrystal. This is where the size factor of the alloying element comes into play.

Precisely these conditions, as can be seen from Table 2, are satisfied with introduction of additional components in the form of intermetallic Re_2Sc and ScH_2 hydride in initial barium carbonate with a small content of an additional component in the form of scandium oxide and are violated at high concentrations of scandium oxide in the material. The same conditions are fulfilled also in case of joint alloying of barium oxide with nickel and strontium which, actually, make the basis of high thermal emission properties of the nickel oxide cathodes.

CONCLUSIONS

Thus, the following conclusions can be drawn from the results of the work:

1. High thermal emission properties of the scandium cathode can be provided for formation of barium oxide crystallites in the cathode material where which barium atoms in the upper monolayer are completely or partially replaced with scandium atoms.

2. An effective doping of crystallites with scandium atoms can be achieved by using scandium in the scandium intermetallic, scandium hydride or scandium oxide in a nanocrystalline state as the cathode material.

1. To ensure segregation of scandium atoms exactly in the upper monolayer of barium oxide crystallites is possible by formation of the mentioned crystallites at the stage of cathode activation in the form of the barium oxide nanocrystallites.

2. Formation of barium oxide nanocrystallites exactly at the stage of cathode activation is possible by using an activator of barium-calcium aluminate decomposition (tungsten) in the form of tungsten nanocrystals or lower oxide tungsten vapour supplied to the aluminate surface from the cathode volume through pores in the aluminate.

3. The sign of formation of the scandate cathode effective structure a reduced surface concentration of oxygen vacancies in the barium oxide nanocrystallites in relation to its volume concentration.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



гидрида скандия или оксида скандия в нанокристаллическом состоянии.

Обеспечить сегрегацию атомов скандия именно в верхнем монослое кристаллитов оксида бария возможно путем формирования указанных кристаллитов на этапе активирования катода в виде нанокристаллитов оксида бария.

Формирование именно нанокристаллитов оксида бария на этапе активирования катода возможно путем использования активатора разложения алюмината бария-кальция (вольфрама) в виде нанокристаллов вольфрама или паров низших оксидов вольфрама, поступающего к поверхности алюмината из объема катода по порам в алюминате.

Признаком формирования эффективной структуры скандатного катода является уменьшенная поверхностная концентрация кислородных вакансий в нанокристаллитах оксида бария относительно ее объемной концентрации.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей

на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Gartner G., Geintter P., Ritz A. Appl. Surf. Sci. 1997. No. 111. PP. 11-17.
2. Bekh I.I., Getman O.I., Il'chenko V.V., Lushkin A.E., Panichkina V.V., Rakitin S.P. // Ukr. J. Phys. 2009. V. 54, no. 3. PP. 297-302.
3. Brodie I., Vancil B. Proc. IEEE Int. Vacuum Electronics Conf., Monterey, CA, United States. 2014. PP. 53-54.
4. Капустин В.И., Ли И.П., Шуманов А.В., Москаленко С.О., Свитов В.И. Перспективные материалы. 2019. № 3. С. 19-29.
5. Капустин В.И., Ли И.П. Теория, электронная структура и физикохимия материалов катодов СВЧ приборов. М.: ИНФРА-М, 2020. 370 с.
6. Капустин В.И., Ли И.П., Шуманов А.В., Москаленко С.О. ЖТФ. 2020. Т. 90, вып. 1. С. 161-170.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Самохин А.Б.

ОБЪЕМНЫЕ СИНГУЛЯРНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 218 с. ISBN 978-5-94836-618-0.

Цена 840 руб.

В книге с помощью сингулярных интегральных уравнений рассматриваются различные классы задач электродинамики. Монография состоит из двух частей. В первой части вводятся объемные сингулярные интегральные уравнения, описывающие задачи рассеяния электромагнитных волн на трехмерных неоднородных и анизотропных структурах, а также сингулярные уравнения с запаздыванием по времени, описывающие задачи взаимодействия

нестационарного поля с ограниченной материальной средой. С использованием полученных уравнений доказываются теоремы существования и единственности решения различных классов задач рассеяния волн. Во второй части излагаются итерационные методы для решения уравнений, математически строго обосновывается применение метода Галеркина и метода коллокации для численного решения уравнений, описывающих задачи рассеяния волн на трехмерных неоднородных и анизотропных структурах. Предлагаются эффективные алгоритмы численного решения сингулярных уравнений.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosfera.ru; sales@technosfera.ru