

УДК 537.58:620.22

А.П. КИСЛИЦЫН<sup>1</sup>, А.А. ТАРАН<sup>1</sup>, П.А. КОМОЗЫНСКИЙ<sup>1</sup>, С.С. ОРДАНЬЯН<sup>2</sup><sup>1</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup> Санкт-Петербургский технологический институт (технологический университет), Санкт-Петербург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3$ С ВОЛЬФРАМОМ. ЧАСТЬ 1. ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА

Представлены результаты исследований термоэмиссионных свойств композиционных материалов в системе  $(x - 1)(Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3) + xW$ . Образцы изготовлены стандартными методами порошковой металлургии. Установлено, что для получения стабильных эмиссионных свойств данные материалы требуют активирования. Наиболее высокими эмиссионными свойствами, обеспечивающими плотность эмиссионного тока, равную  $393 \text{ A/cm}^2$  при температуре  $2000 \text{ K}$ , обладает материал  $76\text{мас.}\%(Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3) + 24\text{мас.}\%W$ . В этих композициях не обнаружено необратимых ухудшений эмиссионных свойств после длительных контактов с воздухом в холодном состоянии.

**Ключевые слова:** катод, гафнат бария-стронция, активирование эмиссионных свойств, работа выхода электрона, плотность тока эмиссии, температурная зависимость.

### 1. Общая постановка проблемы и её связь с научно-практическими задачами, обзор публикаций и анализ нерешенных проблем

В последние годы постоянно возрастает интерес к получению и исследованию физических свойств материалов на основе скандатов и гафнатов бария (см., например, [1 – 3]). Для эмиссионной электроники эти материалы представляют собой новую генерацию высокоэмиссионных высокотемпературных катодов, позволяющих получать плотности термоэмиссионного тока до  $100 \text{ A/cm}^2$  и более. Катоды, обладающие высокой эмиссионной способностью, т.е. обеспечивающие большие плотности эмиссионных токов, представляют постоянный повышенный интерес при создании эффективных элементов СВЧ техники, различных электровакуумных и газоразрядных устройств [4, 5]. Таким образом, поиск новых катодных материалов, обладающих повышенной эмиссионной способностью, является весьма актуальной задачей эмиссионной электроники.

В работе [6] приведены результаты исследований эмиссионных свойств композиционных материалов на основе гафната бария  $BaHfO_3$  с мелкодисперсным вольфрамом. Показано, что объемное содержание мелкодисперсного вольфрама в образцах является для них принципиальным параметром. Именно вольфрам в составе данного композиционного материала выполняет роль восстановителя свободного бария из соединения  $BaHfO_3$ . Восстановле-

ние происходит на границе контакта зерен гафната бария и зерен вольфрама, в результате чего скорость «производства» свободного бария зависит от суммарной площади контакта зерен, следовательно, от дисперсности исходных порошков гафната бария и вольфрама и объемной доли вольфрама.

Восстановленный свободный барий за счет диффузионных процессов доставляется к эмитирующей поверхности и адсорбируется на ней. Барий (барий и кислород), находящийся на эмитирующей поверхности снижает работу выхода электрона из образца, в результате чего повышается его эмиссионная способность. В работах [3, 6] и декларационном патенте [7] предложено использовать в качестве термокатодов электровакуумных и газоразрядных устройств наилучший материал из этой системы с составом  $63\text{мас.}\%BaHfO_3 - 37\text{мас.}\%W$ . Катод из этого материала обеспечивает плотность эмиссионного тока, равную  $230 \text{ A/cm}^2$  при температуре  $T = 2000 \text{ K}$ .

Наряду с этим известно, что в классических оксидных катодах, состоящих из смеси оксидов ( $BaO$ ,  $CaO$ ,  $SrO$ ), роль активатора играют оксиды стронция и кальция [8]. Использование таких материалов как двойной гафнат бария-стронция с мелкодисперсным вольфрамом при высоких температурах обеспечивает более высокие значения скорости восстановления бария, что позволяет получить еще большие эмиссионные токи. Композиционный материал состава  $76\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 24\%W$  (по массе) обеспечивает величину эмиссионного тока, равную  $393 \text{ A/cm}^2$  при температуре  $2000 \text{ K}$  [9 – 11].

Из сказанного следует, что исследование термоэмиссионных свойств композиционных материалов в системе  $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - W$ , которая для эмиссионной электроники является новой, представляет заметный интерес.

## 2. Цель исследований

Учитывая изложенное выше, целью работы было получение композиционных катодных материалов на основе  $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3$  с различным содержанием мелкодисперсного вольфрама и проведение комплексных исследований их эмиссионных свойств (определение режимов активирования катодов, температурных зависимостей плотности термоэмиссионного тока и работы выхода электрона), а также исследование структуры и состава поверхности эмиттеров до и после проведения эмиссионных испытаний.

## 3. Результаты исследований

Образцы исследуемого композиционного материала на основе  $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3$  с мелкодисперсным вольфрамом были изготовлены стандартными методами порошковой металлургии, описанными в работе [7]. Для исследований были получены образцы, содержащие 24, 40 и 60%W (по массе). Измерения эмиссионных свойств проводились в лабораторном диоде с плоской геометрией электродов в высоком вакууме при импульсном режиме отбора эмиссионного тока (см., например, [6]).

Первоначальный прогрев образцов, проводимый с целью их обезгаживания, показал, что в исходном состоянии все образцы обладают достаточно низкой эмиссионной способностью (рис. 1). Так, при температуре 1600 К эффективная работа выхода электрона для образцов составляет: 4,0 эВ с 60%W; 3,60 эВ с 40%W; 2,75 эВ с 24%W.

Последующие исследования позволили установить, что материалы данной системы допускают ак-

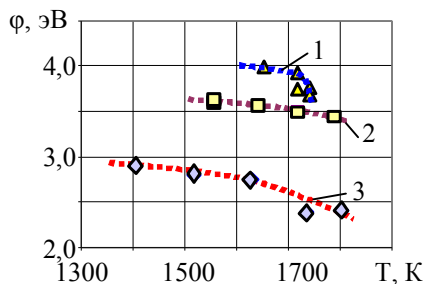


Рис. 1. Температурные зависимости работы выхода при первом нагреве:

- 1 – 40мас.% $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 60мас.%W$ ;
- 2 – 60мас.% $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 40мас.%W$ ;
- 3 – 76мас.% $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 24мас.%W$

тивирование их эмиссионных свойств. Этот процесс происходит при температурах  $\sim 1800$  К и выше. При температуре активирования первоначально наблюдается интенсивный рост эмиссионного тока, продолжающийся в течение 30...50 мин. Дальнейшая выдержка при неизменной температуре не приводит к заметным изменениям эмиссионного тока, как и в традиционных оксидных катодах.

Повторный нагрев образцов после их активирования, охлаждения и выдержки в течение  $\sim 10$  ч в высоком вакууме показывает те же самые эмиссионные характеристики, которые были получены на этапе охлаждения после активирования. Но при охлаждении образцов температурная зависимость эмиссионных токов (работы выхода) оказывается другой (см. рис. 2). Наблюдается своеобразный температурный гистерезис эмиссионных свойств. Для получения установившихся температурных зависимостей эмиссионных токов с отсутствием гистерезиса необходимо 3-х или 4-х кратное термоциклирование с достижением температур  $\sim 1900...2000$  К и выдержкой образцов при максимальной температуре в течение нескольких минут (5...10 мин).

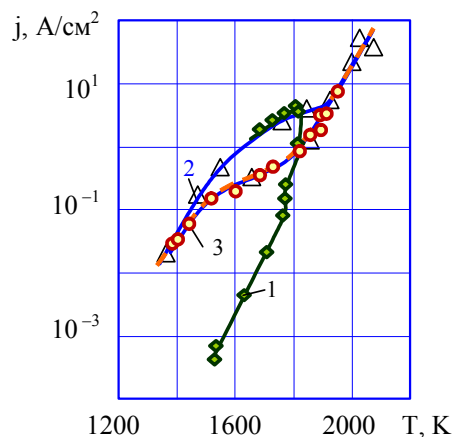


Рис. 2. Кривые активирования с термоциклированием для 60мас.% $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 40мас.%W$ :  
1 – первый цикл; 2 – второй цикл; 3 – третий цикл

Такое поведение температурных зависимостей (температурный гистерезис) может свидетельствовать о сложных процессах, происходящих в образцах. Оно свидетельствует о том, что формирование стабильной эмиссионно-активной структуры в данной системе не может быть получено простым нагревом и некоторой выдержкой при температуре активирования, как это имеет место в случае традиционных оксидных катодов.

Эмиссионные характеристики образцов исследуемых составов в установившихся состояниях (после проведения активирования) представлены на рис. 3. Здесь же на рисунке для сравнения приведены данные для состава 63% $BaHfO_3 - 37\%W$  [6], ко-

торый является одним из наилучших эмиттеров электронов.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что при температурах ниже 1420 К образцы с содержанием вольфрама 40 и 24% обладают одинаковыми эмиссионными свойствами, причем плотность их эмиссионного тока почти в 100 раз меньше, чем у  $63\%BaHfO_3 - 37\%W$ . Образцы состава с 60%W обладают еще меньшей эмиссионной способностью (плотность эмиссионного тока почти в  $10^4$  раз меньше, чем у  $63\%BaHfO_3 - 37\%W$ ).

При температуре  $1420 \pm 20$  К у образцов состава с 24%W температурный коэффициент эффективной работы выхода становится отрицательным, т.е. увеличение температуры сопровождается уменьшением работы выхода. Это приводит к тому, что плотность эмиссионного тока образцов очень быстро увеличивается и при температуре 1830 К становится равной плотности эмиссионного тока композита  $63\%BaHfO_3 - 37\%W$  ( $j = 180$  А/см<sup>2</sup>). При максимальной температуре испытаний, равной 2000 К, плотность эмиссионного тока образцов состава  $76\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 24\%W$  равна 393 А/см<sup>2</sup>, превосходя в 1,7 раза значение  $j$  для гафната бария с вольфрамом при той же температуре (230 А/см<sup>2</sup>).

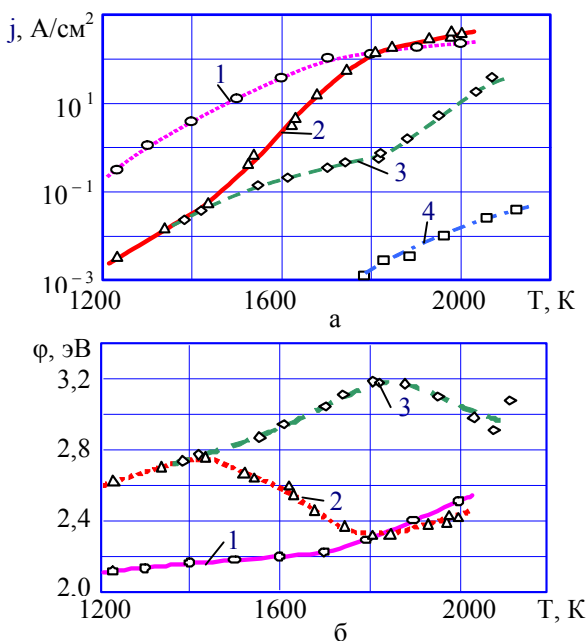


Рис. 3. Температурные зависимости:  
а – плотности термоэмиссионного тока,  
б – работы выхода электрона композитов:  
1 –  $63\%BaHfO_3 - 37\%W$ ;  
2 –  $76\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 24\%W$ ;  
3 –  $60\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 40\%W$ ;  
4 –  $40\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 60\%W$

Композиты с более высоким содержанием вольфрама (40 и 60% по массе) обладают заметно меньшей эмиссионной способностью по сравнению

с композитом, где содержание вольфрама равно 24мас.% (см. рис. 3). По этой причине данные материалы для решения задач эмиссионной электроники большого интереса не представляют. Однако, для понимания механизма, обеспечивающего столь высокую эмиссионную способность составу  $76\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 24\%W$ , результаты исследований материалов с содержанием вольфрама 40 и 60мас.% достаточно важны.

В полученных результатах (см. рис. 3) примечательным является тот факт, что в установившихся состояниях образцов с содержанием вольфрама 24 и 40мас.%W наблюдается изменение знака температурного коэффициента эффективной работы выхода. У материала с 60мас.%W в диапазоне температур 1780...2150 К такого изменения не наблюдается. Анализ причин наблюдаемых температурных зависимостей эффективной работы выхода позволяет отметить следующее. Такими причинами в равной степени могут быть:

- изменения состояния поверхности за счет адсорбции бария (бария и кислорода);
- изменения энергетических состояний электронов в объеме композита и в кристаллах гафната бария-стронция.

Представление экспериментальных данных в координатах  $\ln(j/T^2) = f(1000/T)$ , традиционных для адсорбционных систем (см. рис. 4), позволяет отметить следующее:

- группа материалов на основе гафната бария или гафната бария-стронция с точки зрения эмиссии представляют собой адсорбционные системы;

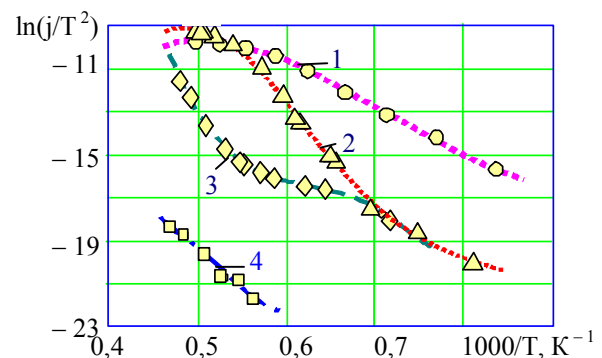


Рис. 4. Результаты измерений, представленные в координатах  $\ln(j/T^2)$  и  $f(1000/T)$ :  
1 –  $63\%BaHfO_3 - 37\%W$ ;  
2 –  $76\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 24\%W$ ;  
3 –  $60\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 40\%W$ ;  
4 –  $40\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 60\%W$

- в данных системах отвод адатомов с поверхности осуществляется традиционным способом – за счет термодесорбции, а подвод идет из объема образцов за счет диффузии. При этом скорости отвода и подвода зависят от температуры образца;

– оптимальные покрытия поверхности для разных составов реализуются при различных температурах. Для композита  $63\%BaHfO_3 - 37\%W$  оптимальное покрытие барием реализуется при температуре  $2000\text{ К}$  ( $1000/T_{\text{опт}} = 0,5$ ), для композита  $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3$  с  $24\%W$  при  $T \approx 2050\text{ К}$ , а с  $40\%W$  при  $T \approx 1550\text{ К}$ . Для композита с  $60\%W$  состояние с оптимальным покрытием бария не зарегистрировано;

– более низкие температуры, соответствующие оптимальному покрытию поверхности адатомами бария, наблюдаемые для состава  $40\text{мас.}\%W$ , могут быть связаны с меньшими значениями диффузионного потока бария из объема к поверхности.

В процессе исследований была установлена высокая химическая инертность активированного композита  $76\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 24\%W$  в холодном состоянии по отношению к воздействию атмосферного воздуха. Об этом свидетельствуют результаты, приведенные на рис. 5. Практически полное восстановление эмиссии образца с  $24\text{мас.}\%W$  свидетельствует о правомочности предположений относительно механизма, обеспечивающего высокую эмиссионную способность композиционных материалов на основе гафнатов бария (бария-стронция) с

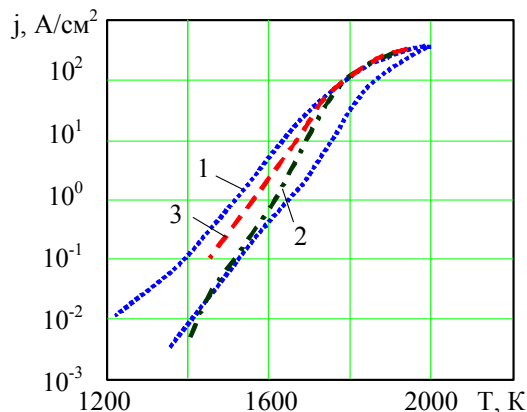


Рис. 5. Температурные зависимости плотности эмиссионного тока  $76\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 + 24\%W$ :

- 1 – последний цикл активирования;
- 2 – после испытаний и 100 ч выдержки в холодном состоянии в высоком вакууме;
- 3 – после  $\sim 1$  года контакта с воздухом

мелкодисперсным вольфрамом [12]. Действительно, полное восстановление состояния поверхности катода и его эмиссионных характеристик возможно только в том случае, когда высокая эмиссионная способность катода обусловлена адсорбцией атомов (ионов) бария (бария и кислорода) на сформированной поверхности катода. В этом случае реактивация эмиссионных свойств катодов после контакта с воздухом (в холодном состоянии) требует только их нагрева. Нагрев до высокой температуры (в нашем случае  $1750... 1800\text{ К}$ ) приводит к очистке уже

сформированной эмитирующей поверхности от «загрязнений» и формированию на ней адсорбированного слоя атомов (ионов) бария (бария и кислорода).

Еще одним, достаточно интересным результатом, полученным в процессе исследований, является наличие вакуумных пробоев межэлектродного промежутка. На рисунке 6 представлены осциллограммы плотности эмиссионного тока и анодного напряжения. Они свидетельствуют о наличии предпробойного состояния межэлектродного промежутка в конце измерительного импульса.

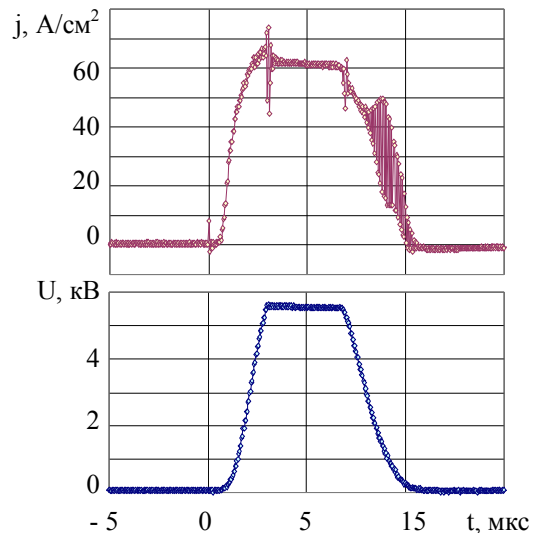


Рис. 6. Импульсы плотности эмиссионного тока и анодного напряжения, зарегистрированные при исследованиях эмиссионных свойств материалов ( $T = 1680\text{ К}$ )

Вакуумные пробои не являются чем-то необычным для эмиссионной электроники [13]. Они встречаются в системах с оксидным катодом, работающих при повышенных плотностях эмиссионного тока. Такие пробои и искрения оксидных катодов существенным образом ограничивают рабочие области плотности тока и температуры. Установлено, что причиной пробоев является повышенное содержание газов в межэлектродном промежутке, появляющихся за счет процессов, протекающих либо на катоде, либо на аноде.

В нашем случае катод выполнен из композиционного материала, обладающего высокой пористостью. При рабочих температурах в межэлектродном промежутке появляются продукты испарения катода: атомы (ионы) бария, кислорода, технологических примесей. В установившемся состоянии системы при постоянно работающем высоковакуумном насосе концентрация атомов и молекул газа в межэлектродном промежутке оказывается вполне определенной. Пробой промежутка происходит при определенных соотношениях между концентрацией атомов, величиной межэлектродного зазора и вели-

чиной анодного напряжения. Повышение концентрации атомов облегчает пробой промежутка. Следует заметить, что даже при импульсном режиме отбора тока при столь больших значениях плотностей токов ( $\sim 100 \dots 300 \text{ А/см}^2$ ), будет происходить заметный дополнительный разогрев поверхностных слоев катода в течение импульса [14]. Такой разогрев сопровождается увеличением концентрации атомов и молекул в межэлектродном промежутке в течение импульса, что приводит к улучшению условий формирования пробоя. Именно этим можно объяснить наличие предпробойных неустойчивостей на заднем фронте импульса тока (рис. 6).

Наряду с этим нельзя исключать из рассмотрения процессы на аноде. Анод, расположенный достаточно близко к катоду ( $\sim 1,5 \text{ мм}$ ), сорбирует на своей поверхности продукты испарения катода. При отборе импульса тока на анод за счет эмитированных электронов подводится достаточно большая плотность потока энергии. Без сомнения в течение импульса наблюдается интенсивный разогрев анода. Термодесорбция молекул и атомов, находящихся на нем, тоже приводит к увеличению концентрации молекул и атомов в межэлектродном промежутке, способствуя инициированию пробоя. Для разделения влияний катодных и анодных процессов на инициирование пробоя межэлектродного промежутка нужен специально поставленный эксперимент.

### Выводы

Изучены термоэмиссионные свойства новых композиционных катодных материалов в системе  $(x - 1)\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{HfO}_3 - x\text{W}$ , где  $x = 0,24; 0,40; 0,60$ .

Показано, что данный класс материалов с эмиссионной точки зрения относится к эмиттерам, в которых эмиссионная активность обеспечивается барьером, адсорбированным на эмиттирующей поверхности катода.

Установлено, что активирование эмиссионных свойств данных материалов достигается термоциклированием (3 – 4 цикла) в диапазоне температур 1400...1900 К с выдержкой при максимальной температуре в течение 5...10 мин. После активирования материалы обладают стабильными эмиссионными свойствами.

Наибольшей эмиссионной способностью из числа исследованных обладает материал состава  $76\text{мас.}\% \text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{HfO}_3 - 24\text{мас.}\% \text{W}$ , который обеспечивает плотность эмиссионного тока, равную  $393 \text{ А/см}^2$  при температуре 2000 К. Это соответствует эффективной работе выхода 2,40 эВ.

После контакта с воздухом в холодном состоянии в течение длительного времени ( $\sim 1$  года) не наблюдается необратимого отравления материала.

Полное восстановление эмиссионных свойств обеспечивается реактивированием с максимальной температурой в цикле, равной 1900 К.

Обнаружена склонность материалов к формированию вакуумных пробоев межэлектродного промежутка, что может быть связано с процессами, протекающими как на катоде, так и на аноде.

Изменения структуры поверхности композитов и обсуждение влияний этих изменений на эмиссионные свойства катодных материалов будут представлены во второй части статьи.

Авторы выражают искреннюю благодарность Е.К. Островскому за инициирование данных исследований.

### Литература

1. *Investigation and application of impregnated scandate cathode [Text] / J.Li, S.Yua, W.Shaoh et al. // Appl. Surf. Sci. – 2003. – Vol. 215, № 1-4. – P.49 – 53.*
2. *Development of high current density cathodes with scandia-doped tungsten powders [Text] / Y.Wang, J.Wang, W.Lin et al. // IEEE Trans. Electron Devices. – 2007. – Vol. 54, № 5. – P. 1061 – 1074.*
3. *Review of LaB6, Re – W dispenser and BaHfO<sub>3</sub> – W cathode development [Text] / A.Taran, D.Voronovich, S.Plankovskyy et al. // IEEE Trans. Electron Devices. – 2009. – Vol. 56, № 5. – P. 760 – 765.*
4. *Electrode for discharge lamp [Text]: US Pat. 5880558: Int. Class HOJ 017/04 / K.-D.Bauer. – №847547; appl. 23.04.1997; publ. 24.04.1996.*
5. *Emission materials for discharge lamps and methode for manufacturing electrode structures with such materials [Text]: US Pat. 5744905: Int. Class HOI1 1/62 / V.Mehrotra, H.S.Betrabet, D.R.Woodward et al.; Assignee: Philips Electronics North America Corporation, New York, N.Y. – №363182; appl. 23.12.1994; publ. 28.04.1998.*
6. *Высокоэффективный горячепрессованный эмиттер на основе гафната бария с вольфрамом и перспективы его использования в полом катоде [Текст] / А.А.Таран, Е.К.Островский, Н.В.Белан, А.И.Оранский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – №8 (16). – С. 202 – 206.*
7. *Матеріал для термоелектронного катода [Текст]: деклараційний пат. на винахід 51550 (Україна): МПК 7 HOI1 1/14 / А.О.Таран, Є.К.Островський, С.С.Орданьян (Україна); заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського «Харк. авіац. ін-т». – № 2002064776; заявл. 11.06.2002; надрук. 15.11.2002, Бюл. № 11. – 3 с.*
8. *Аишкинази, Л.А. Материалы электронных эмиттеров. Ч. II.: учеб. пособие [Текст] / Л.А.Аишкинази, В.С.Петров – М: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 1997. – 68 с.*
9. *Thermionic properties of sintered Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>HfO<sub>3</sub> with tungsten [Electronic resource] / A. Taran, O. Kyslytsyn, S. Ordanjan1, P. Komozynskiy // 12<sup>th</sup> European*

meeting on Ferroelectricity EMF 2011. – 2p. – Mode access: <http://www.icmcb-bordeaux.cnrs.fr/fichiers/booklet-EMF-2011.pdf>. – 20.04.2013.

10. Матеріал для термоелектронного катода [Текст]: пат. на винахід 97045 (Україна): МПК 7 H01J 1/00 / О.П.Кислицын, А.О.Таран, Є.К.Островський, С.С.Орданьян, П.А.Комозинський (Україна); заявник й патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С.Жуковського «Харк. авіац. ін-т». – № а 2010 11383; заявл. 24.09.2010; надрук. 26.12.2011, Бюл. № 24. – 3 с.

11. Effect of tungsten on thermionic properties and structure in  $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3$  [Text] / A.Taran, O.Kyslytsyn, S.Ordanjan, P.Komozynskij // 4<sup>th</sup> Int. Symp. on Structure – Property Relationships in Solid State

Materials SPSSM – 4: Program & Abstract. – Bordeaux, France, 2012. – P. 56

12. Таран, А.А. Изменение структуры катодных материалов на основе  $BaHfO_3 - W$  при импульсном токоотборе [Текст] / А.А.Таран, А.П.Кислицын // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – №4 (101). – С. 95 – 99.

13. Мойжес, Б.Я. Физические процессы в оксидном катоде [Текст] / Б.Я.Мойжес. – М.: Наука, 1968. – 480 с.

14. Распределение температуры в активном слое оксидного катода при непрерывном и импульсном токоотборах [Текст] / А.П.Кислицын, С.Ю.Подгорский, А.А.Таран // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – №3 (90). – С. 47 – 55.

Поступила в редакцию 24.09.2013, рассмотрена на редколлегии 9.10.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3$ З ВОЛЬФРАМОМ. ЧАСТИНА 1. ТЕРМОЕМІСІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ

*О.П. Кислицын, А.О. Таран, П.А. Комозинський, С.С. Орданьян*

Наведено результати дослідження термоемісійних властивостей композиційних матеріалів у системі  $(x - 1)(Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3) + xW$ . Зразки було виготовлено стандартними методами порошкової металургії. Встановлено, що для отримання стабільних емісійних властивостей ці матеріали потребують активування. Найбільш високі емісійні властивості, які забезпечують густину емісійного струму на рівні  $393 \text{ A/cm}^2$  при температурі 2000 К, належать матеріалу  $76\text{мас.}\%Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3 - 24\text{мас.}\%W$ . У матеріалів не виявлено необоротного погіршення емісійних властивостей після тривалих контактів з повітрям у холодному стані.

**Ключові слова:** катод, гафнат барію-стронцію, активування емісійних властивостей, робота виходу електрона, густина струму емісії, температурна залежність.

## INVESTIGATIONS OF THE COMPOSITE MATERIAL BASED ON $Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3$ WITH TUNGSTEN. PART 1. THERMIONIC PROPERTIES

*O.P. Kyslytsyn, A.A. Taran, P.A. Komozynskij, S.S. Ordanjan*

Investigations results of thermionic properties for the composite materials in the system  $(x - 1)(Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3) + xW$  are represented. The samples were obtained by standard methods of powder metallurgy. It is established that given materials are needed in the activation. Material  $76\text{mas.}\%(Ba_{0,5}Sr_{0,5}HfO_3) - 24\text{mas.}\%W$  is characterized by most high emission properties with thermionic current density  $393 \text{ A/cm}^2$  at temperature 2000 K. The irreversible degradations of the emission properties didn't observed after contacts of composite materials with air in the cold state.

**Key words:** cathode, barium-strontium hafnate, emission properties activation, electron work function, emission current density, temperature dependence.

**Кислицын Александр Петрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [arkyslytsyn@mail.ru](mailto:arkyslytsyn@mail.ru).

**Таран Анатолий Алексеевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [anatoliytaran@rambler.ru](mailto:anatoliytaran@rambler.ru).

**Комозинский Петр Адамович** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Орданьян Сергей Семенович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. химической технологии тонкой технической керамики, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия, e-mail: [ceramic-department@yandex.ru](mailto:ceramic-department@yandex.ru).