

## Многослойные полевые эмиттеры, изготовленные из приведенных в контакт нанослоев гафния и платины

© Г.Г. Соминский,<sup>1</sup> В.Е. Сезонов,<sup>1</sup> С.П. Тарадаев,<sup>1</sup> С.Н. Вдовичев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: sominski@rphf.spbstu.ru

(Поступило в Редакцию 14 марта 2018 г.)

Изучены полевые эмиттеры нового типа, изготовленные из приведенных в контакт нанослоев гафния и платины. Проведены расчеты, позволяющие оптимизировать характеристики многослойных катодов. Экспериментально измерены эмиссионные характеристики катодов. Получены токи полевой эмиссии до 2–2.5 мА при плотности тока ориентировочно до 200 А/см<sup>2</sup>. Продемонстрирована возможность существенного увеличения полного достижимого тока полевой эмиссии в результате сложения токов с нескольких многослойных систем.

DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46976.112-18

### Введение

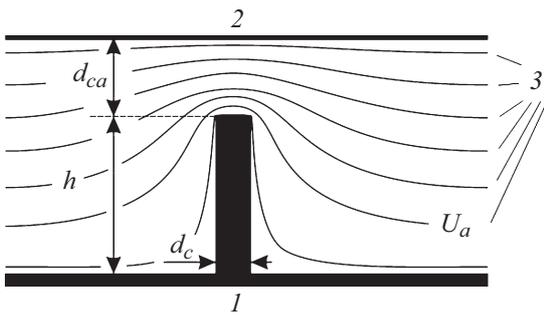
Полевые эмиттеры привлекательны для использования в миниатюрных, но высоковольтных электронных приборах. Их преимущества по сравнению с термокатадами определяются прежде всего тем, что они не требуют нагрева и практически безынерционны. Однако для обеспечения достаточно интенсивной полевой эмиссии необходимо создать поля у их поверхности порядка или даже более  $(2-4) \cdot 10^7$  В/см. Для достижения таких полей при умеренных рабочих напряжениях обычно на поверхности эмиттера создают системы выступов, обеспечивающих значительное усиление электрического поля. В условиях технического вакуума в высоковольтных электронных приборах усиливающие поле структуры разрушаются под действием бомбардировки ионами остаточного газа и/или большими по величине пондеромоторными силами, что приводит к деградации катода и выходу его из строя.

Ранее нами было обнаружено, что необходимые для эмиссии поля могут существовать у контакта материалов с сильно отличающимися значениями работы выхода  $e\phi$  [1]. Были созданы и исследованы многослойные наноструктурированные катоды из разных материалов [2–4], отличающихся разностью работ выхода  $\Delta e\phi$  приведенных в контакт слоев, и разным количеством  $N$  пар слоев. Эмиссионная эффективность катодов увеличивалась с ростом  $\Delta e\phi$ . Наибольшие токи были получены с помощью катодов из приведенных в контакт иттербия ( $e\phi_{\text{Yb}} \approx 3.1$  eV) и углерода ( $e\phi_{\text{C}} \approx 4.7$  eV). При фиксированном значении  $\Delta e\phi$  токи полевой эмиссии возрастали с увеличением количества пар слоев в катоде. Однако в исследованиях было установлено, что структуры с количеством пар слоев  $N > 40-50$  непрочны и быстро разрушаются в процессе эксплуатации, видимо, из-за уменьшения прочности при превышении

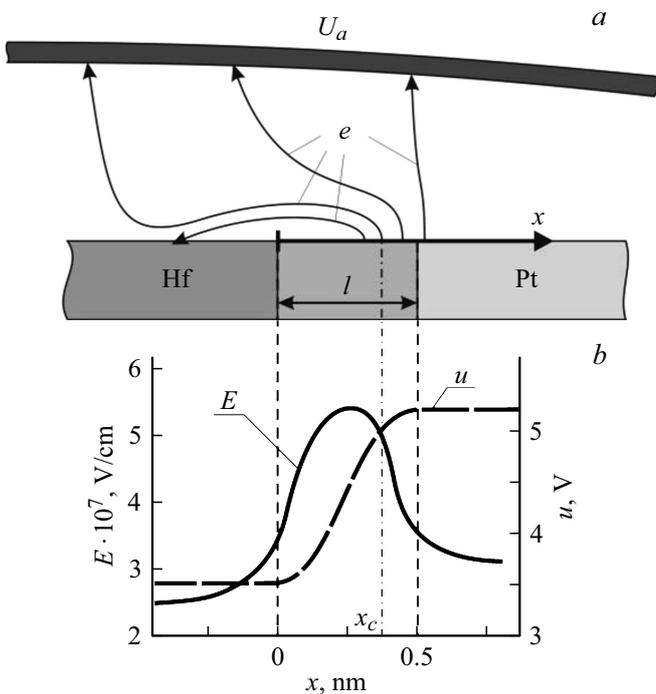
некоторого характерного значения суммарной толщины структуры  $d_{\Sigma} \sim 300-400$  nm. В настоящей работе исследованы привлекательные из-за большей по сравнению с Yb–C-катадами разницы работ выхода  $\Delta e\phi \approx 1.8$  eV многослойные эмиттеры, изготовленные из приведенных в контакт нанослоев гафния ( $e\phi_{\text{Hf}} \approx 3.5$  eV) и платины ( $e\phi_{\text{Pt}} \approx 5.3$  eV). Слоистые Hf–Pt-катоды изготавливались, как и ранее [2–4], с использованием достаточно оперативного и простого метода магнетронного напыления.

### Оптимизация структуры многослойного Hf–Pt-эмиттера

Как показали выполненные нами ранее исследования [3,4], при создании многослойных катодов необходимо прежде всего оптимизировать толщины слоев приводимых в контакт материалов. В настоящей работе, как и ранее [3,4], для решения этой задачи с использованием программы Comsol Multiphysics рассчитывались токи полевой эмиссии при разных значениях толщины слоев гафния ( $d_{\text{Hf}}$ ) и платины ( $d_{\text{Pt}}$ ), а также при разном количестве  $N$  пар слоев. При оптимизации структуры Hf–Pt-катодов учитывалось существование переходной области между контактирующими слоями, состоящей из смеси этих материалов. Формирование таких переходных областей наблюдалось ранее при создании с помощью магнетронного напыления многослойных систем, например, элементов рентгеновской оптики [5–7]. В литературе отсутствует информация о толщине переходного слоя для используемой нами пары материалов Hf–Pt, однако для других материалов эта величина меняется в сравнительно узких пределах 0.3–0.8 nm [5–7].



**Рис. 1.** Схематическое изображение диодной системы и полученных в расчете линий постоянного потенциала: 1 — катод, 2 — анод, 3 — эквипотенциалы;  $d_c$  и  $h$  — толщина и высота катода,  $d_{ca}$  — расстояние между катодом и анодом.



**Рис. 2.** а — схематическое изображение сечения модельного диода вблизи контакта Hf с Pt ( $e$  — траектории электронов,  $l$  — ширина переходной области); б — распределение поля  $E$  и потенциала  $u$  по поверхности катода.

Расчет характеристик многослойного катода велся поэтапно. Сначала без учета контактных полей у торца слоистого катода определялись распределения потенциала для диодной системы, схематически изображенной на рис. 1, при разных значениях разности потенциалов  $U$  между катодом и анодом, разных значениях толщины ( $d_c$ ) и высоты ( $h$ ) катода и фиксированном значении расстояния между катодом и анодом  $d_{ca} = 1$  мм. Затем строился „модельный диод“ с анодом, совпадающим с одной из эквипотенциалей, рассчитанных на предыдущем этапе, и потенциалом  $U_a \ll U$ , задавалось распределение потенциала у поверхности многослойной катодной структуры с учетом контактных полей и поля,

обусловленного напряжением  $U_a$ , рассчитывались распределения электрического поля  $E$  и траектории электронов в области между катодом и анодом модельного диода. На рис. 2 схематически показана конфигурация модельного диода у одной из ячеек слоистой структуры. Анод модельного диода располагался на расстоянии от катода, много меньшем 1 мм, но существенно превышающем поперечный размер ячейки многослойной структуры, например, на расстоянии 200–300 нм, т. е. в области, где поля, обусловленные контактной разностью потенциалов, малы по сравнению с внешним полем.

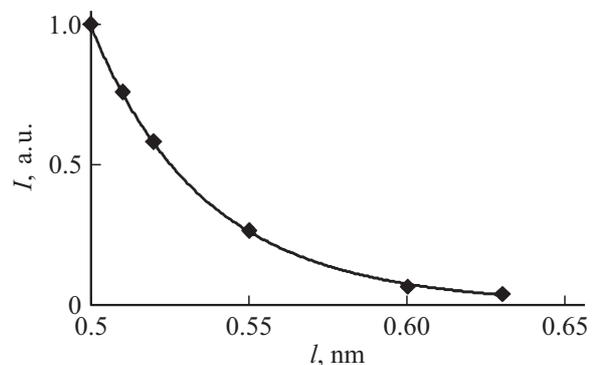
Распределение потенциала  $u$  вблизи контакта материалов с разной работой выхода задавалось в расчетах соотношением

$$u(x) = e\phi_{Hf} + (\Delta e\phi/2)[1 \pm \cos(\pi x/l)], \quad (1)$$

где  $x$  — координата вдоль поверхности катода,  $e\phi_{Hf}$  — работа выхода гафния,  $\Delta e\phi$  — разность работ выхода приведенных в контакт материалов,  $l$  — ширина переходной области (см. рис. 2). Здесь учтено, что распределение работы выхода монотонно меняется в переходной области от  $e\phi_{Hf}$  до работы выхода платины  $e\phi_{Pt}$ .

На основании полученных данных о распределении электрического поля у катода с использованием формулы Фаулера–Нордгейма определялись распределение плотности тока эмиссии по поверхности катода и полный ток  $I$  на анод. В расчетах учитывалось, что анода достигают электроны только с участка катода у контакта Hf и Pt с координатами  $x \geq x_c$  (см. рис. 2, б).

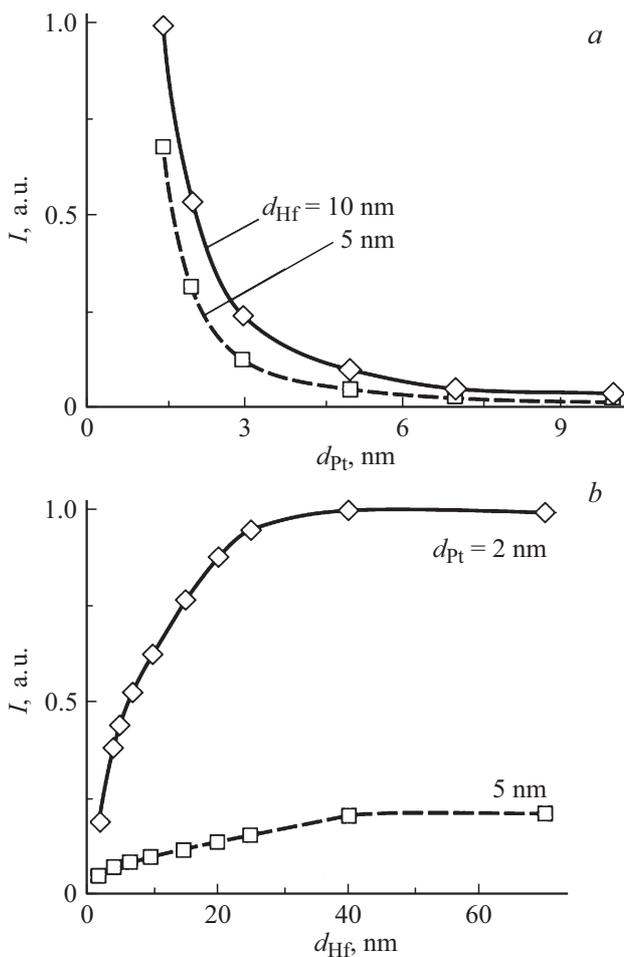
Токи рассчитывались для Hf–Pt-эмиттера, включающего 20 пар слоев, при разных значениях толщины слоев гафния ( $d_{Hf}$ ) и платины ( $d_{Pt}$ ), а также ширины переходной области  $l$ . На рис. 3 показана типичная зависимость тока  $I$  от величины  $l$ , полученная при  $U = 6$  кВ для структуры со слоями гафния и платины толщиной соответственно  $d_{Hf} = 10$  нм и  $d_{Pt} = 2$  нм. На рис. 4, а приведены зависимости эмиссионного тока от толщины  $d_{Pt}$  слоев платины, полученные при двух значениях толщины слоев гафния  $d_{Hf}$ . Зависимости  $I(d_{Hf})$ , полученные при двух значениях  $d_{Pt}$ , показаны на рис. 4, б.



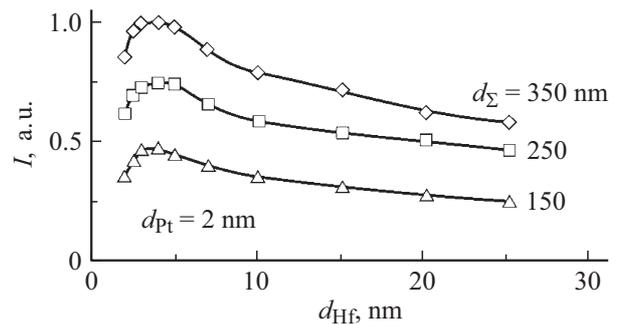
**Рис. 3.** Зависимость от ширины переходной области  $l$  тока эмиссии  $I$  многослойной системы, состоящей из  $N = 20$  пар слоев;  $d_{Hf} = 10$  нм,  $d_{Pt} = 2$  нм,  $U = 6$  кВ.

Из расчетов видно, что для структуры, включающей 20 пар слоев, увеличение толщины слоев платины  $d_{Pt}$  при фиксированной толщине слоев гафния  $d_{Hf}$  ведет к быстрому падению эмиссионного тока. Увеличение же толщины слоев гафния при  $d_{Pt} = \text{const}$  сопровождается быстрым ростом эмиссионного тока, во всяком случае в интервале  $d_{Hf} \leq 20\text{--}25$  nm.

Из проведенного расчета следует очевидный казался бы вывод, что для получения максимального тока при минимальной толщине слоев платины толщину слоев гафния необходимо выбирать равной или больше 20–25 nm. Однако такой вывод может оказаться неверным, если учесть, что суммарная толщина многослойного катода не должна превышать 300–400 nm. Действительно, если при заданной суммарной толщине слоистой структуры  $d_{\Sigma}$  и при фиксированной толщине слоев платины 2 nm оптимизировать толщину слоев гафния при произвольном количестве пар слоев  $N$  в структуре, расчеты дают другой результат, который иллюстрируют характеристики, приведенные на рис. 5.



**Рис. 4.** *a* — зависимости тока эмиссии  $I$  многослойного катода от толщины слоев платины  $d_{Pt}$ , рассчитанные при фиксированных значениях толщины слоев гафния  $d_{Hf}$ ; *b* — зависимости  $I(d_{Hf})$ , полученные при постоянных значениях толщины слоев платины ( $d_{Pt}$ ).



**Рис. 5.** Зависимости тока эмиссии  $I$  от толщины слоев гафния  $d_{Hf}$ , рассчитанные при одинаковой толщине слоев платины  $d_{Pt} = 2$  nm для катодов разной суммарной толщины  $d_{\Sigma}$ .

Из расчетов следует, что при суммарной толщине слоистой структуры 150–350 nm наибольшие токи эмиссии могут быть получены при толщинах слоев гафния  $d_{Hf} \sim 3\text{--}5$  nm. Например, при толщинах  $d_{Pt} = 2$  nm и  $d_{Hf} = 5$  nm катод, включающий 35 пар слоев и имеющий суммарную толщину  $d_{\Sigma}$  около 250 nm, согласно расчетам, обеспечивает на 20–30% больший ток эмиссии, чем катод той же суммарной толщины, но с толщинами слоев платины и гафния соответственно 2 и 10 nm.

## Экспериментальное исследование многослойных Hf–Pt-эмиттеров

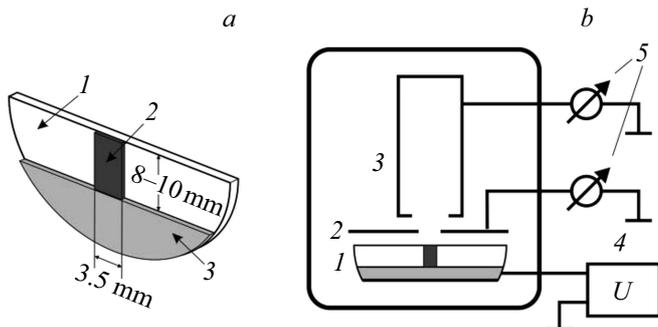
На рис. 6, *a* показано схематическое изображение слоистого катода. При создании эмиттеров в качестве подложки использовалась пластина из монокристалла арсенида галлия толщиной  $430 \mu\text{m}$  (1) с удельным сопротивлением не менее  $10^7 \Omega/\text{cm}$ . На боковую поверхность подложки последовательно наносилось 20 пар слоев Hf и Pt шириной 3.5 mm (2). Была исследована работа катодов *C1* и *C2* с разными толщинами слоев Hf, равными у этих катодов соответственно 5 и 10 nm. Толщины слоев Pt у катодов *C1* и *C2* были одинаковы и равнялись 2 nm. Чтобы снизить усиление поля, существующее у границы слоистых структур, и уменьшить связанную с этим неоднородность полевой эмиссии по сечению катода, последний (внешний) слой Pt имел увеличенную толщину 20 nm. Для подачи напряжения на катод использовался нанесенный поверх слоистой структуры слой титана толщиной 200 nm (3). После создания многослойной системы монокристалл GaAs скалывался по кристаллографическому направлению, что обеспечивало атомарно ровный срез на эмитирующем торце катода.

Эмиссионные характеристики катодов исследовались с использованием измерительной системы, схематически изображенной на рис. 6, *b*. Расстояние между катодом 1 и управляющим электродом 2 устанавливалось равным 1 mm. Для получения полевой эмиссии на катод подавалось отрицательное относительно управляющего

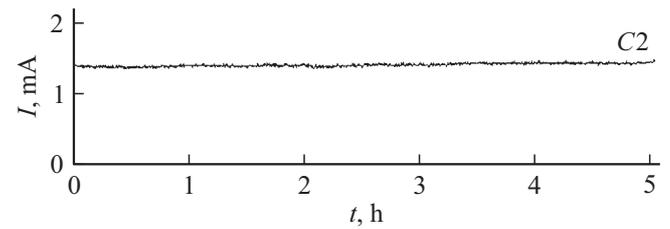
электрода постоянное напряжение  $U$ . Токи эмиссии измерялись в цепи коллектора 3, выполненного в форме цилиндра Фарадея, а также в цепи управляющего электрода 2. Для регистрации изменений тока во времени использовался электронный самописец 5 типа Velleman PCS10.

Вакуумная камера, использованная для исследования слоистых катодов, подвергалась непрерывной откачке с помощью магнитно-разрядного насоса. После установки в вакуумную камеру катоды подвергались тренировке с отбором тока в течение нескольких часов при увеличенном давлении  $10^{-6} - 10^{-7}$  Torr. Исследование эмиссионных характеристик катодов производилось при давлениях остаточного газа  $(2-5) \cdot 10^{-8}$  Torr.

Типичные экспериментально измеренные вольт-амперные характеристики катодов C1 и C2 представлены на рис. 7. В исследованном интервале напряжений катод C1 обеспечивал ток эмиссии примерно до  $300 \mu\text{A}$ . С катода C2 был получен ток эмиссии более  $2 \text{ mA}$  при плотности тока около  $200 \text{ A/cm}^2$ . Сравнение результатов



**Рис. 6.** *a* — схематическое изображение многослойного катода: 1 — подложка из GaAs, 2 — многослойная система, 3 — Ti металлизация; *b* — схематическое изображение сечения измерительной системы: 1 — катод, 2 — управляющий электрод, 3 — коллектор, 4 — источник стабилизированного постоянного напряжения  $U$ , 5 — измерительная аппаратура.



**Рис. 8.** Зависимость тока эмиссии катода C2 от времени:  $U = 6 \text{ kV}$ .

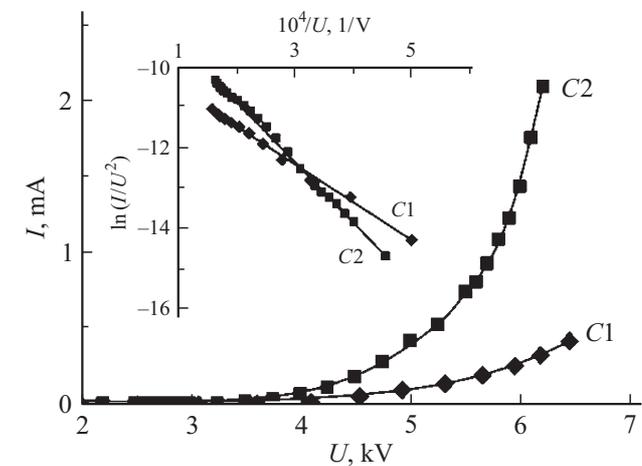
проведенных измерений с результатами выполненных расчетов позволили оценить ширину переходной области  $l$ . Наилучшее совпадение расчетов с экспериментальными данными имеет место при  $l = 0.51 \text{ nm}$ .

Для оценки возможности стабильной эксплуатации слоистых катодов измерялись изменения тока эмиссии во времени. На рис. 8 показана типичная зависимость  $I(t)$ , измеренная для катода C2 при начальном токе  $\sim 1.4 \text{ mA}$ .

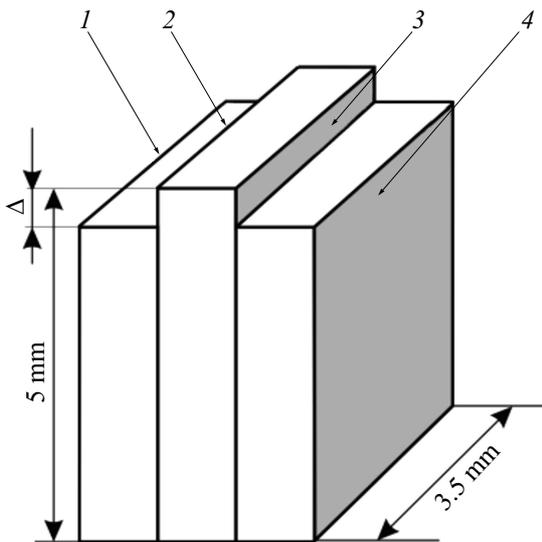
### Расчет характеристик составного катода

Исследованные слоистые катоды малой площади ( $\sim 10^{-5} \text{ cm}^2$ ) обеспечивали токи полевой эмиссии, не превосходящие единиц mA. Между тем во многих приложениях необходимы токи порядка десятков mA или даже более [8]. Кратное увеличение токов принципиально возможно при использовании „составной“ катодной системы, включающей более одного многослойного катода.

При объединении в одну катодную систему нескольких многослойных структур важно обеспечить условия, когда в заданной диодной системе с плоским анодом близки по величине электрические поля у торцевой (эмитирующей) поверхности всех эмиттеров в составном катоде. Для определения таких условий были проведены расчеты для составного катода, включающего четыре многослойных эмиттера. Схематическое изображение рассматриваемого катода приведено на рис. 9. Катод состоит из 4 многослойных структур (1-4), нанесенных на 3 подложки из GaAs одинаковой толщины  $430 \mu\text{m}$ . На центральную подложку многослойные структуры нанесены с обеих сторон. Для обеспечения приблизительно одинакового поля у поверхности всех многослойных структур центральная подложка приподнята над соседними на величину  $\Delta$ . Для определения величины  $\Delta$  и тока эмиссии составного катода были проведены расчеты для катода, имеющего следующие параметры: все 4 многослойные структуры включают по 20 пар слоев Hf и Pt толщины соответственно  $d_{\text{Hf}} = 10 \text{ nm}$  и  $d_{\text{Pt}} = 2 \text{ nm}$ . Расстояние между плоским анодом и центральной подложкой  $1 \text{ nm}$ .



**Рис. 7.** Вольт-амперные характеристики и характеристики Фаулера–Норгейма катодов C1 и C2.



**Рис. 9.** Схематическое изображение составного катода:  $\Delta$  — высота вылета центральной подложки, 1–4 — слоистые системы.

При этих параметрах оптимальная высота  $\Delta$  возвышения центральной подложки, обеспечивающая равенство полей у торца всех включенных в составной катод слоистых структур, равна  $220\ \mu\text{m}$ . Суммарный ток эмиссии  $I$  для данного составного катода при напряжении  $U = 10\ \text{kV}$  достигал значения около  $10\ \text{mA}$ . Таким образом, проведенные расчеты свидетельствуют о существовании больших резервов повышения токов полевой эмиссии при создании составных катодов.

## Заключение

Подытоживая проведенные исследования, отметим важнейшие полученные результаты:

- в расчетах, учитывающих существование переходных зон в области контакта материалов с разной работой выхода, оптимизирована структура многослойных гафний-платиновых катодов;

- экспериментально исследована работа гафний-платиновых катодов и продемонстрирована возможность стабильной их работы при отборе с эмитирующей поверхности катода площадью  $\sim 10^{-5}\ \text{cm}^2$  токов полевой эмиссии  $\sim 2\text{--}2.5\ \text{mA}$  при плотностях тока приблизительно до  $200\ \text{A/cm}^2$ ;

- продемонстрирована возможность создания составных катодов, включающих несколько слоистых эмитирующих структур и обеспечивающих кратное увеличение токов эмиссии по сравнению с одиночным многослойным катодом.

Исследованные многослойные катоды перспективны для использования в миниатюрных высоковольтных электронных приборах, работающих в условиях технического вакуума.

Работа финансировалась Российским научным фондом (проект № 16-12-10010).

## Список литературы

- [1] Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Саксеев Д.А., Тумарева Т.А. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 6. С. 104–108.
- [2] Sominski G.G., Sezonov V.E., Taradaev E.P., Tumareva T.A., Zadiranov Yu.M., Kornishin S.Yu., Stepanova A.N. // Radiophys. Quant. El. 2015. Vol. 58. N 7. P. 511–519.
- [3] Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Задиранов Ю.М. // НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки. 2015. Вып. 3. С. 48–53.
- [4] Sominskii G., Sezonov V. // Proc. of the 14<sup>th</sup> Baltic Conf. on Atomic Layer Deposition. St. Petersburg, Russia, 2016. P. 63.
- [5] Журавель И.А., Бугаев Е.А., Девизенко А.Ю., Першин Ю.П., Кондратенко В.В. // Физическая инженерия поверхности. 2011. Т. 9. Вып. 2. С. 134–141.
- [6] Журавель И.А., Бугаев Е.А., Конотопский Л.Е., Севрюкова В.А., Зубарев Е.Н., Кондратенко В.В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 5. С. 71–77.
- [7] Автореф. канд. дис. Е.А. Вишняков. МФТИ, 2013. 132 с.
- [8] Glyavin M.Yu., Manuilov V.N., Sominskii G.G., Taradaev E.P., Tumareva T.A. // Infrared Phys. Techn. 2016. Vol. 78. P. 185–189.