

Влияние полей пятен на полевую эмиссию композитов

© Г.Г. Соминский,¹ В.Е. Сезонов,¹ Д.А. Саксеев,² Т.А. Тумарева¹

¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sominski@rphf.spbstu.ru

(Поступило в Редакцию 21 октября 2010 г.)

Экспериментально исследована полевая эмиссия двух типов композитных катодов из материалов, существенно различающихся работой выхода $e\phi$ (гексаборид лантана–пирографит, карбид гафния–пирографит), а также химически однородных катодов из гексаборида лантана. Эффективная эмиссия катодов из „контрастных“ по работе выхода материалов и существенно худшие автоэмиссионные характеристики химически однородного катода объяснены с учетом влияния на полевую эмиссию сильных ($\geq 2 \cdot 10^7$ V/cm) полей пятен, возникающих при контакте материалов с разной работой выхода. Проведенные численные расчеты позволяют оценить плотности токов полевой эмиссии, обусловленной полями пятен, а также закономерности переноса к аноду электронов, эмитированных под действием полей пятен.

Введение

В настоящее время ведется поиск материалов, пригодных для изготовления долговечных автоэмиссионных источников электронов для устройств, работающих в условиях технического вакуума. В частности, исследуются композиты разного сорта (см., например, [1,2]). Композиты привлекают к себе внимание, прежде всего, потому что в них могут быть использованы мелкоструктурированные материалы разной природы. Изменение структуры и состава композитов в принципе позволяет оптимизировать свойства построенных на их основе автоэмиссионных катодов. В данной работе делается попытка определить влияние на полевую эмиссию полей пятен, возникающих при близком соседстве на поверхности катода материалов, сильно различающихся своей работой выхода $e\phi$.

1. Методика измерений и аппаратура

Была экспериментально изучена полевая эмиссия композитных катодов C_1 и C_2 из гранул гексаборида лантана ($e\phi \approx 2.5\text{--}3.8$ eV) в матрице из пирографита ($e\phi \approx 4.7$ eV), а также катода C_3 из гранул карбида гафния ($e\phi \approx 3.0\text{--}4.0$ eV) в такой же матрице. Гранулы LaB_6 и HfC имели разную форму. Их максимальные размеры для обоих катодов не превышали $40 \mu\text{m}$. Слой пирографита толщиной не более ~ 200 nm обволакивал и соединял между собой гранулы. Наряду с указанными композитными катодами исследована также полевая эмиссия однородного по химическому составу катода C_4 из гексаборида лантана. Все катоды имели форму дисков диаметром 20 mm и толщиной 1 mm.

Указанные выше значения работы выхода компонентов композитных катодов (LaB_6 , HfC , пирографит) определены на основе существующих литературных данных [3]. Работа выхода гексаборид-лантанового катода C_4

рассчитана на основе измеренных авторами его термоэмиссионных характеристик. Проведенные измерения свидетельствуют, что средняя по поверхности этого катода работа выхода $e\phi \approx 3.7$ eV.

Для получения информации о морфологии и химическом составе поверхности катодов использовался растровый электронный микроскоп JEOL FESEM с рентгеновским анализатором. Контроль характеристик поверхности проводился перед установкой катодов в экспериментальный прибор и после их длительной эксплуатации с отбором тока. Композитные катоды C_1 , C_2 и C_3 имели качественно подобный рельеф поверхности. Типичное изображение одного из композитных катодов приведено на рис. 1. До проведения измерений на выходящих на поверхность композитных катодов C_1 , C_2 , C_3 гранулах существовали висеры малого ($\leq 0.5\text{--}0.6 \mu\text{m}$) диаметра.

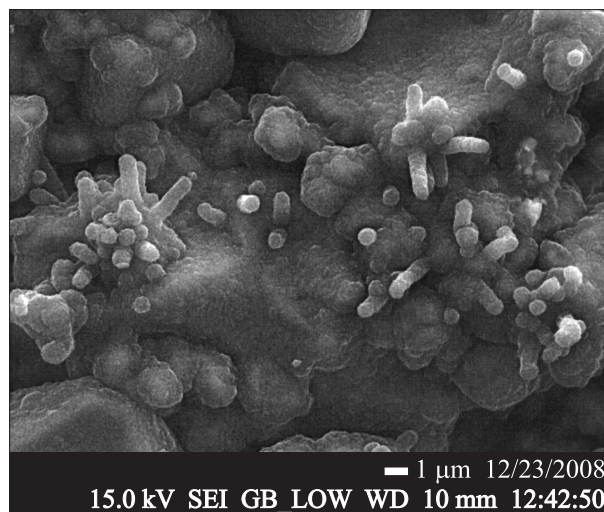


Рис. 1. Изображение поверхности композитного катода C_2 , полученное с помощью растрового электронного микроскопа JEOL FESEM.

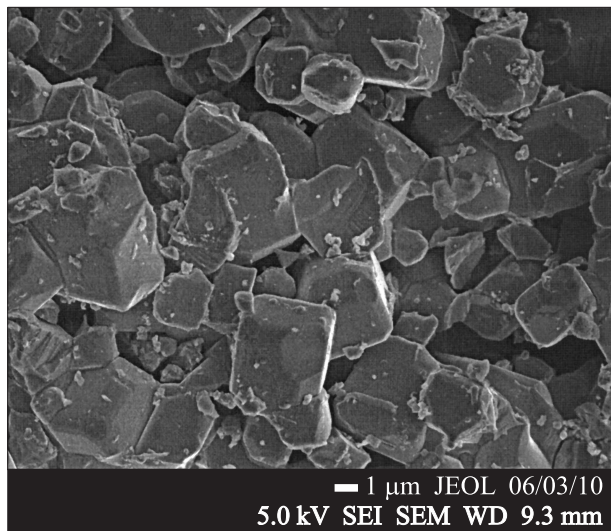


Рис. 2. Изображение поверхности химически однородного катода C_4 , полученное с помощью растрового электронного микроскопа JEOL FESEM.

Как показал анализ спектров рентгеновского излучения, эти висеры состоят практически только из атомов углерода. Гранулы на поверхности химически однородного катода C_4 были в основном меньшего размера и не имели ярко выраженных висерообразных структур (рис. 2).

Обнаруженные неоднородности исследованных катодов могут обеспечить усиление электрического поля у выступов поверхности. Оценки, сделанные стандартными методами [2], свидетельствуют, что возможное усиление поля для всех исследованных катодов, даже у вершины висерообразных структур, не превышает 30–50.

Экспериментальное исследование автоэмиссионных свойств композитных катодов выполнено в системе, сечение которой схематически приведено на рис. 3. В случае необходимости нагрев катода осуществлялся изолированным от катода подогревателем. Температура

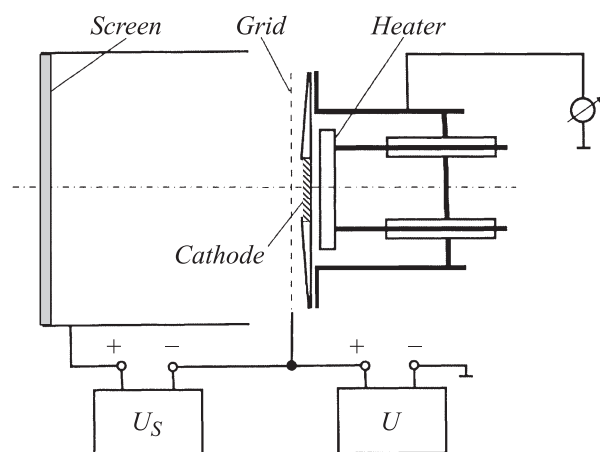


Рис. 3. Схематическое изображение сечения анализирующей системы, использованной для измерения эмиссионных характеристик композитных катодов.

катода измерялась с помощью оптического пирометра через специальное окно в вакуумной камере. Электрическое поле у поверхности катода создавалось напряжением U , приложенным к прозрачной ($\sim 75\%$) сетке относительно заземленного катода. Расстояние d между сеткой и катодом варьировалось в пределах 2.5–3.0. Электроны, эмитированные с катода, пройдя сквозь сетку, дополнительно ускорялись напряжением U_S и попадали на поверхность люминесцентного экрана. Наблюдая изображения на экране, можно было контролировать вид распределения потока электронов с катода. Ток полевой эмиссии измерялся в цепи катода.

Измерения полевой эмиссии и термоэмиссии гексаборид-лантанового катода выполнены в аналогичной системе, но без люминесцентного экрана.

Основные измерения проводились при давлении остаточного газа в вакуумной камере $\sim 10^{-7}$ Торр. Для выявления влияния ионной бомбардировки на работу исследованных эмиттеров в некоторых экспериментах давление остаточного газа в экспериментальном приборе варьировалось в пределах 10^{-5} – 10^{-7} Торр.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На начальном этапе работы полевая эмиссия исследованных катодов нестабильна. При постоянном напряжении их эмиссионный ток сильно флуктуирует. Работа катодов становится более стабильной после их термической обработки, а также длительной (десять часов) тренировки — „формовки“ с отбором тока. Наблюдения с помощью микроскопа JEOL FESEM свидетельствуют, что после длительных испытаний катодов с отбором тока сглаживаются усиливающие поле неоднородности их поверхности. Наиболее сильны такие изменения для композитных катодов. После завершения формовки висеры на поверхности композитных катодов заметно уменьшаются по длине или срываются полностью.

Согласно существующим в литературе представлениям [1,2], изменения морфологии поверхности катодов в процессе их формовки можно связать с действием пондеромоторных сил электрического поля, которые приводят к удалению с поверхности слабосвязанных с ней частиц, а также с распылением катодов под действием бомбардировки ионами остаточных газов.

Как следует из проведенных измерений, ток полевой эмиссии композитных катодов при длительной их эксплуатации с отбором тока периодически меняется и после завершения процесса первичной формовки. Скорость таких изменений может быть существенно увеличена, если при отборе тока повысить на 1–2 порядка давление в приборе. Такое повышение давления при работе с химически однородным катодом C_4 не приводило к заметным изменениям тока эмиссии. Данные, полученные с помощью рентгеновского анализатора JEOL FESEM, свидетельствуют о том, что указанные

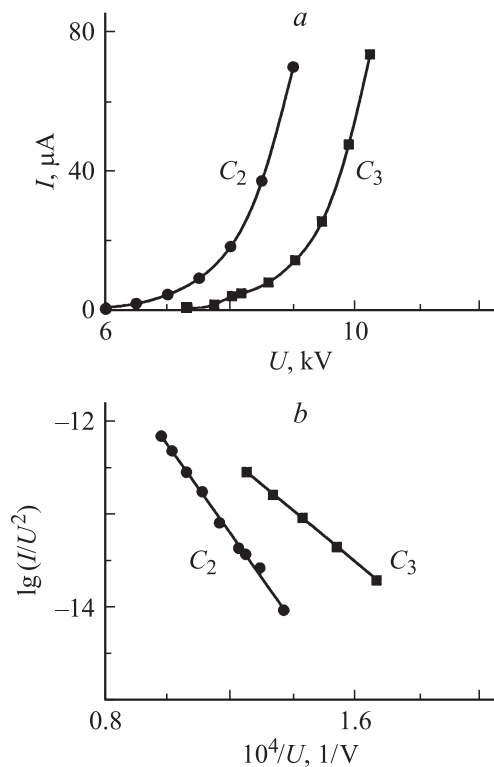


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики (а) и характеристики Фаулера–Нордгейма (б) композитных катодов C_2 и C_3 .

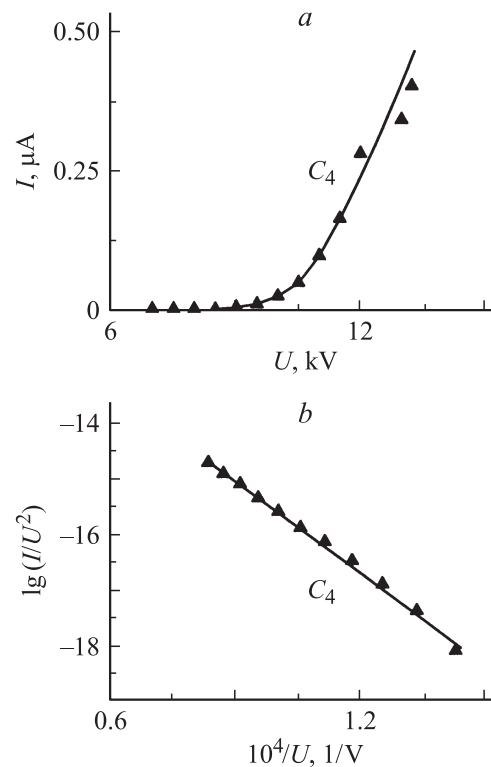


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики (а) и характеристики Фаулера–Нордгейма (б) химически неоднородного катода C_4 .

изменения эмиссионных характеристик композитных катодов могут быть связаны с изменением в результате ионного распыления площади участков их поверхности, где гексаборид лантана или карбид гафния освобождены от закрывающего их слоя пирографита.

Для композитных катодов после формовки полевая эмиссия достигала $50\text{--}80\ \mu\text{A}$ при аномально малых средних по поверхности катода полях $E_{av} = U/d \sim (3\text{--}4)10^4\ \text{V/cm}$. При таких же значениях среднего электрического поля автоэмиссия с поверхности химически однородного гексаборид-лантанового катода C_4 была существенно меньше и после завершения тренировки не превышала $\sim (1\text{--}5)10^{-1}\ \mu\text{A}$. Типичные вольт-амперные характеристики и характеристики Фаулера–Нордгейма для композитных катодов C_2 и C_3 показаны соответственно на рис. 4, а и б. Те же характеристики химически однородного гексаборид-лантанового катода C_4 изображены на рис. 5, а и б. Полевую эмиссию исследованных катодов не удается объяснить в рамках классической теории Фаулера–Нордгейма, даже с учетом существующего усиления поля на неоднородностях их поверхности.

Низкие пороги полевой эмиссии фиксировались ранее у многих эмиттеров, имеющих сложную структуру и/или химический состав поверхности (см., например, [4–6]). Аномально низкие пороги эмиссии объяснялись существованием разного сорта дефектов и дипольных образований [4,5], а также особых электронных состояний в приповерхностных слоях эмиттеров [6,7]. С нашей

точки зрения, кроме таких механизмов (а может быть, и в основном), эмиссия исследованных композитных катодов определяется такими участками их поверхности, где электроны могут выходить в вакуум с областей контактов между пирографитом и LaB_6 или между пирографитом и HfC . Поля у катода в контактной области определяются величиной $\Delta U/\Delta l$, где ΔU — контактная разность потенциалов, а Δl — расстояние между границами материалов с разной работой выхода. При возможных для исследованных пар материалов значениях $\Delta U \geq 1\ \text{V}$, если $\Delta l \leq 0.5\ \text{nm}$, поля на этих участках поверхности могут быть $\geq 2 \cdot 10^7\ \text{V/cm}$, и такие поля достаточны для получения интенсивной полевой эмиссии с контактных областей.

Показательно, что при одинаковых средних полях у поверхности ток полевой эмиссии с химически однородного катода C_4 мал по сравнению с автоэмиссионными токами неоднородных по составу композитных катодов C_1 и C_2 . С учетом того что средняя по поверхности работа выхода катода C_4 меньше, чем работа выхода катодов C_1 и C_2 , такой результат можно было бы связать с тем, что у катода C_4 меньше усиление поля на неоднородностях поверхности. Однако проведенные с помощью растрового электронного микроскопа исследования свидетельствуют о том, что разницей в усилении поля вряд ли можно объяснить разницу в токах, достигающую приблизительно двух порядков величины (см. рис. 4 и 5). Нам представляется более вероятным и обоснованным объяснение малых токов полевой эмиссии химически

однородного катода C_4 тем обстоятельством, что на его поверхности отсутствуют сильные поля пятен. Проведенное сравнение токов эмиссии для композитных катодов и химически однородного гексаборид-лантанового катода свидетельствует, с нашей точки зрения, в пользу выдвинутой гипотезы о существенном влиянии полей пятен на полевою эмиссию исследованных композитов.

В экспериментах было обнаружено, что величина тока полевою эмиссии для композитных катодов меняется с изменением температуры. Проследить влияние нагрева и охлаждения можно на рис. 6. Здесь показаны типичные для всех исследованных композитных катодов изменения во времени тока эмиссии I , происходящие при постоянном напряжении в условиях, когда в процессе измерения характеристики $I(t)$ изменяется температура катода T . Температура увеличивалась от комнатной примерно до 600 К после включения накала. После выключения накала катод снова охлаждался до комнатной температуры. Моменты включения и выключения накала указаны на рис. 6 стрелками. Начальный рост эмиссионного тока после включения накала связан, по-видимому, с обезгаживанием поверхности катода и уменьшением ее работы выхода. После достижения установившегося значения температуры ток падает до чрезвычайно малых значений и увеличивается приблизительно до исходной величины только после выключения накала. Такое влияние нагрева можно связать с изменением расстояния между границами материалов с разной работой выхода, имеющих разные коэффициенты расширения.

В пользу предложенного объяснения говорят и полученные данные о влиянии нагрева на эмиссию катода C_4 . Нагрев практически не влияет на эмиссию этого однородного по химическому составу катода вплоть до температуры ~ 1000 – 1100 К. При температуре свыше 1100 К ток эмиссии увеличивается с ростом температуры из-за появления заметной термоэмиссии. На рис. 7 приведены иллюстрирующие сказанное вольт-

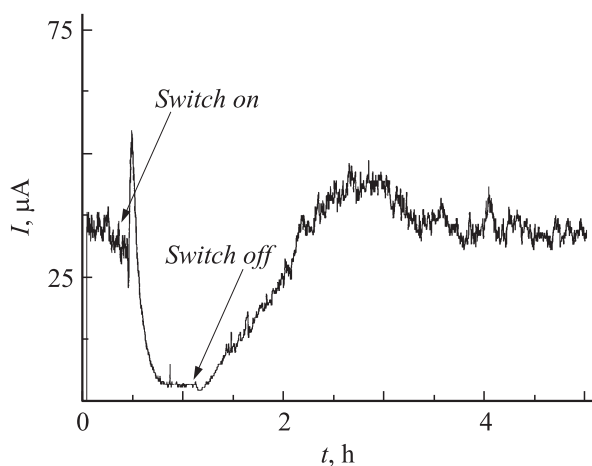


Рис. 6. Изменение во времени тока полевою эмиссии катода C_3 . Характеристика получена при напряжении $U = 9.3$ kV. Начальная температура катода $T = 300$ К. Стрелками отмечены моменты включения и выключения накала подогревателя.

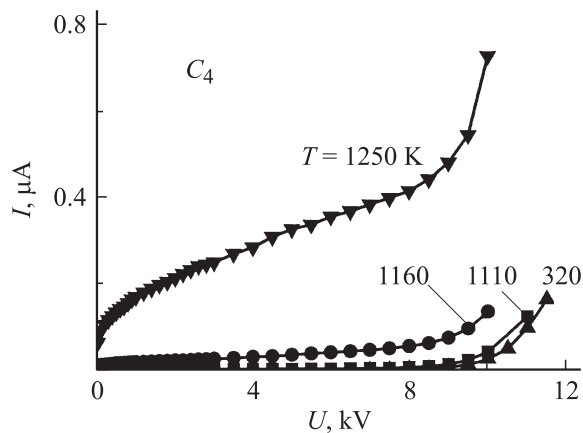


Рис. 7. Измеренные при разных значениях температуры T вольт-амперные характеристики химически однородного катода C_4 .

амперные характеристики катода C_4 , полученные при разных температурах.

В рамках рассмотренного механизма полевою эмиссии под действием сильных полей пятен требует дополнительного пояснения перенос электронов с катода на анод в полях, созданных приложенной к электродам диода разностью потенциалов U . Для получения такой информации с использованием программы SIMION были проведены численные расчеты движения электронов в диоде с композитными катодами типа C_1 , C_2 . Рассматривалось движение электронов с границы между пирографитом и гексаборидом лантана на вершине одной из гранул поверхности катода.

Расчеты проводились в два этапа. На первом этапе было рассчитано усиление электрического поля β у гранулы микронного размера, с внешней поверхности которой, граничащей с вакуумом, удален (например, под действием ионной бомбардировки) слой пирографита. Было установлено, что усиление поля достигает значений приблизительно от 3 до 6. Далее были рассчитаны траектории электронов и эмиссия с пирографита, граничащего с гексаборидом лантана. Расчеты выполнены в моделирующей диодной системе, схематически изображенной на рис. 8, на котором слой гексаборида лантана шириной L расположен между двумя участками пирографита (С). Напряжение $U_{\text{ам}}$ на аноде моделирующей системы определялось соотношением $U_{\text{ам}} = \beta U d_m / d$, где d_m — расстояние между катодом и анодом этой системы. Основные расчеты выполнены при значениях d_m от 40 до 75 нм. При проведении расчетов варьировались значения напряжения $5 \leq U \leq 12$ kV, коэффициента усиления поля $3 \leq \beta \leq 6$, контактной разности потенциалов $0.7 \leq \Delta U \leq 2$ V, расстояния между границами материалов с различной работой выхода $0.3 \leq \Delta l \leq 0.9$ nm, а также размеры областей с малой работой выхода $1 \leq L \leq 15$ nm.

Типичное распределение электрического поля, определяющего эмиссию, с пирографита, показано на рис. 9.

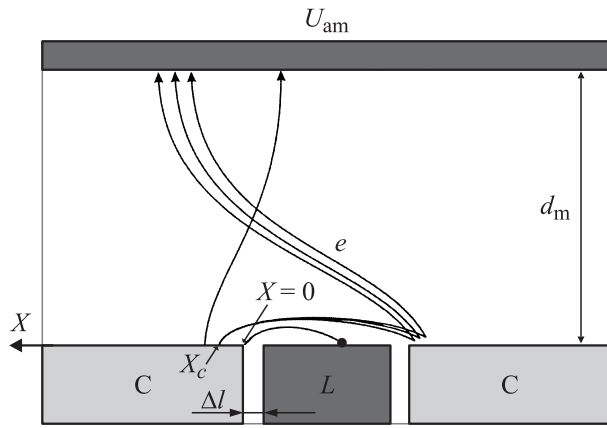


Рис. 8. Схематическое изображение сечения моделирующей диодной системы, использованной при расчете закономерностей полевой эмиссии под действием полей пятен на поверхности композитного катода. Показаны слои гексаборида лантана и пирографита (C), а также типичные траектории электронов (e), эмитированных с пирографита. U_{am} — напряжение на аноде; d_m — расстояние между катодом и анодом моделирующей системы; Δl — расстояние между границами материалов с различной работой выхода, X_c — критическое значение координаты X , разграничивающей участки пирографита, с которых электроны достигают анода ($X \geq X_c$) и возвращаются на катод ($0 \leq X < X_c$).

Траектории электронов изображены на рис. 8. Анода достигают электроны, эмитированные из области с $X \geq X_c$. Электроны с участка катода с $0 \leq X < X_c$ возвращаются на катод. Наибольший вклад в эмиссию дает участок пирографита вблизи критического значения координаты $X \approx X_c$.

В исследованном интервале параметров ΔU , Δl , L , β плотности токов эмиссии в точке $X = X_c$, рассчитанные по формуле Фаулера–Нордгейма, менялись в пределах

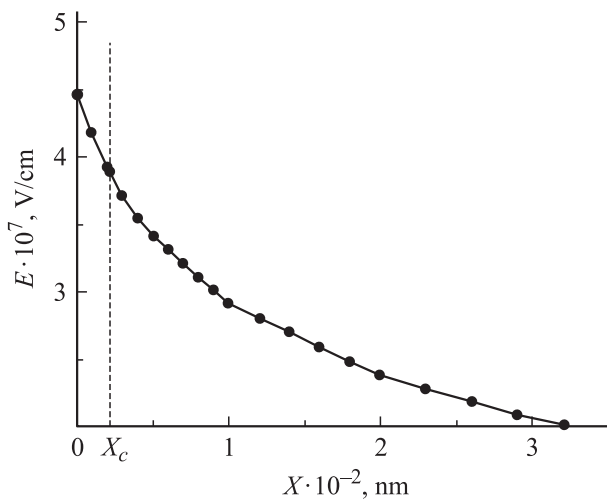


Рис. 9. Типичное распределение электрического поля E у поверхности пирографита. Указано положение критического значения X_c . Расчет выполнен при $U = 10$ кВ, $\Delta U = 1$ В, $\Delta l = 0.5$ нм, $L = 12$ нм, $d_m = 75$ нм, $\beta = 3$.

$10^2 - 10^8$ А/см². Были определены изменения плотности тока эмиссии J_c в точке $X = X_c$ с изменением напряжения U . Расчет зависимостей $J_c(U)$ был выполнен для условий, когда $J_c \leq 10^5$ А/см². При такой плотности тока отсутствует ограничение тока пространственным зарядом. В рассмотренной модели увеличение тока на анод с ростом напряжения U связано с уменьшением X_c и с обусловленным этим обстоятельством увеличением протяженности эффективно эмитирующего участка катода.

Заключение

Подытоживая проведенные исследования, укажем важнейшие результаты работы:

- экспериментально исследована полевая эмиссия композитных катодов, построенных на основе материалов с сильно различающимися работами выходов, а также химически однородного гексаборид-лантанового катода;
- предложено объяснение низких порогов полевой эмиссии исследованных композитных катодов с учетом действия полей пятен;
- рассчитаны распределения полей, траектории электронов и плотность токов эмиссии с учетом полей пятен;

Авторы благодарны С.К. Гордееву и С.Б. Корчагиной (ЦНИИМ) за представленные композитные катоды, а также С.С. Орданьяну (СПБГТИ) за представленный гексаборид-лантановый катод.

Данная работа была поддержана грантом РФФИ № 08-02-00332.

Список литературы

- [1] Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд-во МФТИ, 2001. 288 с.
- [2] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 3. С. 17–54.
- [3] Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев: Наук. думка, 1981. 339 с.
- [4] Baskin L.M., Fursey G.N. // Proc. 13th ISDEIV. Paris, 1988. Pt 1. P. 31.
- [5] Баскин Л.М., Нейттанмяки П., Пламеневский Б.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 12. С. 86–89.
- [6] Архипов А.В., Мишин М.В., Соминский Г.Г., Парыгин И.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 10. С. 104–110.
- [7] Arkhipov A.V., Mishin M.V., Kuzmichev A.V. // Book of Abstracts of the 9th Biennial Int. Workshop „Fullerenes and Atomic Clusters“. St. Petersburg, Russia. 2009. P. 42.