

УДК 537.5

ПОЛЕВЫЕ ЭМИТТЕРЫ НОВОГО ТИПА ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Г. Г. Соминский^{1*}, В. Е. Сезонов¹, Е. П. Тарадаев¹, Т. А. Тумарева¹, Ю. М. Задиранов²,
С. Ю. Корнишин³, А. Н. Степанова⁴

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, г. Санкт-Петербург;

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург;

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

⁴ Институт кристаллографии РАН, г. Москва, Россия

Описаны разработанные в Санкт-Петербургском политехническом университете им. Петра Великого многоэлектронные полевые эмиттеры с защитными покрытиями, обеспечивающими их долговременную работу при больших токах в условиях технического вакуума, а также многослойные эмиттеры нового типа, приготовленные из приведённых в контакт нанослоёв материалов с разной работой выхода. Продемонстрирована возможность использования разработанных эмиттеров в высоковольтных электронных приборах.

ВВЕДЕНИЕ

Полевые эмиттеры привлекательны для использования во многих электронных устройствах. Однако широкому применению полевых эмиттеров препятствует их невысокая долговечность при больших токах в условиях технического вакуума. В последние годы интерес к полевым эмиттерам существенно возрос в связи с созданием гиротронов и других высоковольтных сверхвысокочастотных приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Миниатюрные «холодные» полевые эмиттеры не требуют нагрева и больше подходят для коротковолновых сверхвысокочастотных устройств, чем термокатоды. Однако трудности использования полевых эмиттеров в таких приборах усугубляются тем, что при их эксплуатации, наряду с высокой долговечностью, должны быть обеспечены одновременно большой ток эмиссии, превышающий пороговое значение порядка или более $20 \div 30$ мА для пуска приборов, а также плотность тока эмиссии свыше $100 \div 300$ мА/см² для облегчения компрессии электронных потоков, которые в таких приборах должны иметь малое сечение.

Основными причинами выхода из строя полевых эмиттеров в высоковольтных электронных устройствах, работающих в техническом вакууме, являются распыление их поверхности под действием бомбардировки ионами остаточного газа, а также разрушение эмиттеров из-за перегрева эмиттирующих электроны структур при протекании больших токов и/или под действием пондеромоторных сил. В настоящее время ведётся поиск путей обеспечения высокой долговечности полевых эмиттеров при их эксплуатации в высоковольтных электронных устройствах, работающих в техническом вакууме.

Возможны разные способы уменьшения вредного воздействия ионной бомбардировки. Изготовление катодов из материалов, стойких к последней, может повысить их долговечность. Однако выбор материалов, пригодных для изготовления полевых эмиттеров, не очень широк, а коэффициенты их ионного распыления отличаются не очень сильно (см., например, работу [1]).

* sominski@rphf.spbstu.ru

Предпринимались попытки уменьшить интенсивность ионной бомбардировки полевых эмиттеров с помощью специально сконструированных электронно-оптических систем, препятствующих попаданию ионов на катод. Например, в статье [2] исследована работа лампы бегущей волны с полевым эмиссионным катодом. Её авторами опробована электронная пушка, в которой для формирования электронного пучка применена система электростатических линз. В приборе с такой пушкой, установив потенциал удалённого от катода электрода выше потенциала входа в канал транспортировки пучка, можно защитить катодную систему от потока ионов из этого канала, образованных вследствие электронного удара по частицам остаточного газа. Однако при этом не исключалась бомбардировка катода быстрыми ионами, возникшими в самой пушке.

Более привлекательным кажется способ предотвращения ионной бомбардировки полевых эмиттеров, предложенный в работах [3, 4]. Авторами этих статей разработана катодная система нового типа, состоящая из многослойных ячеек с тонкими дисковыми эмиттерами из углерода. Как следует из выполненных там расчётов, распределение электрического поля в катодной системе исключает попадание на эмиттер ионов, возникших в сформированном пушкой электронном пучке. Описанные в данных работах катодные системы пока недостаточно исследованы экспериментально, во всяком случае, при большой энергии электронов. Если удастся экспериментально подтвердить выводы расчётов при высоком напряжении и при протекании больших токов, системы такого типа могут оказаться весьма перспективными, несмотря на высокую сложность технологии их изготовления.

Принципиально другой путь борьбы с разрушающим действием ионной бомбардировки был выбран в работах [5–7]. Их авторы разработали и использовали для решения этой проблемы специальные защитные покрытия катодов. В выполненных ими исследованиях острых полевых эмиттеров из вольфрама было показано, что нанесение на поверхность острия покрытия из молекул фуллерена C_{60} с толщиной $2 \div 4$ монослоя позволяет практически исключить его разрушение под действием ионной бомбардировки при эксплуатации катода в техническом вакууме при давлении около $10^{-8} \div 10^{-6}$ торр.

Фуллереновые покрытия характеризуются большой работой выхода (около $5,3 \div 5,4$ эВ). Для получения интенсивной полевой эмиссии при умеренном рабочем напряжении на поверхности покрытий в результате их полевой и температурной обработки формируются распределённые структуры выступов, усиливающих электрическое поле. Дополнительное снижение рабочего напряжения достигается в результате активирования фуллереновых покрытий потоком ионов калия. Обработка покрытия медленными ионами калия с энергиями около $40 \div 100$ эВ ведёт к снижению его работы выхода из-за образования в покрытии металлофуллеренов типа эндоэдралов $C_{60}@K$ и/или экзоэдралов $K@C_{60}$.

Ионная бомбардировка практически не приводит к разложению тяжёлых молекул фуллерена и к их десорбции с поверхности эмиттера. Быстрые ионы, падающие на катод, отдают большую часть своей энергии в подложке, хотя и разрушают часть существующих на фуллереновом покрытии выступов. Однако «освободившиеся» из разрушенных выступов поляризованные молекулы фуллеренов или металлофуллеренов, перемещаясь под действием неоднородного электрического поля, захватываются соседними выступами или создают новые центры повышенной эмиссии. Такой процесс воспроизведения центров повышенной эмиссии обуславливает устойчивость фуллереновых покрытий к ионной бомбардировке и выгодно отличает их от покрытий другого типа, которые разрушаются под действием ионной бомбардировки.

В последние годы в Санкт-Петербургском политехническом университете было разработано несколько типов полевых эмиттеров [8–10], которые могут быть перспективны для использования в высоковольтных электронных приборах. В разделах 1 и 2 данной статьи описаны многоострийные эмиттеры с упорядоченной структурой [8, 9], которые, благодаря использованным защитным

покрытиям, могут долговременно работать в высоковольтных электронных приборах в условиях интенсивной ионной бомбардировки. В разделе 3 описан разработанный нами многослойный эмиттер нового типа [10], также пригодный для эксплуатации в высоковольтных электронных приборах.

1. МНОГООСТРИЙНЫЕ КАТОДЫ С ДВУХСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Технология создания упорядоченных многоострийных систем из кремния хорошо отработана уже довольно давно (см., например, работу [11]). Применение таких систем в качестве эмиттеров затруднено не только потому, что они неустойчивы к ионной бомбардировке, но и по той причине, что кремниевые острия имеют, как правило, малую проводимость. Кроме того, острийные кремниевые эмиттеры недостаточно прочны и разрушаются под действием пондеромоторных сил уже при умеренных значениях электрического поля и тока эмиссии. Использование острийных полупроводниковых полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме (при давлениях $10^{-7} \div 10^{-8}$ торр), становится возможным, если одновременно повысить их проводимость и прочность, а также устойчивость к воздействию ионной бомбардировки.

Очевидно, что проводимость плохо проводящей поверхности кремниевого острия может быть повышена, если на неё нанести даже тонкий (с толщиной около 4 нм) слой металла (см., например, работу [12]). Создание достаточно толстого слоя металла на поверхности острия может увеличить и его прочность. Однако металлизация не способна длительное время защищать эмиттер от разрушающего действия ионной бомбардировки. Как уже было отмечено выше, для защиты от такого воздействия могут быть использованы разработанные авторами настоящей статьи фуллереновые покрытия [5–7].

Учитывая сказанное, было решено опробовать возможность одновременного решения всех основных проблем, препятствующих использованию многоострийных полупроводниковых катодов, с помощью двухслойных металл-фуллереновых покрытий [8]. Для повышения проводимости и прочности многоострийных эмиттеров использовались молибденовые покрытия. Для защиты от разрушающего действия ионной бомбардировки на поверхность слоя металла наносилось покрытие из молекул фуллерена C_{60} . Была исследована работа кремниевых многоострийных катодов с разным строением поверхности. Радиус R вершин острий и их высота h варьировались для разных образцов в пределах $5 \text{ нм} \leq R \leq 25 \text{ нм}$ и $15 \text{ мкм} \leq h \leq 40 \text{ мкм}$; расстояние l между остриями менялось в пределах $h \leq l \leq 2h$; толщина молибденового покрытия варьировалась приблизительно от $5 \div 6$ до $40 \div 50$ нм. Дальнейшее увеличение толщины молибденового покрытия вело к недопустимому росту характерного напряжения, необходимого для получения фиксированного тока полевой эмиссии. Толщина покрытий из молекул фуллерена C_{60} менялась от 2 до 4 монослоёв.

Измерения проводились в диодной схеме с расстоянием между катодом и анодом 1,2 см в непрерывном и в импульсном (длительность импульса 2 мкс, частота следования импульсов 100 Гц) режимах. Многоострийные структуры формировались на обращённой к аноду торцевой поверхности стержня из кремния с диаметром 1 мм. На участке этой поверхности с диаметром 0,5 мм создавалась структура из $200 \div 300$ острий.

Все покрытия наносились на многоострийные структуры непосредственно в экспериментальном приборе. Здесь же проводилось активирование фуллереновых покрытий потоком ионов калия с энергией 40 эВ. Строение поверхности полевых эмиттеров контролировалось с использованием растрового электронного микроскопа типа «Supra 45 WDXC» до установки в экспериментальный прибор и после окончания экспериментов.

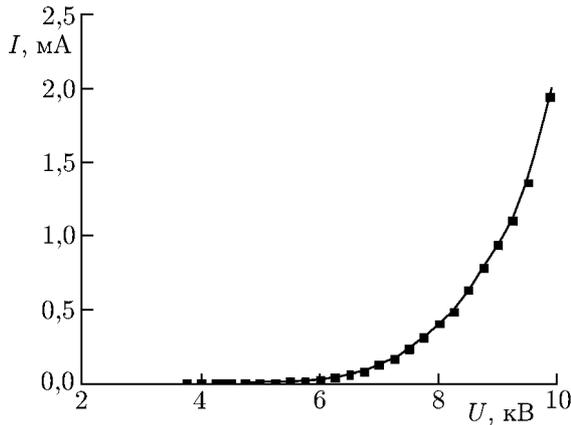


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика многоострийного катода с двухслойным металл-фуллереновым покрытием

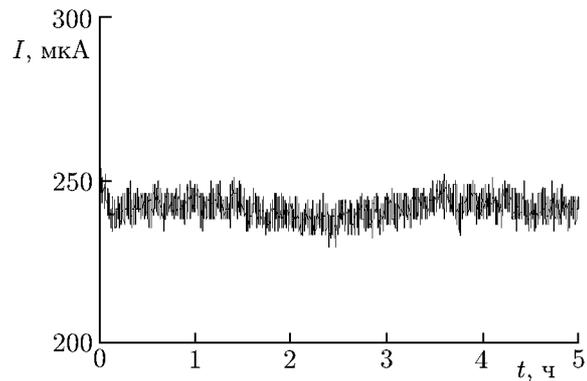


Рис. 2. Зависимость тока эмиссии от времени работы многоострийного катода с металл-фуллереновым покрытием. Измерения проводились в статическом режиме при напряжении $U = 6,3$ кВ

Непрерывная откачка газов и рабочего объёма экспериментального прибора проводилась с помощью магниторазрядного насоса. Прибор был оснащён системой напуска азота, которая позволяла оперативно менять давление в нём от минимального значения $10^{-10} \div 10^{-9}$ торр до 10^{-6} торр и обратно. Формирование покрытий проводилось, как правило, при давлении порядка 10^{-9} торр. Для получения информации о функционировании катодов в техническом вакууме измерение их эмиссионных характеристик выполнялось при повышенном давлении около 10^{-7} торр.

Типичные эмиссионные характеристики многоострийного (примерно 300 острий с радиусом вершины около 20 нм) полевого эмиттера из кремния р-типа с покрытием, включающим слой молибдена с толщиной около 30 нм и нанесённое поверх него активированное в результате бомбардировки ионами калия фуллереновое покрытие с толщиной 2 монослоя, показаны на рис. 1 и 2. Вольт-амперная характеристика $I(U)$, измеренная в импульсном режиме, приведена на рис. 1. Максимальные токи катода достигали примерно 2 мА. Средняя по поверхности катода плотность тока эмиссии при полном токе 2 мА была порядка 1 А/см^2 . Зависимость тока эмиссии от времени работы катода $I(t)$, приведённая на рис. 2, получена в статическом режиме при постоянном напряжении $U = 6,3$ кВ и давлении в экспериментальном приборе около 10^{-7} торр. В таких условиях ток эмиссии слабо менялся в течение 5 ч. Флуктуации тока не превышали приблизительно $2 \div 3\%$. При измерении характеристики $I(t)$ наибольшая продолжительность работы эмиттеров в течение одного дня не превышала $5 \div 7$ ч. Однако высокую долговечность созданных острийных полевых эмиттеров при эксплуатации в техническом вакууме подтверждают многократные длительные измерения характеристики $I(t)$ данного катода, выполненные в разные дни.

Полученный в статическом режиме ток эмиссии 240 мкА соответствует чрезвычайно большим значениям плотности тока около $10^3 \div 10^4 \text{ А/см}^2$ с каждого из острий полевого эмиттера и примерно значению $1,2 \cdot 10^{-1} \text{ А/см}^2$ средней по поверхности катода плотности тока эмиссии. Полученные данные о работе многоострийных катодов с двухслойными покрытиями показывают, что эмиттеры такого типа с площадью эмитирующей поверхности порядка или более $(2 \div 3) \cdot 10^{-1} \text{ см}^2$ могут быть использованы в высоковольтных сверхвысокочастотных приборах, т. к. они способны обеспечить их долговечную работу при токах более 20 мА.

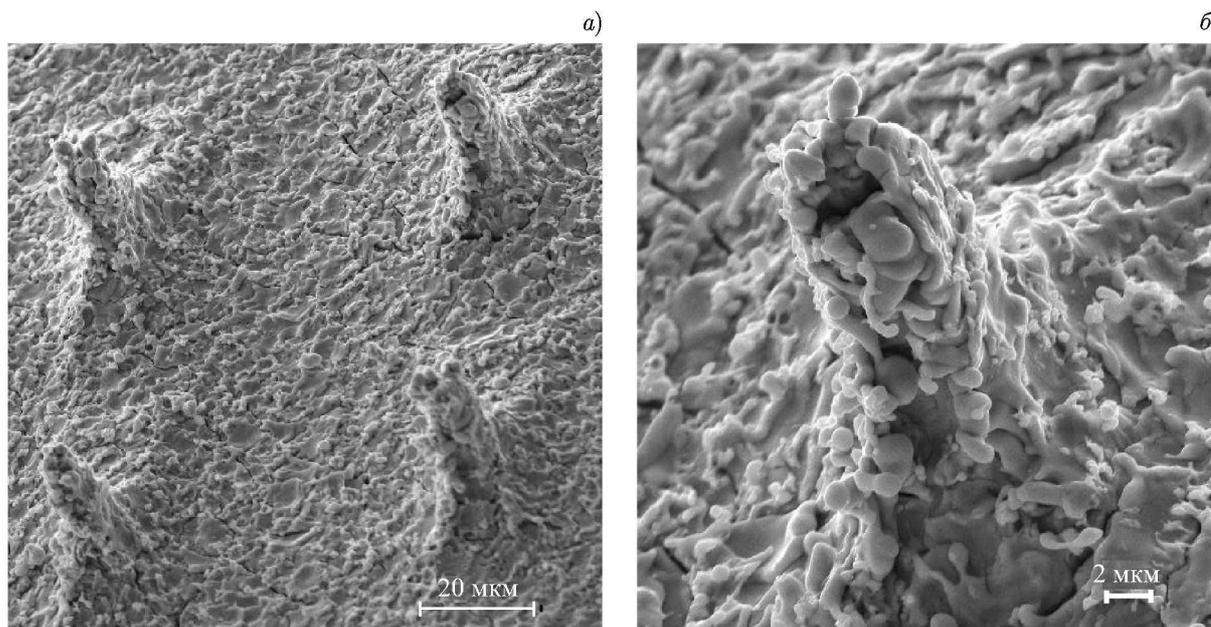


Рис. 3. Изображение участка многоострийной структуры, полученной в результате электроэрозионной обработки молибдена (а). Увеличенное изображение одного из острий (б)

2. ПРОСТЫЕ В ИЗГОТОВЛЕНИИ МНОГООСТРИЙНЫЕ ЭМИТТЕРЫ ИЗ МОЛИБДЕНА С ФУЛЛЕРЕНОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

В основе описанных в предыдущем разделе катодных систем лежат многоострийные кремниевые структуры. Технология создания кремниевых катодов с двухслойными покрытиями не очень сложна. Однако для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик таких катодов требуется покрытие кремниевой структуры слоем молибдена. Нами была опробована возможность создания многоострийных катодов из молибдена с использованием достаточно простой электроэрозионной обработки.

Многоострийные структуры изготавливались в Институте прикладной физики РАН с помощью электроэрозионной обработки торцевой поверхности стержней квадратного сечения с размером 1×1 мм из молибдена марки МЧВП. Для проведения такой обработки использовался стандартный отечественный станок «Арта-151». Строение поверхности катодов контролировалось с помощью растрового электронного микроскопа. Вид участка одной из созданных структур, полученный с помощью этого микроскопа, показан на рис. 3а. Исследованные структуры включали около 200 острий. Острия располагались на расстоянии около 70 мкм друг от друга. Их высота в разных структурах варьировалась приблизительно от 20 до 30 мкм. Вершины острий имели сечения с размером около 5×5 мкм. На рис. 3б показано увеличенное изображение одного из острий. Регистрация изображений на рис. 3 проводилась под углом 45° к нормали к торцевой поверхности катодного стержня. Полученные данные показывают, что при использовании электроэрозионной обработки на поверхности катода, включая торцевую поверхность острий, формируется неупорядоченная система выступов, характерный размер которых существенно меньше размеров сечений вершин острий.

Исследование характеристик созданных эмиттеров выполнено в той же диодной схеме, в которой изучалась работа многоострийных кремниевых катодов с металл-фуллереновыми покрытиями. Расстояние между торцом катода и анодом составляло 1,2 см. Перед измерением эмиссионных

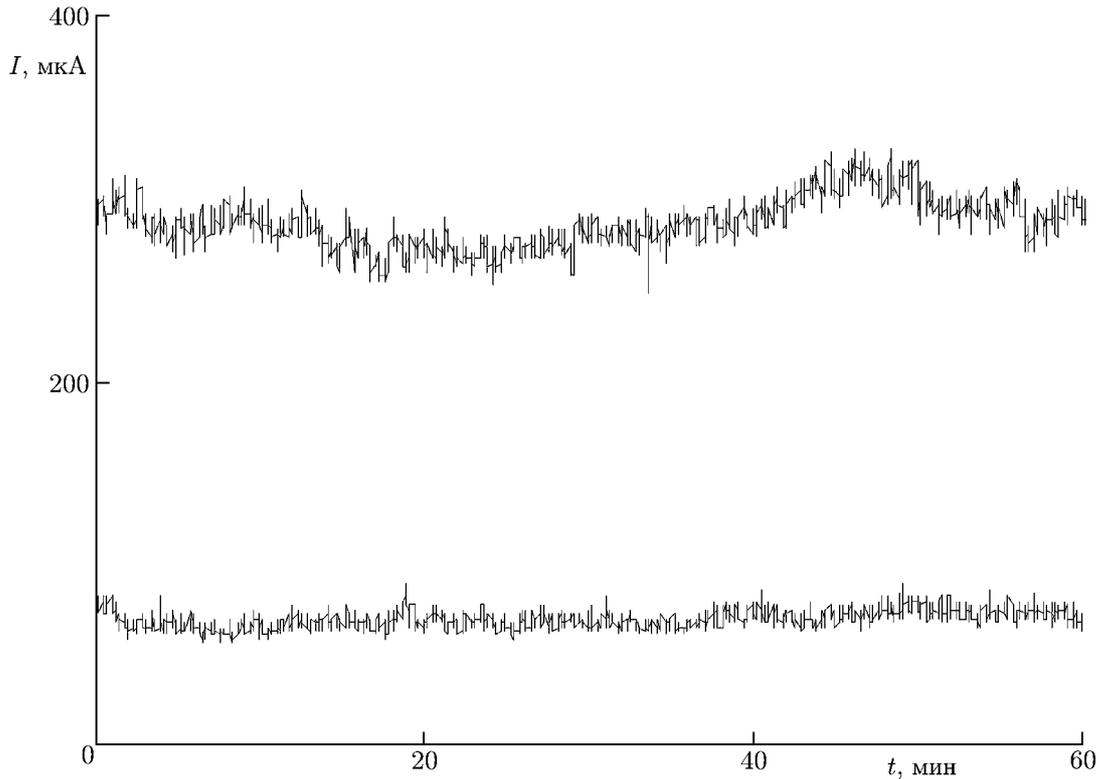


Рис. 4. Зависимости $I(t)$ для молибденового катода, измеренные при напряжениях 12,8 кВ (нижняя кривая) и 16,5 кВ (верхняя кривая)

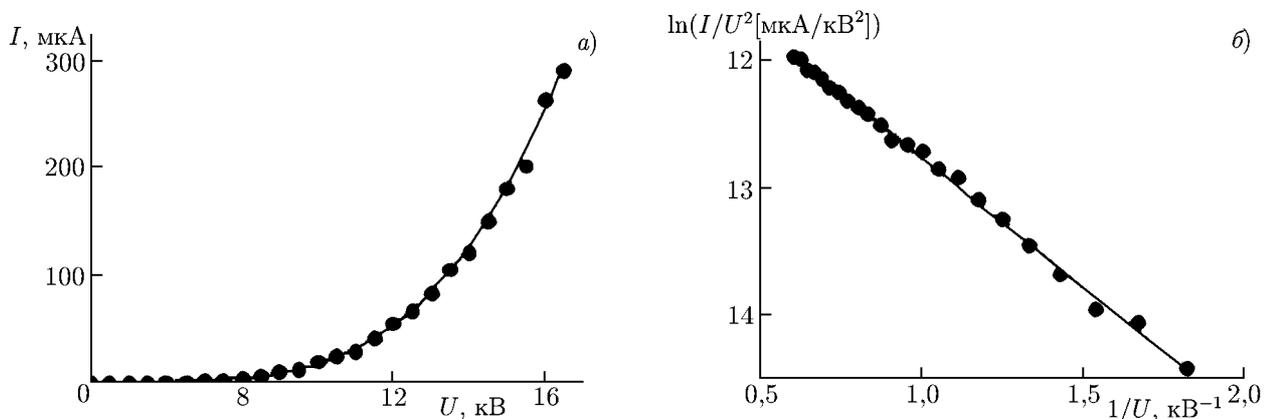


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика многоострийного молибденового катода с активированным фуллереновым покрытием (а) и соответствующая характеристика Фаулера—Нордгейма (б)

характеристик проводилось удаление газа из катодов путём их прогрева при давлениях не более 10^{-8} торр до температуры около 600°C . Эмиссионные характеристики катодов измерялись при повышенном давлении около 10^{-7} торр. При этом измерялись эмиссионные характеристики катодов без защитного покрытия и с покрытием из молекул фуллерена C_{60} с толщиной 2 монослоя.

Как показали проведённые измерения, для катодов без защитного покрытия характерно заметное уменьшение тока эмиссии (порядка 10% в час). Нанесение на поверхность молибденового эмиттера фуллеренового покрытия вело к росту напряжения, необходимого для обеспечения

фиксированного тока эмиссии, примерно на 5%. Однако в результате активирования покрытия потоком ионов калия с энергией 40 эВ удавалось уменьшить рабочее напряжение примерно на 10%. На рис. 4 приведены типичные зависимости тока эмиссии от времени работы молибденового катода с активированным фуллереновым покрытием, измеренные при напряжениях 12,8 и 16,5 кВ. Эмиттеры с активированным фуллереновым покрытием достаточно стабильно работали в техническом вакууме. В исследованных режимах были получены средние по поверхности катодов плотности тока эмиссии приблизительно до 30 мА/см².

Вольт-амперная характеристика $I(U)$ молибденового эмиттера с активированным фуллереновым покрытием, а также соответствующая характеристика Фаулера–Нордгейма приведены на рис. 5. Из наклона характеристики Фаулера–Нордгейма следует, что средний фактор усиления поля для исследованной многоострийной структуры имеет величину порядка 10^4 . Столь большое значение этого коэффициента, обусловленное усилением поля на выступах полученной структуры, позволяет получать ток порядка 300 мкА при умеренном напряжении около 16 кВ.

Таким образом, выполненные измерения показывают, что созданные многоострийные полевые эмиттеры из молибдена с защитным активированным фуллереновым покрытием устойчивы к ионной бомбардировке и перспективны для получения больших эмиссионных токов в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме.

3. МНОГОСЛОЙНЫЕ ЭМИТТЕРЫ НОВОГО ТИПА

Одной из трудноразрешимых проблем при создании любых автоэммиттеров является получение у их поверхности электрического поля с величиной порядка или более $2 \cdot 10^7$ В/см при умеренном напряжении. Нами была исследована возможность использования в этих целях полей у контакта материалов с разной работой выхода $e\varphi$ [13]. Впервые возможность получения автоэмиссии с использованием контактной разности потенциалов была выявлена нами при исследовании композитов, приготовленных из контрастных по работе выхода гексаборида лантана ($e\varphi = 3,5$ эВ) и углерода ($e\varphi = 4,7$ эВ) [14]. Далее в экспериментах, где использовались контакты слоёв индия ($e\varphi = 3,8$ эВ) и фуллеренов ($e\varphi = 5,3 \div 5,4$ эВ), были получены прямые доказательства существования этого неизвестного ранее явления (патент на изобретение [15]).

Очевидно, что для получения интенсивной полевой эмиссии с использованием контактных полей у границы материалов с разной работой выхода должны быть созданы системы, где можно собирать ток с большого количества контактов. Такой системой может служить набор пар слоёв материалов с разной работой выхода.

С использованием программы «Comsol» были проведены расчёты, необходимые для оптимизации слоистой системы. Использована простейшая модель системы, показанная на рис. 6. На нём величинами $e\varphi_{\max}$ и $e\varphi_{\min}$ обозначены слои с большей и меньшей работой выхода соответственно. Поток электронов на анод формируется слоями с большей работой выхода. На рис. 6 кривыми со стрелками показаны типичные траектории электронов, вылетающих с поверхности слоя с боль-

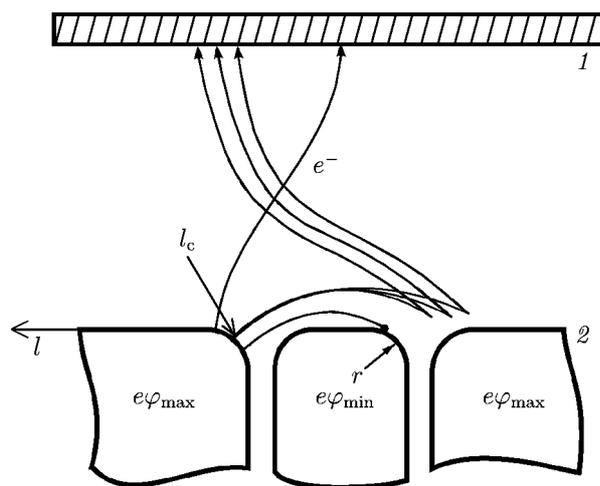


Рис. 6. Модель слоистого полевого эмиттера: 1 — анод, 2 — катод, l_c — положение критической точки на эмиттирующей поверхности слоя с большей работой выхода

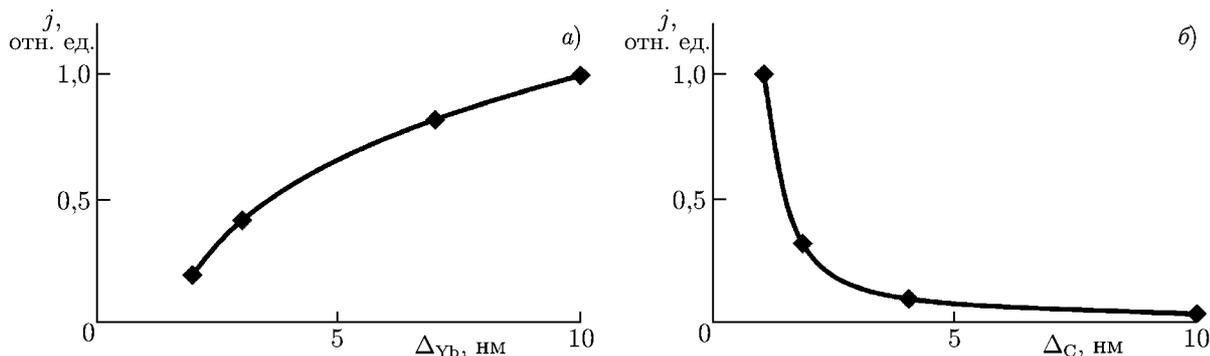


Рис. 7. Рассчитанные зависимости анодного тока от толщины слоёв иттербия (а) и углерода (б)

шей работой выхода, а также обозначено положение критической точки $l = l_c$ на эмитирующей поверхности слоя с большей работой выхода. (Здесь l — ось криволинейной системы координат, направленная по поверхности острия.) Анода достигают электроны, эмитированные с такого слоя в области $l \geq l_c$. Расчёты проводились в широком интервале изменения толщин слоёв и значений их работ выхода. Радиусы закруглений r всех приведённых в контакт слоёв и расстояние между слоями при моделировании варьировались от 0,1 до 0,9 нм. Были рассчитаны электрические поля, траектории электронов, распределения плотности тока полевой эмиссии по поверхности эмиттера и токи, переносимые на анод. В исследованных режимах величина электрического поля контактной разности потенциалов на участках катода, откуда эмитированные электроны попадают на анод, достигала значений порядка $(4 \div 5) \cdot 10^7$ В/см. Величина электрического поля у торцевой поверхности катода, определяемая «внешней» разностью потенциалов, даже с учётом усиления не превышала примерно $(4 \div 5) \cdot 10^6$ В/см и не могла обеспечить измеренные в эксперименте токи полевой эмиссии.

На рис. 7 показаны рассчитанные зависимости анодного тока j от толщины приведённых в контакт слоёв иттербия и углерода, работы выхода для которых составляют 3,1 и 4,7 эВ соответственно. Величины Δ_{Yb} и Δ_C обозначают толщины слоёв иттербия и углерода соответственно. Расчёты свидетельствуют, что для получения больших токов слой углерода должны иметь толщину $1 \div 2$ нм, а слой иттербия должны быть существенно большей толщины (около 5 нм).

Экспериментально были изучены характеристики слоистых катодных систем, включающих 10, 20 и 40 пар слоёв Yb—C, и таких же систем из пар слоёв Yb—W. Слои иттербия имели толщину 5 нм, а слои углерода и вольфрама — одинаковую толщину 2 нм. Толщина 40 пар слоёв равнялась примерно 0,28 мкм. Все эмиттеры имели ширину (т. е. размер вдоль торцевой эмитирующей поверхности) 2 мм. Высота исследованных катодов (т. е. их размер в направлении, перпендикулярном торцевой эмитирующей поверхности) менялась для разных образцов в пределах $3 \text{ мм} \leq h \leq 5 \text{ мм}$.

Измерение характеристик катодов проводилось в импульсном режиме (длительность импульса 2 мкс, частота следования импульсов 200 Гц) в триодной системе катод—управляющий электрод (сетка)—коллектор. Управляющий электрод был установлен на расстоянии 1 мм от катода. Используемая в экспериментах сетка имела прозрачность около 75%. Её ячейки имели размеры около 100×100 мкм, которые были много меньше расстояния между катодом и сеткой.

Для отбора тока эмиссии с катода на него подавалось отрицательное напряжение относительно управляющего электрода. Регистрировался ток электронов, проникших сквозь отверстия сетки на заземлённый через измерительный прибор коллектор. Сетка находилась под отрицательным потенциалом 100 В относительно земли, что позволяло минимизировать уход вторичных электронов с коллектора.

На рис. 8 показаны измеренные вольт-амперные характеристики для катодов, включающих разное число N пар слоёв Yb—C. Вольт-амперные характеристики катодов, изготовленных из пар слоёв Yb—W, подобны изображённым на рис. 8. Средняя по поверхности плотность тока эмиссии катодов из сорока пар слоёв достигала значений порядка 10 А/см^2 . Полный ток обычно не превышал предельной величины $50 \div 100 \text{ мкА}$ и был ограничен разрушением эмиссионной системы при больших отбираемых токах.

Выполненные измерения в импульсном режиме пока не позволяют надёжно определить долговечность многослойных катодов. Однако, учитывая их большую высоту h , можно надеяться, что они будут стабильно работать даже в условиях, когда их поверхность распыляется под действием ионной бомбардировки.

Существенное увеличение тока полевой эмиссии со слоистых катодов может быть достигнуто при увеличении их ширины и/или в результате сложения токов с набора одинаковых катодов. Технология создания слоистых катодов достаточно проста. Все слоистые катоды, включающие большое число пар слоёв, изготавливались методом магнетронного напыления. Их ширина может быть увеличена во много раз.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование разработанных авторами защитных покрытий позволяет с помощью сравнительно простых технологий создавать эффективные и долговечные многоострийные катоды для высоковольтных электронных устройств.

Созданные многослойные катоды нового типа обладают небольшими размерами и обеспечивают очень высокие плотности токов. Такие катоды могут оказаться перспективными для использования в миниатюрных электронных приборах. Однако необходима проверка возможности их долговременной эксплуатации в статическом режиме.

Часть данной работы выполнена по госзаданию Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твёрдых тел / Под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1984. 336 с.
2. Whaley D. R., Gannon B. M., Smith C. R., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28, No. 3. P. 727.
3. Абанышин Н. П., Горфинкель Б. И., Морев С. П. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 9. С. 86.
4. Гуляев Ю. В., Абанышин Н. П., Горфинкель Б. И. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, № 11. С. 63.

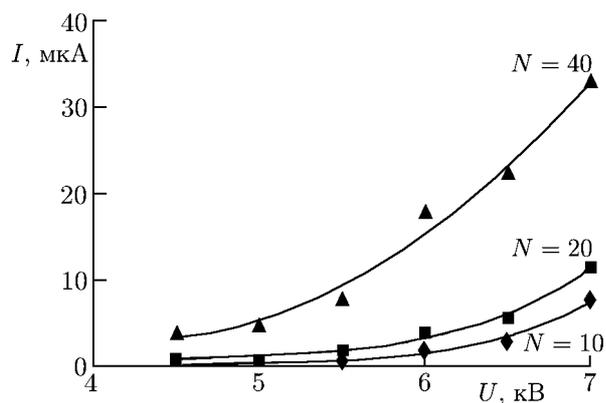


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики катодов с разным числом пар слоёв Yb—C. Числа возле кривых соответствуют числам этих слоёв

5. Тумарева Т. А., Соминский Г. Г., Светлов И. А., Морозов А. Н. // Журн. техн. физ. 2008. Т. 78, № 11. С. 119.
6. Тумарева Т. А., Соминский Г. Г. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 3. С. 17.
7. Тумарева Т. А., Соминский Г. Г. // Журн. техн. физ. 2013. Т. 83, № 7. С. 121.
8. Соминский Г. Г., Тумарева Т. А., Тарадаев Е. П. и др. // Журн. техн. физ. 2015. Т. 85, № 1. С. 138.
9. Соминский Г. Г., Тарадаев Е. П., Тумарева Т. А. и др. // Журн. техн. физ. 2015. Т. 85 (в печати).
10. Sezonov V. E., Sominski G. G., Zadiranov Yu. M. // Proc. 10th Int. Vacuum Electron Sources Conf. and 2nd Int. Conf. on Emission Electronics (St. Petersburg, Russia, June 30–July 4, 2014). P. 228.
11. Гиваргизов Е. И. // Кристаллография. 2006. Т. 51, № 5. С. 947.
12. Karabutov A. V., V. I. Kopov, S. M. Pimenov, et al. // J. De Physique IV. 1996. P. C5-113.
13. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. 564 с.
14. Соминский Г. Г., Сезонов В. Е., Саксеев Д. А., Тумарева Т. А. // Журн. техн. физ. 2011. Т. 81, № 6. С. 104.
15. Пат. № 118119 РФ. Полевой эмиттер / Соминский Г. Г., Сезонов В. Е., Тумарева Т. А., Тарадаев Е. П. Заявл. 06.02.2012; Оpubл. 10.07.2012.

Поступила в редакцию 3 апреля 2015 г.; принята в печать 14 мая 2015 г.

INNOVATIVE FIELD EMITTERS FOR HIGH-VOLTAGE ELECTRONIC DEVICES

G. G. Sominski, V. E. Sezonov, E. P. Taradaev, T. A. Tumareva, Yu. M. Zadiranov, S. Yu. Kornishin, and A. N. Stepanova

We describe multitip field emitters with protective coatings, which were developed in Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. The coatings ensure long-term operation of the emitters under high currents and technical vacuum. Innovative multi-layer emitters composed of contacting nanolayers of materials with different work functions are presented as well. The possibility to use the developed emitters in high-voltage electronic devices is demonstrated.