

УДК 537.533.2

ПОЛЕВЫЕ ЭМИТТЕРЫ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МИНИАТЮРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ, РАБОТАЮЩИХ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВАКУУМЕ

Г. Г. Соминский^{1*}, В. Е. Сезонов¹, Е. П. Тарадаев¹, Т. А. Тумарева¹, С. П. Тарадаев¹,
А. А. Рукавицына¹, М. Е. Гиваргизов², А. Н. Степанова²

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

² Институт кристаллографии им. А. А. Шубникова РАН, г. Москва, Россия

Представлены результаты разработки и исследования полевых эмиттеров для высоковольтных электронных устройств, работающих в техническом вакууме. Основное внимание уделено оценке возможностей использования распределённых полевых эмиттеров в условиях интенсивной ионной бомбардировки.

ВВЕДЕНИЕ

Полевые эмиттеры привлекательны для использования в системах формирования электронных потоков для многих устройств вакуумной электроники. Преимущества полевых эмиттеров перед термокатодами очевидны: они не требуют накала и безынерционны. До недавнего времени полевые эмиттеры использовались преимущественно в сверхвысоковакуумных устройствах, например в устройствах аналитического приборостроения, в условиях, когда они должны обеспечивать достаточно малые токи порядка $10^{-9} \div 10^{-5}$ А. Между тем, существуют и привлекают к себе всё больший интерес миниатюрные, но высоковольтные электронные приборы, где трудно применять накаливаемые термокатоды. К таковым можно отнести, например, электронно-лучевые сверхвысокочастотные (СВЧ) устройства коротковолнового миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, а также портативные и мобильные источники рентгеновского излучения. В указанных приложениях требуются электронные токи порядка или более нескольких десятков миллиампер, причём при достаточно больших плотностях порядка или более $100 \div 200$ мА/см².

Применению полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах препятствуют не только трудности получения достаточно больших токов, но также и невысокая их долговечность. Существующие полевые эмиттеры, как правило, не могут стабильно работать в условиях технического вакуума (давления $10^{-7} \div 10^{-8}$ Торр). Основные механизмы их разрушения связаны с интенсивной бомбардировкой катода ионами остаточных газов, с воздействием больших токов в сильных электрических полях пондеромоторных сил и/или с тепловыми эффектами при отборе больших токов эмиссии. Использование в качестве полевых эмиттеров распределённых систем, например многоострийных или лезвийных, позволяет снизить токовую нагрузку на отдельный эмиссионный центр и минимизировать влияние пондеромоторных сил, а также тепловые эффекты. Однако действие ионной бомбардировки принципиально ограничивает возможности использования полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах.

Поиск способов создания распределённых полевых эмиттеров, пригодных для формирования интенсивных электронных потоков, велся во многих лабораториях. Основные усилия были направлены на нахождение конструктивных и технологических решений, а также на выявление материалов, обеспечивающих получение достаточно больших токов полевой эмиссии. Наиболее

* sominski@rphf.spbstu.ru

отработаны к настоящему времени многоострийные системы Спиндта [1, 2] с остриями из молибдена. При малых (субмикронных) размерах вершины острий и малом расстоянии между острием и управляющим электродом интенсивная полевая эмиссия достигается в таких системах при напряжениях на управляющем электроде $U_g \sim 100 \div 300$ В. С помощью катодных систем спиндтовского типа удавалось получать токи ориентировочно до 100 мА при средней по поверхности эмиттера плотности тока эмиссии свыше 10 А/см^2 [2]. Максимальная энергия бомбардирующих острия ионов, определяется разностью потенциалов между острийным катодом и управляющим электродом и равна eU_g (e — элементарный заряд). Столь медленные ионы при бомбардировке катода практически не распыляют его поверхность. Катоды Спиндта, используемые для получения низкоэнергичных электронных потоков, способны долговременно работать при повышенных давлениях остаточного газа. Однако в высоковольтных приборах при использовании спиндтовских систем в качестве источника эмиссии необходимо дополнительно ускорить исходящие из системы электроны до необходимой существенно большей энергии eU . В таком случае появляются попадающие на полевой эмиттер ионы с энергиями вплоть до eU , способные распылять поверхность катода. В таких условиях не очевидна возможность долговременной эксплуатации эмиттера.

В поисках наилучших материалов для полевых эмиттеров исследовались катоды не только из разных металлов. Большие усилия были направлены на создание распределённых катодных систем из углеродных нанотрубок (УНТ) (см., например, [3, 4]) и стеклогуглерода [5], а также из различных полупроводниковых материалов [4, 6–8].

Углеродные нанотрубки уже давно привлекают внимание исследователей, т. к. отличаются высокой прочностью, большим аспектным отношением, обладают высокой тепло- и электропроводимостью и химической инертностью. Однако при создании структур из УНТ приходится решать сложные задачи, связанные с обеспечением высокой однородности тока эмиссии, с необходимостью прочного механического соединения, а также хорошего электрического и теплового контакта [3, 4, 6] УНТ с подложкой. Тем не менее, к настоящему времени именно на основе УНТ созданы наиболее эффективные полевые эмиттеры [9–12]. Лучшие образцы катодов из УНТ, например так называемые «сэндвич-структуры» [9], хотя и требуют при изготовлении использования сложной технологии, обеспечивают рекордные токи эмиссии до нескольких сотен миллиампер при плотностях до нескольких ампер с квадратного сантиметра.

Основные испытания подавляющего числа распределённых полевых эмиттеров, в том числе и УНТ, проводились в условиях, когда было минимизировано воздействие ионной бомбардировки на катод. В большинстве случаев измерения характеристик эмиттеров были выполнены при малых напряжениях и/или при пониженных токах эмиссии [9–11], в импульсном режиме с большой скважностью импульсов [12], при чрезвычайно низком давлении [11, 12]. Поэтому существующие к настоящему времени данные не позволяют определить, возможна ли эксплуатация катодов в высоковольтных приборах при отборе больших токов в условиях технического вакуума.

Делались попытки защитить полевые эмиттеры от ионной бомбардировки при помощи специальных электронно-оптических систем, препятствующих попаданию на их поверхность быстрых ионов из канала транспортировки электронного пучка (см., например, [2]). Однако при использовании такой защиты не исключалась бомбардировка катода быстрыми ионами, рождёнными в самой пушке. В последние годы были разработаны катодные системы нового типа (см., например, [13]), состоящие из многослойных ячеек с лезвийными эмиттерами из углерода. Распределение полей в таких ячейках препятствует попаданию на катод медленных ионов с энергиями ориентировочно до нескольких сотен электрон-вольт, возникших в самой ячейке. Однако пока отсутствуют данные о работе структур с лезвийными эмиттерами в высоковольтных устройствах, где возможна бомбардировка эмиттера ионами с существенно большей энергией.

Подытоживая, можно заключить, что пока не отработаны достаточно надёжные методы защиты полевых эмиттеров от разрушающего действия ионной бомбардировки с помощью каких-либо электронно-оптических систем.

1. ПОЛЕВЫЕ ЭМИТТЕРЫ С ЗАЩИТНЫМ ФУЛЛЕРЕНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Принципиально иной метод защиты острых полевых эмиттеров от разрушающего действия ионной бомбардировки был предложен и исследован в лаборатории Сильноточной и СВЧ электроники СПбПУ [14, 15]. Авторами [14, 15] было обнаружено, что тонкое ($2\div 4$ монослоя) покрытие из молекул фуллерена C_{60} эффективно защищает одноострийные вольфрамовые эмиттеры от разрушающего действия ионной бомбардировки и обеспечивает их длительную стабильную работу в высоковольтных режимах ($5\div 10$ кВ) в техническом вакууме (давления $10^{-7}\div 10^{-8}$ Торр).

Фуллереновые покрытия обладают большой работой выхода (около 5,3 эВ). Понизить работу выхода покрытия можно, нанося на его поверхность вещества с меньшей работой выхода. Исследования показали [16], что долговременного снижения работы выхода можно добиться, активируя фуллереновое покрытие потоком медленных ($40\div 100$ эВ) ионов калия. При таком способе активирования образуются металлофуллерены типа эндоэдралов ($K@C_{60}$) и/или экзоэдралов ($C_{60}@K$) [17], наличие которых в покрытии уменьшает работу выхода его поверхности. Максимальное снижение характерных напряжений при активировании потоком ионов достигало примерно 50 %.

Описанные методы создания и активирования защитных покрытий для одноострийных вольфрамовых эмиттеров достаточно просты и воспроизводимы. Однако такие катоды не могут, как правило, обеспечить токи полевой эмиссии свыше $100\div 200$ мкА. Поэтому представляет большой интерес рассмотрение возможности создания распределённых многоострийных катодов с защитными фуллереновыми покрытиями. Уже давно хорошо отработана технология создания упорядоченных многоострийных систем из кремния (см., например, [8]). Однако применение таких систем в качестве эмиттеров затруднено, причём не только потому, что они разрушаются под действием ионной бомбардировки, но также и по той причине, что кремниевые острия обычно имеют малую проводимость. Кроме того, кремниевые эмиттеры зачастую недостаточно прочны и разрушаются под действием пондеромоторных сил уже при умеренных значениях электрического поля и отбираемого тока эмиссии. Использование острийных кремниевых полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме, становится возможным, если одновременно повысить их проводимость и прочность, а также устойчивость к воздействию ионной бомбардировки.

Учитывая сказанное, было решено опробовать возможность одновременного решения всех основных проблем, препятствующих использованию многоострийных катодов из кремния, с помощью двухслойных металл-фуллереновых покрытий [18–20]. Для повышения проводимости и прочности многоострийных эмиттеров создавались 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 такими покрытиями. Катоды имели разную морфологию поверхности. Радиусы R вершины кремниевых острий и их высота h варьировались для разных образцов в пределах $5 \leq R \leq 15$ нм, $10 \leq h \leq 60$ мкм. Расстояние L между остриями менялось в пределах $0,25h \leq L \leq 2,00h$. Толщина молибденового покрытия варьировалась приблизительно от 5 до 20 нм. Толщина покрытий из молекул фуллерена C_{60} менялась от 2 до 10 монослоёв.

Наряду с экспериментальным исследованием многоострийных структур проводились расчёты, нацеленные на оптимизацию морфологии их поверхности. Они выполнены для диодной си-

стемы с бесконечно протяжёнными плоскими катодом и анодом, расположенными на расстоянии 1,5 мм друг от друга. Напряжение U между катодом и анодом диодной структуры менялось в расчётах в пределах от 1 до 20 кВ. Задавалась коническая форма острий с фиксированным диаметром основания 5 мкм. Для катодов с активированным металл-фуллереновым покрытием работа выхода острий задавалась в диапазоне от 4,0 до 4,7 эВ. Для неактивированных покрытий она принималась равной 5,3 эВ.

В заданной геометрии при разных значениях напряжения U численно решалось трёхмерное уравнение Лапласа с помощью метода конечных элементов с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics. На основании полученных данных о распределении потенциала определялось распределение электрического поля E у поверхности острий, а затем с помощью формулы Фаулера—Нордгейма рассчитывались распределение плотности тока полевой эмиссии с их поверхности и полный ток с каждого острия. Для получения полного тока с катода проводилось суммирование полного тока по всем остриям, с которых электроны попадают на коллектор.

Экспериментально были исследованы два типа многоострийных катодов: катоды малой площади (КМП) и катоды большой площади (КБП). Многоострийные структуры КМП формировались на обращённой к аноду торцевой поверхности стержня из кремния диаметром 1 мм и имели площадь 0,002 см². Катоды большой площади создавались на подложках из кремния с площадью от 0,1 до 1,0 см². Катоды малой площади включали в себя от 1 до 300 острий. Количество острий на поверхности КБП достигало приблизительно 10⁵.

Все покрытия наносились на многоострийные структуры непосредственно в экспериментальном приборе. Здесь же фуллереновые покрытия активировались потоком ионов калия с энергией 40 эВ. Экспериментальный прибор подвергался непрерывной откачке с помощью магнитно-разрядного насоса. Прибор был оснащён системой напуска азота. Напуск азота позволял оперативно менять давление в экспериментальном приборе от минимального давления порядка 10^{−10} ÷ 10^{−9} Торр до 10^{−6} Торр и обратно. Формирование покрытий проводилось, как правило, при давлениях порядка 10^{−9} Торр. Для получения информации о функционировании катодов в техническом вакууме измерение их эмиссионных характеристик проводилось при повышенных давлениях порядка 10^{−7} Торр.

Характеристики КМП экспериментально исследовались в полевом эмиссионном микроскопе-проекторе с расстоянием между катодом и анодом-коллектором 1,2 ÷ 1,5 см. Из-за «расфокусировки» электронного потока на пути от острийной структуры до коллектора плотность электронного тока на коллектор не превышала малой доли средней по поверхности плотности тока с катода (примерно 10^{−3} ÷ 10^{−4}). В связи с этим при исследовании КМП можно было определить возможности длительной эксплуатации катодов в статическом режиме при отборе достаточно больших плотностей тока с их поверхности, сведя к минимуму интенсивность электронной бомбардировки коллектора и тепловые эффекты на нём, а также десорбцию частиц с его поверхности.

Измерение эмиссионных характеристик КБП проводилось в диоде с расстоянием 1,5 мм между катодом и анодом. Плотность тока на коллекторе в этих измерениях слабо отличалась от плотности тока на катоде. Поэтому основные измерения характеристик КБП в статическом режиме проводились при токах эмиссии, не превышающих 1 мА. Измерения при больших токах выполнялись в импульсном режиме.

Максимальные токи в КМП с активированной потоком ионов калия структурой из 300 острий достигали примерно 2 мА. Средняя по поверхности катода плотность тока эмиссии при полном токе 2 мА была порядка 1 А/см².

Эксперименты с КМП подтвердили возможность защиты полевых эмиттеров с помощью металл-фуллереновых покрытий от разрушающего действия ионной бомбардировки. При измерении характеристик тока от времени $I(t)$, наибольший интервал работы эмиттеров в течение

одного дня не превышал $5\div 7$ часов. При токе 240 мкА в условиях технического вакуума флуктуации тока не превышали в течение всего этого интервала приблизительно $2\div 3$ %. Однако высокую долговечность созданных острийных полевых эмиттеров при эксплуатации в техническом вакууме подтверждают многократные длительные измерения характеристик $I(t)$ данного катода, выполненные в разные дни.

Полученный в статическом режиме ток эмиссии 240 мкА соответствует средней по поверхности катода плотности тока эмиссии $0,12 \text{ А/см}^2$. Полученные данные об эмиссионных характеристиках КМП с двухслойными покрытиями свидетельствуют, что эмиттеры такого типа могут стабильно работать при плотностях тока эмиссии, достаточных для некоторых типов коротковолновых (миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн) СВЧ приборов, например гиротронов, используемых для осуществления современных методов диагностики, в частности, для реализации востребованных на практике спектрометров высокого разрешения на основе ядерного магнитного резонанса с динамической поляризацией ядер.

В экспериментах с КМП были оценены максимальные значения тока эмиссии, который может выдержать кремниевое острие с двухслойным металл-фуллереновым покрытием. Было установлено, что типичное острие с покрытием, имеющим суммарный радиус вершины (с учётом толщины покрытия) $20\div 25$ нм, выдерживает отбор тока не более $5\div 6$ мкА.

Возможности получения больших токов были исследованы для катодов большой площади. Учитывая тот факт, что острия существующих кремниевых катодов выдерживают отбор токов I , не превышающих некоторое предельное значение I_{extrem} , при выборе оптимальной морфологии поверхности многоострийных катодов для высоковольтных приборов приходится принимать компромиссное решение, при котором, с одной стороны, на поверхности катода должно быть создано достаточно большое количество острий N , удовлетворяющих соотношению $N \geq I/I_{\text{extrem}}$, а с другой, — должна быть обеспечена работа электронного прибора при повышенном рабочем напряжении. Для принятия такого компромиссного решения необходимы данные о влиянии морфологии поверхности многоострийных катодов на отбор тока с их поверхности.

В расчётах [21] были получены данные о влиянии морфологии поверхности катодов на их эмиссионные характеристики. Из них следует, что в условиях, когда практически отсутствует взаимная экранировка острий (при расстоянии между остриями $L = 2h = 60$ мкм, h — высота острия), эмиттер с площадью $0,2 \text{ см}^2$ может обеспечить токи не более 50 мА. Большие токи могут быть получены с эмиттера той же площади, но с большим количеством острий на поверхности и при большем напряжении между катодом и анодом. Выбор соотношения высоты острий и расстояния между ними определяет допустимое значение напряжения U при эксплуатации катода. Проведённые расчёты свидетельствуют, что, например, при $U = 17$ кВ многоострийная структура с высотой острий 30 мкм при $L/h = 0,5$ может обеспечить токи полевой эмиссии около 0,8 А.

Уменьшить рабочие напряжения, необходимые для получения фиксированных значений токов, можно, если использовать активированные металл-фуллереновые покрытия. Согласно проведённым расчётам, при применении активированного покрытия удаётся снизить напряжение, необходимое для получения фиксированного значения тока эмиссии, до 1,5 раз.

Данные экспериментального исследования КБП удовлетворительно согласуются с результатами расчётов. Наилучшие эмиссионные характеристики были получены для структур с остриями высотой $h = 30$ мкм и радиусом вершины $R = 20\div 25$ нм, расположенными на расстоянии $L = h$, т. е. в условиях частичной взаимной экранировки острий. Была экспериментально исследована работа катодов с активированными и с неактивированными покрытиями. И те и другие стабильно функционировали в условиях технического вакуума. КБП площадью $0,25 \text{ см}^2$ с неактивированными покрытиями обеспечивали токи около 100 мА при плотности тока эмиссии приблизительно до $0,4\div 1,0 \text{ А/см}^2$. Типичная вольтамперная характеристика катода с площадью $0,25 \text{ см}^2$ с неакти-

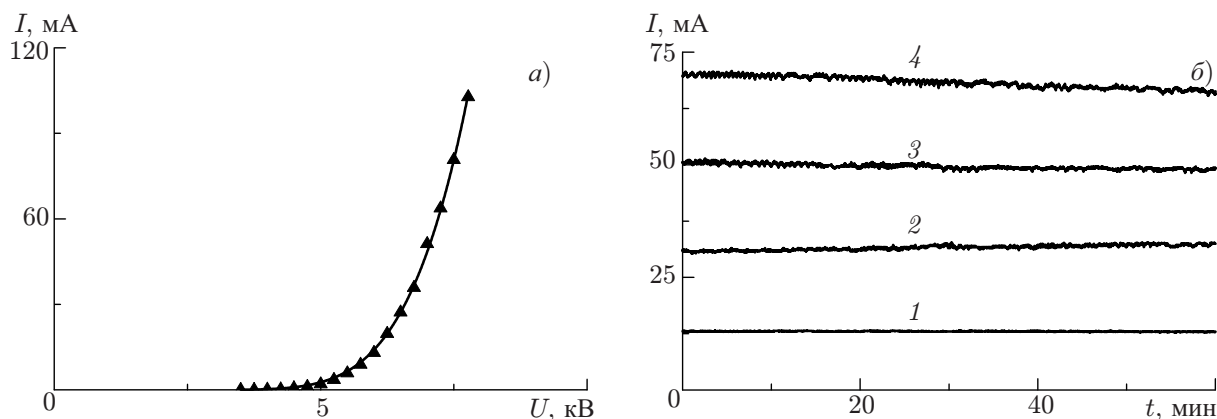


Рис. 1. Характеристики КБП с неактивированным покрытием: вольт-амперная характеристика (а) и зависимости эмиссионного тока от времени работы катода (б) при $U = 5,4$ кВ (кривая 1), 5,8 кВ (2), 6,1 кВ (3) и 6,8 кВ (4). Импульсный режим: длительность импульсов 1 мкс, частота их следования 50 Гц

вированным покрытием приведена на рис. 1а. На рис. 1б изображены зависимости эмиссионных токов от времени работы этого катода.

Максимальные токи катодов приблизительно такой же площади, но с активированным покрытием были существенно меньше и не превышали $40 \div 50$ мА. С нашей точки зрения, это связано с тем обстоятельством, что при активировании покрытия часть атомов калия, не захваченных молекулами фуллерена, проникает под фуллереновое покрытие и уменьшают его связь с подложкой.

Таким образом, суммируя результаты исследования многоострижных кремниевых катодов с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями, отметим главное.

1. Отработана достаточно простая в реализации технология создания металл- фуллереновых покрытий на поверхности многоострижных кремниевых структур.

2. С помощью расчётов выработаны критерии оптимизации морфологии поверхности структур.

3. В экспериментах продемонстрирована возможность стабильной работы моноострижных катодов с металл-фуллереновыми покрытиями в высоковольтных электронных приборах в условиях технического вакуума при давлении порядка 10^{-7} Торр.

4. С оптимизированных многоострижных катодов с площадью $0,2 \div 0,3$ см² с защитными металл-фуллереновыми покрытиями получены токи эмиссии до 100 мА, достаточные для обеспечения работы некоторых типов СВЧ устройств коротковолнового миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, а также миниатюрных источников рентгеновского излучения.

2. МНОГОСЛОЙНЫЕ КАТОДЫ

Для получения интенсивной полевой эмиссии необходимо создавать у поверхности твёрдого тела чрезвычайно большие электрические поля порядка или более $(2 \div 5) \cdot 10^7$ В/см. Обычно для получения таких полей при умеренных напряжениях на поверхности катодов формируют усиливающие поле выступы или структуры выступов. Формирование упорядоченной структуры выступов, обеспечивающих достаточное усиление поля, является сложной технологической задачей. К тому же, эти выступы в первую очередь разрушаются под действием ионной бомбардировки. Между тем, известно (см., например, [22]), что большие электрические поля существуют у контакта материалов с разной работой выхода $e\varphi$. Принято считать, что действие таких полей вредно

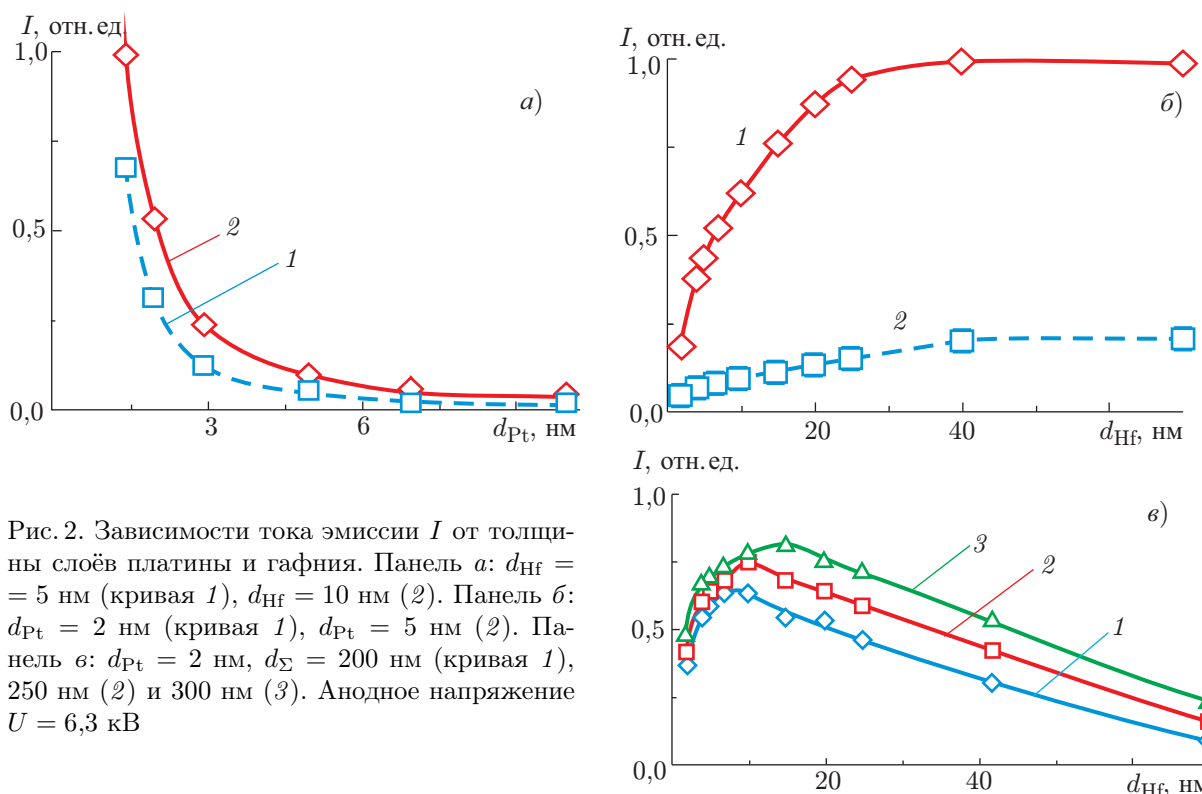


Рис. 2. Зависимости тока эмиссии I от толщины слоёв платины и гафния. Панель а: $d_{Hf} = 5$ нм (кривая 1), $d_{Hf} = 10$ нм (2). Панель б: $d_{Pt} = 2$ нм (кривая 1), $d_{Pt} = 5$ нм (2). Панель в: $d_{Pt} = 2$ нм, $d_{\Sigma} = 200$ нм (кривая 1), 250 нм (2) и 300 нм (3). Анодное напряжение $U = 6,3$ кВ

влияют на эмиссию катодов. Например, «поля пятен», существующие на поверхности неоднородных по химическому составу материалов, уменьшают эффективную эмитирующую поверхность, препятствуя выходу термоэлектронов с катода в областях контакта разных материалов.

Было решено опробовать возможность получения полевой эмиссии под действием контактных полей. Были исследованы композиты из гранул гексаборида лантана ($e\varphi \approx 2,5 \div 3,8$ эВ) в пирографите ($e\varphi \approx 4,7$ эВ) [23], а также простейшие системы из приведенных в контакт слоёв индия ($e\varphi \approx 3,7 \div 4,1$ эВ) и фуллеренов ($e\varphi \approx 5,3$ эВ). Эти исследования продемонстрировали возможность реализации полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода. Полученные в них результаты послужили основой для разработки многослойных эмиттеров нового типа [24, 25]. Многослойные системы, включающие большое количество (до 40) приведённых в контакт пар слоёв материалов с разной работой выхода, казались перспективными для получения больших токов полевой эмиссии. Были исследованы многослойные катоды из двух пар материалов: из иттербия ($e\varphi \approx 3,1$ эВ) и углерода ($e\varphi \approx 4,7$ эВ), а также из гафния ($e\varphi \approx 3,5$ эВ) и платины ($e\varphi \approx 5,3$ эВ). Слоистые катоды создавались с использованием магнетронного напыления.

Для выработки правил построения слоистых катодов и определения их эмиссионных характеристик проводились специальные расчеты и эксперименты. В расчётах, выполненных с использованием программы COMSOL Multiphysics, определялись распределения полей в диодной системе со слоистым катодом, строились траектории электронов и вычислялись токи на анод. Было определено влияние на эмиссионные характеристики слоистых катодов толщины d приведённых в контакт слоёв и разницы их работы выхода $e\varphi$, а также числа пар слоёв N . На рис. 2 показаны рассчитанные характеристики катода, содержащего 20 пар слоёв гафния и платины.

Из расчётов следует, что увеличение толщины слоёв платины d_{Pt} при фиксированной толщине слоёв гафния d_{Hf} ведёт к быстрому падению эмиссионного тока (см. рис. 2а). Увеличение толщины слоёв гафния в интервале $d_{Hf} \leq 20 \div 25$ нм при $d_{Pt} = \text{const}$ сопровождается быстрым ростом эмиссионного тока (см. рис. 2б). Из расчётов следует, что при заданной суммарной тол-

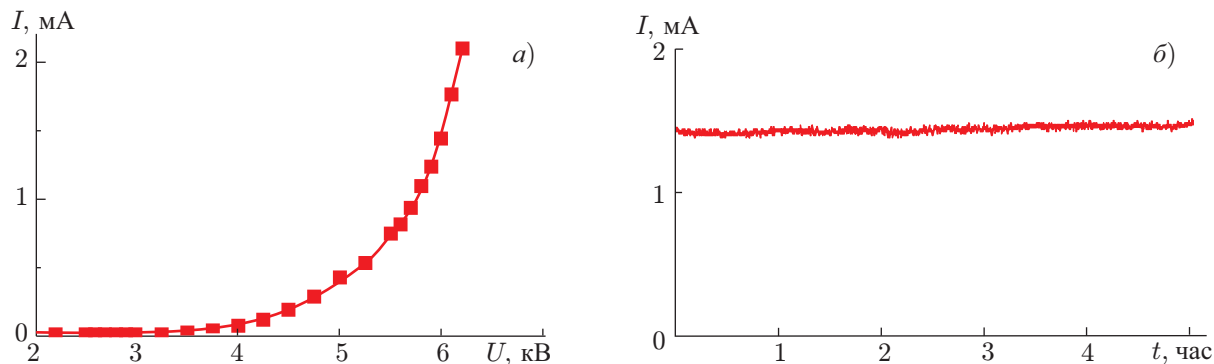


Рис. 3. Характеристики оптимизированного слоистого катода, включающего в себя 20 пар слоёв гафния и платины: вольт-амперная кривая (а) и зависимость эмиссионного тока от времени работы катода (б)

щине d_{Σ} слоистого катода и минимальной толщине слоёв платины $d_{Pt} = 2$ нм для получения максимального тока эмиссии необходима оптимизация толщины слоёв гафния. Так, при $d_{\Sigma} = 250$ нм оптимальной будет толщина слоёв гафния $10 \div 12$ нм (см. рис. 2в).

Проведённое экспериментальное исследование работы многослойных катодов подтвердило основные выводы, следующие из расчётов. Измерение эмиссионных характеристик проводилось в диоде с расстоянием 1 мм между катодом и анодом. На рис. 3а показана типичная вольт-амперная характеристика Hf–Pt катода с параметрами, близкими к оптимальным. Катод состоял из 20 пар слоёв платины и гафния с толщинами 2 и 10 нм соответственно. Такой катод обеспечивал ток полевой эмиссии примерно до 2 мА при средней с поверхности катода плотности тока около 200 А/см^2 . При таких больших плотностях тока эмиссии Hf–Pt катод работает достаточно стабильно в техническом вакууме при давлениях $10^{-7} \div 10^{-8}$ Торр (см. рис. 3б).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во многих лабораториях мира разрабатываются и исследуются полевые эмиттеры. В настоящее время уже существуют катоды, способные обеспечить достаточно большие токи и плотности токов полевой эмиссии, необходимые для некоторых приложений. Однако пока для большинства существующих катодов не доказана возможность их практического использования в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме. Перспективными для таких приложений представляются разработанные в СПбПУ многоострийные кремниевые катоды с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями, а также многослойные катоды из приведённых в контакт материалов с разными работами выхода.

Полученные в СПбПУ данные свидетельствуют о возможности использования исследованных многоострийных катодов в миниатюрных высоковольтных приборах, работающих в техническом вакууме. Созданные многоострийные катоды с защитными металл-фуллереновыми покрытиями обеспечивают стабильную эмиссию, достаточную для диагностических гиротронов [26]. Многослойные катоды не могут пока обеспечить токи, необходимые для функционирования такого типа СВЧ приборов, но по сделанным оценкам имеют большие резервы повышения токов эмиссии. Из исследованных слоистых катодов наилучшими эмиссионными характеристиками обладают гафний-платиновые эмиттеры. Оба типа катодов, разрабатываемых и исследуемых в СПбПУ, уже на данном этапе перспективны для использования в миниатюрных источниках рентгеновского излучения [27, 28].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 16–12–10010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spindt C. A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E. R. // J. Appl. Physics. 1976. V. 47, No. 12. P. 5248.
2. Whaley D. R., Duggal R., Armstrong C. M., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. V. 56, No. 5. P. 896.
3. Елецкий А. В. // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, № 9. С. 897.
4. Egorov N., Sheshin E. Field emission electronics. Springer Series in Advanced Microelectronics. V. 60. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2017. 568 p.
5. Бушуев Н. А., Глухова О. Е., Григорьев Ю. А. и др. // Журнал техн. физики. 2016. Т. 86, № 2. С. 134.
6. Соминский Г. Г., Тумарева Т. А. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т. 23, № 2. С. 74.
7. Fang X., Bando Y., Gautam U. K., et al. // J. Materials Chemistry. 2008. V. 18. P. 509.
8. Givargizov E. I. // J. Vacuum Science & Technology B. 1993. V. 11, No. 2. P. 449.
9. Chen Z., Zhang Q. P., Lan, et al. // Nanotechnology. 2007. V. 18, No. 26. Art. no. 265702.
10. Li Ch., Zhang Y., Mann M., et al. // Appl. Physics Lett. 2010. V. 97, No. 11. Art. no. 113107.
11. Chouhan V., Noguchi T., Kato S. // J. Appl. Physics. 2016. V. 119, No. 13. Art. no. 134303.
12. Yuan X., Zhu W., Zhang Y., et al. // Scientific Reports. 2016. V. 6. Art. no. 32936.
13. Гуляев Ю. В., Абаньшин Н. П., Горфинкель Б. И. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, № 11. С. 63.
14. Тумарева Т. А., Соминский Г. Г. // Журнал техн. физики. 2013. Т. 83, № 7. С. 121.
15. Тумарева Т. А., Соминский Г. Г., Светлов И. А., Пантелеев И. С. // Журнал техн. физики. 2012. Т. 82, № 1. С. 114.
16. Тумарева Т. А., Соминский Г. Г., Веселов А. А. // Журнал техн. физики. 2004. Т. 74, № 7. С. 110.
17. Campbell E. E. B., Tellgmann R., Krawez N., Hertel I. V. // J. Physics and Chemistry of Solids. 1997. V. 58, No. 11. P. 1763.
18. Соминский Г. Г., Тумарева Т. А., Тарадаев Е. П. и др. // Журнал техн. физики. 2015. Т. 85, № 1. С. 138.
19. Соминский Г. Г., Сезонов В. Е., Тарадаев Е. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 7. С. 568.
20. Соминский Г. Г., Тарадаев Е. П., Тумарева Т. А. и др. // Журнал техн. физики. 2016. Т. 86, № 11. С. 108.
21. Соминский Г. Г., Тарадаев Е. П. // Журнал технической физики. 2017. Т. 87, № 6. С. 930.
22. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. 564 с.
23. Соминский Г. Г., Сезонов В. Е., Саксеев Д. А., Тумарева Т. А. // Журнал техн. физики. 2011. Т. 81, № 6. С. 104.
24. Sezonov V., Sominski G. // Procs. 14th Baltic Conf. on Atomic Layer Deposition. 2–4 October 2016, St. Petersburg, Russia. P. 1.
25. Sominskii G. G., Sezonov V. E., Vdovichev S. N. // Procs. 18th Intern. Vacuum Electronics Conf. 24–26 April 2017, London. P. 1.
26. Glyavin M. Yu., Manuilov V. N., Sominskii G. G., et al. // Infrared Physics & Technology. 2017. V. 78. P. 185.

27. Schwoebel P. R., Holland C. E., Spindt C. A. // Procs. Int. Vac. Nanoel. Conf. 26–30 July 2010, Palo Alto, USA. P. 14.
28. Parmee R. J., Collins C. M., Milne W. I., Cole M. T. // Nano Convergence. 2015. V. 2, No. 1. P. 1.

Поступила в редакцию 22 апреля 2019 г.; принята в печать 30 августа 2019 г.

FIELD EMITTERS FOR MINIATURE HIGH-VOLTAGE ELECTRONIC DEVICES OPERATING IN TECHNICAL VACUUM

*G. G. Sominskii, V. E. Sezonov, E. P. Taradaev, T. A. Tumareva, S. P. Taradaev, A. A. Rukavitsyna,
M. E. Givargizov, and A. N. Stepanova*

We present the results of the development and study of the field emitters for high-voltage electronic devices operating in technical vacuum. The main attention is paid to estimating the possibilities of using distributed field emitters under the conditions of intense ion bombardment.