



РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ЭМИТТЕРОВ НА ОСНОВЕ СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОД МАТЕРИАЛОВ

Г.Г. Соминский, Т.А. Тумарева

Описаны достижения и проблемы в создании полевых эмиттеров для вакуумных СВЧ-устройств. Основное внимание удалено эмиттерам на основе содержащих углерод материалов для высоковольтных электронных устройств, работающих в техническом вакууме $10^{-6} - 10^{-8}$ Торр. Приведен краткий обзор существующих разработок и описаны результаты исследований, выполненных в СПбГПУ.

Ключевые слова: Полевые эмиттеры, углеродные и содержащие углерод материалы, фуллереновые покрытия, вакуумная СВЧ-электроника, технический вакуум, сильные электрические поля, большие токи, долговечность, активировка, ионная обработка.

Пока человек думает, что не может сделать что-нибудь, он не может это сделать.

Б. Спиноза

Введение

Использование полевых эмиттеров представляется привлекательным при построении широкого класса электронных устройств, в том числе и устройств СВЧ-электроники. Однако эмиттеры такого сорта до сих пор с успехом используются лишь в сверхвысоковакуумных, низковольтных и слаботочных системах, где можно свести к минимуму вредное воздействие ионной бомбардировки и газовой среды. Влияние указанных факторов особенно велико в высоковольтных устройствах, работающих в условиях технического вакуума. В них не удается, как правило, обеспечить высокую долговечность полевых эмиттеров. Ограничивают применение полевых эмиттеров также трудности получения с их помощью достаточно больших токов, необходимых для функционирования многих электронных устройств.

Распространена точка зрения, что повышенной устойчивостью к газовой среде и к воздействию ионной бомбардировки должны обладать углеродные и содержащие углерод эмиттеры, а также эмиттеры со специальными защитными покрытиями из этих материалов (см., например, [1–3]). В данной статье основное внимание удалено рассмотрению достижений и проблем по созданию полевых эмиттеров на основе

содержащих углерод материалов для высоковольтных электронных устройств, работающих в техническом вакууме 10^{-6} – 10^{-8} Торр. Приведен краткий обзор существующих разработок и рассмотрены результаты исследований, выполненных в СПбГПУ. В разделах 1 и 2 проанализированы имеющиеся в литературе данные об основных факторах, влияющих на работу полевых эмиттеров, и сформулированы требования к эмиттерам для СВЧ-устройств. Далее, в разделе 3 указаны важнейшие достижения в разработке полевых эмиттеров на основе углеродных и содержащих углерод материалов, анализируются трудности создания на их основе катодов для СВЧ-устройств. Наконец, в Заключении подводятся итоги, сформулированы основные выводы, указаны возможные планы и перспективы дальнейших исследований.

1. Основные факторы, влияющие на работу полевых эмиттеров

Полевая эмиссия имеет место в условиях, когда у поверхности твердого тела созданы достаточно сильные электрические поля, более 10^7 В/см. Теория полевой эмиссии, связанной с туннелированием электронов из твердого тела в вакуум, хорошо развита практически только для химически однородных проводящих материалов при низкой температуре. В этом случае для оценки плотности тока эмиссии можно воспользоваться соотношением Фаулера–Нордгейма [4–6]:

$$J = \frac{e^3 E^2}{8\pi h\varphi t^2(y)} \exp \left\{ -\frac{8\pi\sqrt{2m}\varphi^{2/3}}{3heE} v(y) \right\}, \quad (1)$$

где φ – работа выхода, m и e – соответственно масса и заряд электрона, E – электрическое поле у поверхности эмиттера, h – постоянная Планка, ε_0 – электрическая постоянная,

$$y = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{e^2 E}{4\pi\varepsilon_0}}, \quad (2)$$

$$t(y) = 1 + 0.1107y^{1.33}, \quad (3)$$

$$v(y) = 1 - y^{1.69}. \quad (4)$$

В случае треугольного потенциального барьера на границе твердое тело – вакуум формула Фаулера–Нордгейма приближенно описывается выражением

$$J = 1.54 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi} \exp \left\{ -6.83 \cdot 10^9 \frac{\varphi^{3/2}}{E} \right\}, \quad (5)$$

в котором работа выхода φ выражена в эВ, плотность тока J – в А/м², а напряженность поля E – в В/м.

Чтобы рассчитать плотность тока эмиссии, необходимо знать величину поля E . К сожалению, однако, поле удается определить лишь в некоторых простейших ситуациях (см., например, [7]). Так, для одиночного острия на длинной цилиндрической ножке с полусферической вершиной радиуса r поле у вершины острия в первом

приближении определяется соотношением

$$E \approx \frac{U}{kr}, \quad (6)$$

где U – напряжение между катодом и анодом, а $k \approx 5$ – эмпирически определенный коэффициент формы. Величина поля зависит, конечно, от расстояния между катодом и анодом. Однако изменение поля с расстоянием невелико. Сильнее могут повлиять на величину эмиссионного тока даже малые выступы на вершине остряя, дополнительно усиливающие поле.

Для одиночного выступа на плоской поверхности катода в диоде с протяженными параллельными электродами электрическое поле у вершины выступа можно рассчитать с помощью формулы

$$E = \gamma \frac{U}{d}, \quad (7)$$

где коэффициент γ для выступа со сферической поверхностью определяется соотношением

$$\gamma \approx 1.2 \left(2.15 + \frac{l}{R} \right)^{0.90}, \quad (8)$$

в котором l – высота выступа, а R – радиус его вершины. И здесь, как и в предыдущем случае, поле может быть дополнительно усилено, даже на малых неровностях поверхности.

Если на эмиттирующей поверхности существует структура выступов, при расчете поля у каждого из них необходимо учитывать явление «экранировки» поля (см., например, [7–9]). В связи с экранировкой эмиссионные свойства структуры выступов зависят от плотности и морфологии этой структуры. Проведенные расчеты свидетельствуют, что для одинаковых выступов, диаметр вершины которых существенно меньше их высоты l , можно в первом приближении пренебречь экранировкой поля, если расстояние между выступами больше $2l$. Таким образом, соотношения (7, 8) могут быть использованы для оценки поля у вершины выступа только для системы достаточно редко расположенных выступов. Зависят поля на вершинах выступов также от формы и взаимного расположения катода и анода [10].

Подытоживая, можно сказать, что для эмиттеров со сложным рельефом поверхности, как правило, трудно определить истинное значение электрического поля при заданном напряжении U между катодом и анодом. Не всегда просто определить и площадь эмиттирующей поверхности. Но уравнение (5) можно преобразовать в зависимость тока I от напряжения U , введя одновременно фактор усиления поля β , определяющий связь поля с напряжением

$$E = \beta U. \quad (9)$$

С учетом соотношения (9) выражение (5) можно записать в виде

$$I = A \frac{(\beta U)^2}{\varphi} \exp \left\{ -B \frac{\varphi^{3/2}}{\beta U} \right\}, \quad (10)$$

где A и B – коэффициенты, не зависящие ни от распределения поля, ни от работы выхода эмиттера. При полевой эмиссии зависимость $\ln I$ от величины $1/U$ – прямая

линия, наклон которой определяется отношением $\varphi^{3/2}/\beta$. Определив наклон этой характеристики и зная величину работы выхода, можно найти коэффициент β .

Таким образом, на величину тока полевой эмиссии могут сильно влиять даже малые изменения работы выхода и рельефа поверхности полевого эмиттера.

Уже в 1950-х годах при изучении работы острыйных полевых эмиттеров из тугоплавких металлов было выявлено влияние ионной бомбардировки и газовой среды на функционирование таких эмиттеров. Подробно анализируется влияние указанных факторов, например, в работе [10]. Ее авторы объясняют изменения тока полевой эмиссии, наблюдаемые во время работы диода с острыйным катодом, изменением работы выхода и рельефа поверхности острия. Первое они связывают с попаданием на острие различного рода «загрязнений» (молекул остаточного газа или частиц вещества, десорбированных с деталей и внутренней поверхности оболочки вакуумного прибора). Второе же, по их мнению, обусловлено распылением (как правило, неоднородным) острия ионами, образованными в результате ионизации частиц остаточного газа или в результате электронной бомбардировки анода и стенок вакуумного прибора. Авторы [10] свели к минимуму вредное влияние указанных факторов, обеспечив сверхнизкое давление в работающем приборе (по их оценкам, это давление было порядка 10^{-13} мм рт. ст.) и предельно уменьшив влияние на работу катода потоков частиц со стенок прибора. В результате они добились выдающихся результатов, которые, возможно, недооценены в полной мере до сих пор. В их работе с одиночного вольфрамового острия диаметром 0.3 мкм при высоких рабочих напряжениях (больше 10 кВ) получен в статическом режиме ток 7.5 мА, а в режиме коротких (1 мкс) импульсов с частотой следования 120 Гц достигнут ток около 100 мА. При отборе таких токов обеспечена долговечность катодов, измеряемая тысячами часов. Иллюстрируют изменения тока эмиссии во времени рис. 1, 2. В условиях, когда ток эмиссии не ограничен полем пространственного заряда, как правило, наряду с «медленными» изменениями токов, наблюдаются «быстрые» их флуктуации (см., например, рис. 2). Причины нестабильностей тока и флуктуаций многообразны и не всегда ясны. Изменения токов могут быть обусловлены, например, адсорбцией разных веществ на поверхности эмиттера или их десорбцией, изменением рельефа поверхности под действием ионной бомбардировки. Иногда флуктуации могут быть

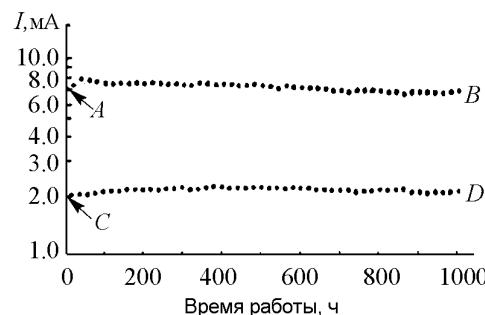


Рис. 1. Зависимости тока эмиссии острыйного эмиттера из вольфрама от времени работы, измеренные в статическом режиме при двух значениях напряжения

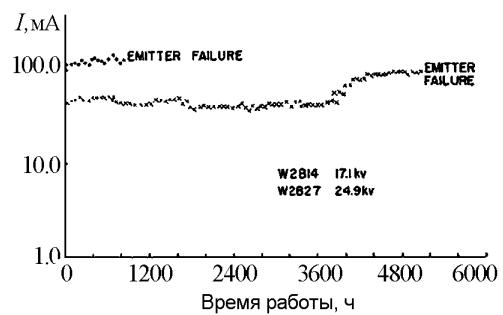


Рис. 2. Зависимости тока эмиссии острыйного эмиттера из вольфрама от времени работы, измеренные в импульсном режиме (1 мкс, 120 Гц) при двух значениях напряжения [10]

вызваны изменениями питающего напряжения, и в таких случаях их можно устранить или свести к минимуму радиотехническими методами.

Работа [10] – одно из немногочисленных исследований, в котором оценено влияние ионной бомбардировки и газовой среды на величину предельных токов эмиссии и долговечность катодов, когда они работают при отборе токов, близких к предельным. В принципе, известно, что разрушение полевых эмиттеров может быть обусловлено действием пондеромоторных сил электрического поля (см., например, [11]) и/или перегревом эмиттеров в процессе отбора больших токов [10]. В работе [10] наблюдалось разрушение острыйных эмиттеров из вольфрама в условиях, когда сведено к минимуму влияние ионной бомбардировки и газовой среды. Авторы считают, что в созданных ими условиях разрушение эмиттеров было вызвано их перегревом при предельно достигнутых плотностях тока, больше 10^7 A/cm^2 .

Пондеромоторные силы $F_{\text{п}}$, действующие на единицу площади поверхности эмиттера, определяются соотношением вида

$$F_{\text{п}} = \epsilon_0 \frac{E^2}{2}, \quad (11)$$

то есть эти силы пропорциональны квадрату электрического поля E у поверхности эмиттера. В связи с этим нужно учитывать, что при отборе фиксированных токов требуется тем меньшее электрическое поле, чем меньше работа выхода поверхности эмиттера, а значит при тех же токах действующая на эмиттер пондеромоторная сила будет меньше.

Учитывая перечисленные выше факторы, которые могут приводить к разрушению полевых эмиттеров можно предположить, что достижимые с их помощью предельные токи, а также долговечность эмиттеров, зависят от материала, из которого они изготовлены и/или от материала их покрытия, от прочности крепления эмиттера и прочности крепления покрытия на подложке. Как правило, практически невозможно теоретически определить достижимые предельные токи и долговечность полевых эмиттеров.

2. Требования, предъявляемые к полевым эмиттерам для СВЧ-устройств

Уже довольно давно делаются попытки создания вакуумных СВЧ-устройств с холодными полевыми эмиттерами (см., например, [12–14]). Впервые, видимо, полевые эмиттеры были применены для формирования потока электронов в СВЧ-системах с сеточным управлением (фемитрон), описанных в [12, 14] и рассчитанных на работу при сравнительно невысоких частотах до 10 ГГц. Здесь были использованы наработки авторов [10]. Ток электронов в 25 А в работе [12] создавался в импульсах длительностью 1 мкс двухрядной катодной системой из 160 расположенных на расстоянии 0.254 мм друг от друга острыйных катодов. Первейанс созданной эмиссионной системы имел величину $9 \text{ мкA/B}^{3/2}$. Ток с одного острия достигал значений 150–160 мА, то есть был больше, чем с одиночного острия в работе [10]. Можно предположить, что это стало возможным, так как при сверхнизком давлении использовались более толстые острия. В предположении о том, что максимально

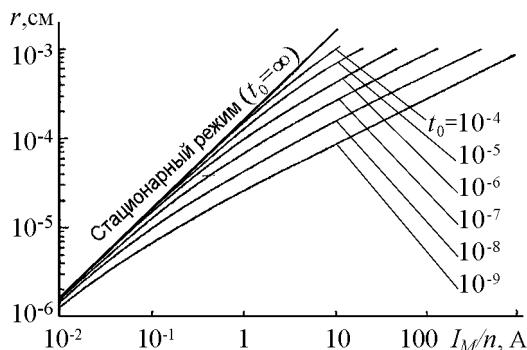


Рис. 3. Предельные токи вольфрамового острия с радиусом вершины r при разных длительностях импульсов t_0

волн (конкретную частоту авторы не называют) было получено выходная мощность свыше 1 кВт при КПД около 30% и коэффициенте усиления примерно 9 дБ. Выходная мощность и КПД, а также ток эмиссии, полученные в фемитроне с автоэмиссионным катодом, до сих пор являются рекордными для вакуумных СВЧ-устройств с полевыми эмиттерами. Трудность реализации такого устройства сопряжена с необходимостью обеспечения сверхвысокого вакуума в приборе (см. [10]).

Для получения больших токов, необходимых для работы не только СВЧ-устройств, но, например, для создания источников рентгеновского излучения, как и в работе [12], делались попытки создания эмиттеров большей, чем у одиночного острия, площади. При создании таких распределенных эмиттеров важно научиться «складывать» токи с большого числа источников эмиссии. Оригинальное решение проблемы было предложено Спиндтом (см., например, [15, 16]). В диодных системах Спиндта на 1 см² площади размещалось до 10⁶–10⁷ ячеек с острийными эмиттерами из тугоплавкого металла или полупроводника. С помощью таких систем удавалось получать в импульсном режиме при давлении 10⁻⁹ мм рт. ст. токи ориентировочно до 100 мА с 5000 острий, причем при чрезвычайно малых напряжениях на управляющем электроде, порядка 100–300 В. Технически осуществимо и дополнительное уменьшение напряжений при дополнительной миниатюризации элементов спиндтовской структуры. Низковольтные спиндтовские системы принципиально могут эксплуатироваться в условиях технического вакуума. Действительно, формируемый ими поток электронов малой энергии не может вызвать существенной десорбции вещества с бомбардируемых электродов, а ионы малой энергии практически не распыляют поверхности эмиттеров.

Разработка спиндтовских катодных систем стимулировала развитие идей вакуумной микроэлектроники СВЧ. В короткие сроки было предложено много заманчивых идей создания на основе таких систем преимущественно коротковолновых СВЧ-устройств. Довольно подробный анализ этих идей содержится в работе [14]. К сожалению, однако, трудности в реализации этих идей оказались очень велики и не все идеи были даже опробованы. В данной статье мы ограничимся описанием только тех СВЧ-устройств с автоэмиссионными катодами, которые были созданы и исследованы. Эти данные, с нашей точки зрения, позволяют оценить те требования, которые должны предъявляться к полевым эмиттерам СВЧ-устройств.

достижимые токи с вольфрамового острия ограничиваются его перегревом, авторами была рассчитана связь предельных токов эмиссии I_M/n с одиночного острия с радиусом вершины r в импульсе длительностью t_0 . На рис. 3 приведены расчетные зависимости I_M/n от r при разных значениях t_0 . Полученные в работе [12] токи по порядку величины близки к предельным.

В фемитроне [12] с катодной системой из вольфрамовых острий при токе 25 А в сантиметровом диапазоне длин

В 1990-х годах несколькими научными группами были начаты исследования разных типов СВЧ-устройств с автоэмиссионными катодами на основе систем спиндтовского типа [17–23]. Все исследования были нацелены на создание СВЧ-приборов, которые могли бы работать в условиях технического вакуума.

В Стретчклийдском университете в Англии была сделана попытка осуществить работу гиротрона миллиметрового диапазона длин волн с автоэмиссионным источником электронов [17]. Магнетронно-инжекторная пушка (МИП), которая ранее функционировала с термокатодом, была модифицирована и приспособлена для работы с автоэмиссионными системами спиндтовского типа. МИП, рассчитанная на формирование пучка электронов с энергией 40–50 кэВ, была оснащена десятью диодными спиндтовскими катодными системами (чипами) площадью $2.25 \times 2.25 \text{ mm}^2$, каждая из которых включала 6000 ячеек с кремниевыми эмиттерами, имеющими радиус вершины 10 нм, и с управляющим электродом из ниобия. При напряжении на управляющем электроде около 100 В каждый чип обеспечивал ток эмиссии ориентировано до 9 мА. В проведенных экспериментах авторы испытывали работу созданного прибора с включенными в параллель тремя чипами при суммарных токах эмиссии, не превышающих несколько миллиампер. Даже при столь малых токах им удалось зафиксировать на выходе гиротрона излучение мощностью около 1 Вт на частоте, близкой к циклотронной. Вряд ли можно считать проведенные эксперименты свидетельством работоспособности созданного гиротрона при токах в несколько миллиампер. Основным достижением работы является, видимо, доказательство возможности создания высоковольтных магнетронно-инжекторных пушек с полевыми эмиттерами. К сожалению, однако, выполненные кратковременные измерения не позволяют оценить долговечность таких МИП. Представляло бы интерес продолжение начатых в [17] исследований при существенно больших токах электронного пучка. Однако, насколько нам известно, исследования гиротронов с автоэмиссионными катодами не были продолжены.

В CPI разрабатывались устройства типа клистродов [18, 19], но и эти исследования, судя по всему, как и работы с гиротронами, не получили дальнейшего развития.

Практически одновременно с исследованиями [18, 19] в NEC Corporation разрабатывались ЛБВ с автоэмиссионными катодами. В работе [20], вероятно, впервые сообщалось об испытании ЛБВ со спиндтовской эмиссионной системой. В этой лампе на рабочей частоте 10.5 ГГц при токе в пучке 58 мА была получена выходная мощность 27.5 Вт при КПД 14% и коэффициенте усиления 22 дБ. Параллельно и независимо в Northrop Grumman была разработана электронная пушка для ЛБВ с удержанием пучка с помощью магнитно-периодической фокусирующей системы (МПФС) [21]. О последних достижениях в разработке ЛБВ со спиндтовскими катодными системами сообщается в работах [22–24].

В работе [22] подробно анализируются особенности и возможности ЛБВ со спиндтовской эмиссионной системой. Здесь показано, что в ЛБВ с полевым эмиссионным источником малых размеров не следует использовать стандартную пушку Пирса, так как она не позволяет обеспечить хорошую транспортировку интенсивного потока электронов в протяженном канале с замедляющей системой. Авторами опробована электронная пушка, в которой для формирования ламинарного электронного пучка применена система из электростатических линз. Пушка удобна при формировании потока электронов с полевого эмиттера не только потому, что позволяет

регулировать в широких пределах ток пучка, не ухудшая его качества. В приборе с такой пушкой, установив потенциал удаленного от катода электрода выше потенциала входа в канал транспортировки пучка, можно было защитить катодную систему от потока ионов из этого канала, образованных электронным ударом из частиц остаточного газа. Авторы надеялись, что таким образом увеличат срок службы катода. В работе [22] со спиндовской катодной системы диаметром 1 мм с 50000 острыйных полевых эмиттеров из молибдена в режиме одиночных импульсов длительностью в несколько десятков миллисекунд был получен ток эмиссии 91.4 мА при энергии электронов 3.5 кэВ. При таком токе на частоте входного сигнала 4.5 ГГц коэффициент усиления имел величину примерно 23 дБ, а максимальная выходная мощность была равна 55 Вт. Пока результаты, описанные в работе двухтысячного года [22], насколько нам известно, являются лучшими для СВЧ-устройств, созданных с использованием спиндовских катодных систем с металлическими катодами.

Полученные в [22] результаты заметно скромнее достигнутых ранее в фемитроне [12]. ЛБВ с выходной мощностью менее 100 Вт в сантиметровом диапазоне длин волн вряд ли могут конкурировать со стандартными СВЧ-устройствами, в которых для формирования электронного потока используются термокатоды, да и с твердотельными СВЧ-источниками того же диапазона. Очевидно, что для того, чтобы вакуумные СВЧ-приборы сантиметрового диапазона длин волн с полевыми эмиттерами стали конкурентоспособны, необходимо обеспечить с их помощью большие СВЧ-мощности. Казалось, что после капитальной проработки конструкции ЛБВ и экспериментального ее испытания в работе [22] довольно быстро будут получены большие токи эмиссии и существенно лучшие выходные параметры ЛБВ. Однако ожидания не оправдались. В работе [24], доложенной представителями той же научной группы на последней конференции ICOPS-2008 в г. Карлсруэ (Германия), не удается заметить какой-либо прогресс.

На основании той информации, которая содержится в работах [22–24], трудно понять проблемы, мешающие развитию этих исследований. Возможно, главной причиной является то, что созданные эмиссионные источники не обеспечивают необходимой долговечности приборов в условиях технического вакуума. Высокая долговечность использованных в [22–24] катодных систем авторами не доказана. Кажется маловероятным, чтобы использованные в этих работах стандартные молибденовые катоды длительное время выдерживали, не разрушаясь, бомбардировку быстрыми (с энергиями порядка нескольких кэВ) ионами остаточного газа. Созданная в работе [22] защита катодов от потока ионов из канала транспортировки пучка не защищает катоды от бомбардировки их ионами из самой пушки и, скорее всего, малоэффективна. С увеличением токов и энергии электронов, которые необходимы для повышения выходной мощности, вредное воздействие ионной бомбардировки должно только возрастать.

Вакуумные СВЧ-устройства даже сравнительно малой мощности могли бы найти свою нишу на рынке, если бы их удалось использовать в качестве малогабаритных источников терагерцовых излучений (см., например, [14]). Такие источники представляли бы большой интерес, так как столь коротковолновые излучения трудно создать с помощью конкурирующих с вакуумными твердотельными приборами. К сожалению, однако, попытки создания источников терагерцового излучения на основе спиндовских эмиссионных систем, управляемых СВЧ-сигналами, пока

не увенчались успехом, в частности, из-за большой емкости зазора катодная система – управляющий электрод, а также из-за больших СВЧ-потерь на столь высоких частотах.

На основании анализа приведенных выше данных можно сделать следующие выводы.

1. Описанные острыйные катодные системы с металлическими катодами [10] могут обеспечить высокую долговечность СВЧ-приборов только в условиях сверхвысокого вакуума. Но для их успешного использования необходимо провести целую «революцию» в технологии изготовления, обработки и откачки СВЧ-устройств.

2. Использование спинтовских катодных систем с металлическими и полупроводниковыми катодами пока не позволяет получать в СВЧ-приборах токи свыше 100 мА [17–24]. Поэтому не удается получить с их помощью мощность больше 100 Вт. Пока не доказана высокая долговечность такого типа катодных систем в условиях технического вакуума, так что проблематично их практическое использование даже при достигнутом уровне малых мощностей.

3. Созданные источники полевой эмиссии спинтовского типа можно было бы попытаться использовать в существующих вакуумных приборах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн (например, в современных ЛОВ и оротронах), но и там требуются токи, в несколько раз превышающие достигнутый к настоящему времени предел (100 мА).

Есть несколько путей решения указанных проблем. Возможно, например, как говорилось выше, исключить вредное влияние ионной бомбардировки, обеспечивая сверхнизкое давление в приборах или создавая такие распределения полей в них, при которых исключается или сводится к минимуму ионная бомбардировка катодов. Оба эти пути трудны в реализации. Поэтому хотелось бы рассмотреть другой путь – создание эмиттеров из материалов, стойких к ионной бомбардировке и к воздействию газовой среды.

В течение уже достаточно продолжительного времени делаются попытки создания долговечных и эффективных полевых эмиттеров для работы в условиях технического вакуума. В следующем разделе мы постараемся осветить положение дел с созданием и исследованием перспективных с этой точки зрения полевых эмиттеров из углеродных и содержащих углерод материалов. Основное внимание будет уделено наиболее изученным эмиссионным системам из углеродных волокон и из графита, нанотрубным системам, а также эмиттерам с разного типа углеродными и содержащими углерод покрытиями. Кроме того, кратко будут изложены результаты, полученные авторами при исследовании композитного эмиттера.

3. Разработка и исследование полевых эмиттеров из углеродных и содержащих углерод материалов

3.1. Полевые эмиттеры из углеродных волокон. Уже ранние исследования (см., например, [25, 26]), в которых была изучена возможность применения углеродного волокна в качестве катодов для растровых электронных микроскопов, показали, что в условиях технического вакуума такие эмиттеры имеют существенно большую долговечность, чем вольфрамовые, во всяком случае, при необходимых в таких

устройствах малых отбираемых токах. Привлекали к себе внимание такие эмиттеры и тем, что к тому времени была уже хорошо отработана технология изготовления волокон. По указанным причинам с 1970-х годов начато всестороннее изучение эмиссионных характеристик полевых эмиттеров из углеродного волокна. Большой вклад в эти исследования внесла научная группа Б.В. Бондаренко, Е.П. Шешина и др. (Московский физико-математический институт). В связи с этим опишем важнейшие характеристики катодов из углеродного волокна на основе книги Е.П. Шешина [3].

Наиболее подробно исследованы волокна из полиакрилонитрильного волокна (ПАН), стеклоуглеродные и пироуглеродные волокна. Диаметр указанных типов волокон может варьироваться в широких пределах от единиц до десятков микрон. На поверхности всех типов волокон существуют усиливающие электрическое поле выступы малого размера. Рельеф поверхности, а также токовые характеристики волокон сильно меняются в зависимости от условий их изготовления (в частности, от температуры) и от режима тренировки (формовки) отбором тока. При отборе тока в условиях технического вакуума поверхность волоконного эмиттера подвергается интенсивной бомбардировке ионами, возникшими в результате ионизации остаточного газа эмитированными с катода электронами. В результате катодного распыления вершины волокна и уноса с его поверхности под действием пондеромоторных сил электрического поля наиболее слабо связанных с нею частиц сглаживается рельеф поверхности, но достигается более устойчивая ее конфигурация. При этом ток с катода равномернее распределяется по большому числу микровыступов и в результате уменьшается нагрузка на каждый из них. В начале формовки происходит значительное уменьшение тока эмиссии и резко падают (от десятков до единиц процентов) флуктуации тока. Далее падение тока продолжается, но происходит гораздо медленнее. При давлениях порядка 10^{-7} мм рт. ст. формовка обычно проводится в течение 50–100 часов. На рис. 4 показана полученная после окончания формовки

типичная зависимость тока эмиссии одиночного ПАН-волокна от времени его работы при постоянном напряжении. Предельные токи с хорошо тренированного одиночного волокна диаметром в несколько микрон достигают нескольких сотен микроампер. Долговечность одноволоконных катодов, измеренная при токах, существенно меньших предельного (по промежутку времени между моментом окончания формовки и моментом, когда ток падает в $\sqrt{2}$ раз), превышает 5000 часов.

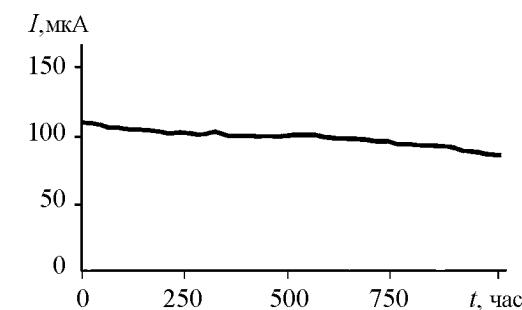


Рис. 4. Зависимость тока эмиссии от времени работы, измеренная в диодной системе с катодом из одиночного ПАН-волокна

Токи свыше 1 мА удается получить только с достаточно толстых пучков, включающих более 50 волокон. Без длительной формовки такие катоды разрушаются при токах 1–2 мА. В результате же формовки становится возможным отбор с пучка волокон тока величиной 10–15 мА. Дальнейшее увеличение толщины пучка не приводит к возрастанию предельного тока, так как не удается его однородно отформовать. Решение проблемы было найдено в создании единой катодной системы из электрически изолированных друг от друга пучковых катодов. В этом случае каждый из

фрагментов катодной системы подвергался индивидуальной формовке. В процессе формовки авторы добивались того, чтобы пучки обеспечивали приблизительно одинаковые токи при одном напряжении. С помощью отформованной таким образом катодной системы из 9 пучковых катодов диаметром 70 мкм был получен в непрерывном режиме ток 100 мА [27]. Такой ток, в принципе, достаточен для обеспечения работы некоторых типов СВЧ-приборов (см. раздел 2). Однако катоды из пучков углеродных волокон более громоздки, чем спинтовские катодные системы и требуют сложной и длительной формовки. Поэтому этого сорта катоды явно уступают спинтовским в приложении к СВЧ-электронике.

Оценивая возможности использования пучковых катодов из углеродных волокон, следует обратить внимание еще на два обстоятельства.

1. Измерения в работе [27] проводились в диодной системе, где торцы катодов устанавливались на малом расстоянии от анода 0.2–0.5 мм. Ток величиной 100 мА достигался при анодном напряжении 3.8 кВ. При отборе тока 100 мА давление в приборе за 10 секунд увеличивалось от начального, порядка 10^{-7} мм рт. ст., приблизительно до 10^{-4} мм рт. ст., после чего происходил пробой. Таким образом, очевидно, что при отборе больших токов происходило сильное газовыделение с анода, а также, возможно, и с углеродных волокон. В таких условиях трудно исключить явление газового усиления в зазоре катод – анод, а значит, трудно определить истинные значения тока автоэмиссии.

2. Совершенно не очевидна и не доказана высокая долговечность пучковых катодов в условиях технического вакуума. Для ее определения требуются дополнительные исследования.

3.2. Полевые эмиттеры из графита и эмиттеры с пленочными углеродными покрытиями. Делались попытки создания полевых эмиттеров на основе разных марок графита, в том числе, высокопрочного графита типа МПГ-6, пироуглерода, стеклографита и их производных [3], пористых углеродных материалов [28, 29]. Учитывая большую работу выхода углеродных материалов, заметную автоэмиссию, как правило, удается получать с усиливающим электрическое поле участков их поверхности.

У пористых катодов из разных наноуглеродных частиц [28, 29] усиление поля может быть достигнуто на неровностях поверхности эмиттера. Такие катоды обеспечивают малые токи при низких пороговых напряжениях, но не позволяют получать токи более нескольких сотен микроампер, даже с макроповерхности площадью порядка 1 см². Видимо, из-за малой связи частиц в такого типа катодах они быстро разрушаются пондеромоторными силами в сильных электрических полях.

Заметное усиление поля получается на кромке лезвийных катодов [30] из тонких пластин графита малой толщины (5–150 мкм). Для достижения усиления поля на поверхности катодов из графита с развитой поверхностью усиливающие поле неоднородности обычно создаются с помощью специальной их обработки. Испытаны разные методы обработки, включая механическую и эрозионную обработку, обработку потоком ионов большой (100–200 кэВ) энергии [31], а также термохимическое травление [32, 33]. Методами термохимического травления были созданы матричные катоды из стеклографита с упорядоченно распределенными по поверхности выступами высотой 10–15 мкм и с периодом решетки 20 мкм.

Как и в случае волоконных катодов, для стабилизации работы лезвийных катодов и других катодов из графита, а также для уменьшения уровня флуктуаций отбираемого с их поверхности тока автоэмиссии использовалась формовка катодов отбором тока с их поверхности. С лезвийных катодов длиной 2 мм и с толщиной кромки 30 мкм после формовки удавалось получать в статическом режиме токи эмиссии ориентированно до 6–8 мА [30], что недостаточно для эффективной работы существующих СВЧ-устройств.

Матричные катоды были испытаны [33] в импульсном режиме при длительности импульсов 20 мкс и скважности 1000. Была получена средняя плотность тока 0.3 А/см². Однако, видимо, авторам не удалось запустить никаких СВЧ-приборов. В работе [33] сообщается о возможностях увеличения средней плотности тока до (1–5) А/см², а также о ведущейся авторами разработке принципов конструирования электронных пушек для СВЧ-устройств на основе матричных стеклоуглеродных катодов.

Большой интерес для СВЧ-электроники представляют пленочные углеродные покрытия, исследованные в работах [34–36].

Пленочные углеродные покрытия в работе [34] создавались на разных подложках в результате высокотемпературного разложения (пиролиза) гептана. Исследования, выполненные методом туннельной микроскопии, показали, что разработанная авторами технология обеспечивает формирование на поверхности пленки сложных нанокластерных структур из углерода. Измерение тока автоэмиссии производилось в диоде с плоским анодом из пирографита диаметром 1 мм. Расстояние между анодом и поверхностью эмиттера было мало и варьировалось в пределах от 5 до 60 мкм. Давление в приборе поддерживалось на уровне $2 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Малые автоэмиссионные токи (< 10 мкА) начинали регистрироваться при чрезвычайно низких пороговых напряженностях электрического поля (около 0.2 В/мкм). В процессе измерения вольт-амперных характеристик уже при токах порядка 10 мкА и полях в несколько единиц В/мкм происходил унос с поверхности слабо связанных с нею наименьших по размерам углеродных кластеров. В результате вольт-амперная характеристика смещалась в область больших напряжений. Далее, в интервале полей от 6 до 30 В/мкм и при токах до 400 мкА с поверхности улетучивались образования большего размера. Для достижения еще больших токов измерения проводились в импульсном режиме при длительности импульсов 30 мкс и скважности импульсов 570. В таком режиме были достигнуты плотности тока эмиссии выше 1 А/см² при напряженности поля до 170 В/мкм. В импульсном режиме не было отмечено изменений рельефа поверхности. Из приведенных в работе [34] данных следует, что ее авторы получали в импульсном режиме полные токи до 10 мА с площади поверхности эмиттера около 10^{-2} см². Большие токи электронов, видимо, можно было бы получить, увеличивая площадь эмиттирующей поверхности. Казалось бы в связи с этим, авторы работы [34] близки к созданию устойчивых в условиях технического вакуума полевых эмиссионных систем для СВЧ-устройств. Однако приведенной в [34] информации недостаточно для того, чтобы надежно прогнозировать перспективы этих разработок. Недостаточно, в частности, информации о влиянии вторичных процессов в узких диодных зазорах использованных измерительных систем, а также о долговечности созданных катодов. Кроме того, авторами [34], видимо, не созданы еще электронные пушки, которые обеспечили бы формирование потока электронов с достаточно больших площадей.

В работах [35, 36] описаны углеродные пленки большой площади ($25 \times 25 \text{ mm}^2$), полученные с помощью двух модификаций плазменной CVD-техники. Созданные авторами [35, 36] пленки, видимо, имеют большую прочность по сравнению с описанными в работе [34]. На пленках формировались усиливающие электрическое поле неупорядоченные многоострийные или ребристые структуры. С нашей точки зрения, наибольший интерес представляют более однородные ребристые структуры. Судя по результатам наблюдения с помощью сканирующего электронного микроскопа (рис. 5), ребра, ориентированные преимущественно перпендикулярно поверхности подложки, имели длину, которая варьировалась в пределах 0.01–1 мкм. Их толщина у вершины измерялась десятками нанометров. Как показали измерения в диодной системе с люминесцирующим под действием электронной бомбардировки анодом, созданные катодные системы обеспечивали приблизительно однородную эмиссию со всей поверхности (рис. 6). Для практического использования пленочных катодных систем авторами [36] разработана оригинальная конструкция триодной электронной пушки с сеточным управлением эмиссией катода. Созданная ими тонкая (толщиной до 5 мкм) легированная бором алмазная сетка площадью 0.04 cm^2 имела прозрачность 50% и располагалась на расстоянии 40 мкм от катода. При напряжении на сетке около 250 В относительно катода удавалось получать ток эмиссии приблизительно до 6 мА, причем не только в импульсном, но и в статическом режиме. Даже кратковременная стабильность работы созданной пушки испытана только при токах около 0.6 мА.

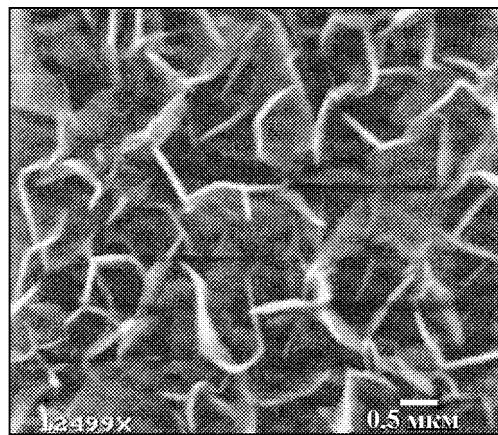


Рис. 5. Типичное изображение углеродного пленочного покрытия, полученное с помощью растрового электронного микроскопа

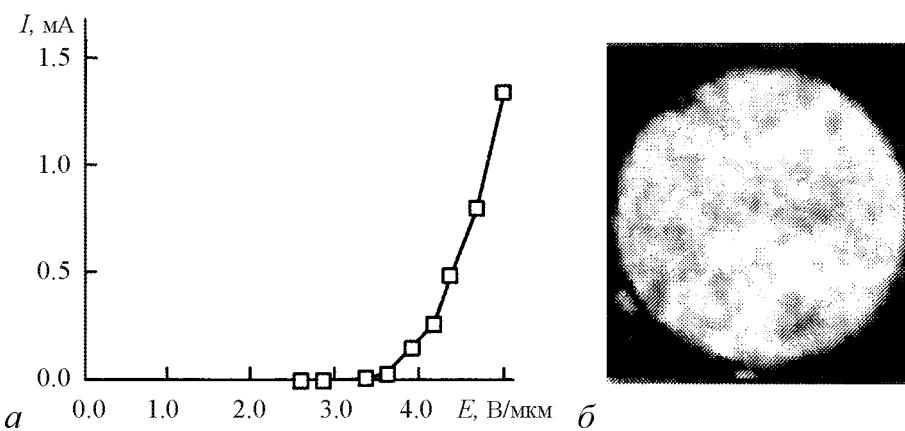


Рис. 6. Характеристики диода с люминесцирующим анодом: вольт-амперная кривая (слева) и эмиссионное изображение на аноде (справа)

Очевидно, что разработанные авторами [35, 36] катодные системы целесообразно будет использовать в СВЧ-устройствах, если удастся увеличить хотя бы в десятки раз обеспечиваемые ими токи эмиссии. К сожалению, для обеспечения столь большого увеличения токов требуется, видимо, значительно увеличить площадь управляющего сеточного электрода, что вряд ли возможно при малом расстоянии катод–сетка. Кроме того, если планировать использование разработанных авторами [35, 36] электронных пушек для формирования электронных потоков с энергиями более 1–3 кэВ в СВЧ-устройствах, работающих в техническом вакууме, надо будет доказать высокую долговечность созданных катодов и сеток в таких условиях.

3.3. Нанотрубные полевые эмиттеры. В последние годы большие усилия исследователей и конструкторов холодных катодов были направлены на изучение возможностей создания эффективных источников эмиссии на основе углеродных нанотруб.

К настоящему времени уже общепризнано, что углеродные нанотрубки, отличающиеся большим аспектным отношением (отношение длины к диаметру), малым радиусом вершины, высокой прочностью, высокими показателями тепло- и электропроводности, химической инертностью, являются хорошим материалом для создания полевых эмиттеров (см., например, [7]). Они идеально подходят в качестве источников эмиссии, например, для растровых микроскопов, где позволяют создать электронный поток высокой плотности и малого сечения и в связи с этим добиться высоких показателей пространственного разрешения.

Наиболее качественные одиночные многослойные нанотрубки могут стабильно работать при отборе тока полевой эмиссии в единицы микроампер и катастрофически быстро разрушаются лишь при токах порядка десятых долей миллиампера [37]. Однако, если требуются существенно большие токи, приходится создавать распределенные структуры из большого количества нанотруб, установленных приблизительно перпендикулярно к подложке. При изготовлении таких структур должен быть решен ряд сложных задач, связанных с необходимостью обеспечить высокую однородность тока эмиссии, прочное соединение нанотруб с подложкой и достаточно большое электрическое поле у их вершины.

Наилучшие по характеристикам нанотрубные структуры удается построить, используя отработанную к настоящему времени, но технологически сложную и дорогую плазменную CVD (plasma enhanced chemical vapour deposition) технику. При использовании этой техники нанотрубки выращиваются на созданной заранее матрице малых по размеру пятнышек («точек») из катализатора (например, железа или никеля) [38, 39]. Для создания пятен катализатора обычно применяется электронно-пучковая литография, при которой с высокой точностью задается расположение и размеры пятен. Меняя расстояния между пятнами и высоту нанотруб, можно регулировать эффект экранировки в созданной структуре и величину плотности тока эмиссии, отбираемого с каждой трубки. Удаётся создавать структуры практически одинаковых по диаметру и высоте нанотруб. В типичной структуре такого типа, показанной на рис. 7, максимальные относительные изменения высоты нанотруб имеют величину около 4% (49 ± 2 нм), а относительные изменения их диаметра несколько больше, но не превосходят 7% (5.9 ± 0.4 мкм). В такой структуре, как показывают измерения, выполненные с помощью тонкого штыревого анода, получается практически одинаковая эмиссия с разных нанотруб.

К сожалению, нанотрубки в структуре, выращенной по описанной выше методике, хуже по качеству (обладают большим количеством дефектов), чем нанотрубы, полученные в дуговом разряде или при лазерном распылении графита. Поэтому зачастую они могут быть разрушены при аномально малых токах. Длительное время они могут функционировать при токах менее 1 мА через каждую нанотрубу. Распределение тока эмиссии по структуре становится неоднородным даже при малых изменениях работы выхода поверхности нанотруб или в случае, когда неодинаково меняется под действием ионной бомбардировки форма их вершины. По указанным причинам в процессе функционирования описанной структуры ее

эмиссия может стать существенно неоднородной, например, из-за неоднородного оседания газов и паров, из-за неоднородной ионной бомбардировки или из-за разных дефектов материала нанотруб. По указанным причинам для обеспечения высокой долговечности упорядоченной структуры типа приведенной на рис. 7, видимо, необходимо обеспечить достаточно хорошие вакуумные условия и, по возможности, исключить электронную бомбардировку окружающих электродов, а также пробой между катодом и анодом. Эти требования становятся особо жесткими в условиях, когда требуется формировать поток электронов высокой энергии (см. раздел 2).

Нанотрубки нагреваются в процессе работы при отборе даже сравнительно небольшого тока. Так, по данным [40, 41], при отборе с многослойной нанотрубки тока в 1 мА она нагревается до температуры 2000 К. Как следует из выполненных в работе [42] расчетов, когда ток через нанотрубку превышает некоторое предельное значение, может развиться тепловая неустойчивость, приводящая к самопроизвольному нарастанию температуры кончика трубки и к ее термическому разрушению. По оценкам Г.С. Бочарова и А.В. Елецкого [42], тепловая неустойчивость развивается при токах через трубку порядка десятков микроампер, когда вследствие разогрева трубки, наряду с полевой, становится заметной термоэмиссия с ее кончика. Чтобы свести к минимуму нагрев нанотруб при отборе больших токов, они могут эксплуатироваться в импульсном режиме. Импульсный режим полезен и с той точки зрения, что позволяет уменьшить продолжительность бомбардировки нанотруб ионами остаточного газа.

В работе [43] указаны, видимо, рекордные показатели токоотбора с описанного типа структур с однослойными нанотрубками. В работе [43] на основе нанотрубной структуры создан рентгеновский источник. Поток электронов формировался триодной системой, где управляющая полевой эмиссией сетка с большой прозрачностью (80%) располагалась на расстоянии 50–200 мкм от поверхности структуры. Разность потенциалов между автоэмиссионным катодом и сеткой варьировалась в

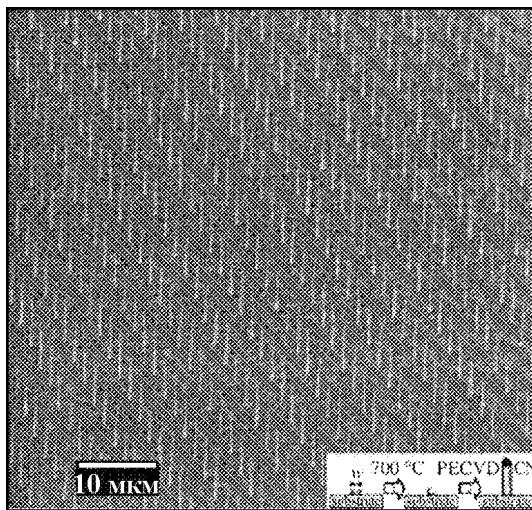


Рис. 7. Структура нанотруб, созданная с использованием плазменной CVD-техники. Нанотрубы выращивались на пятнах катализатора из никеля шириной 100 нм и толщиной 7 нм

пределах 450–610 В. Прошедшие сквозь сетку электроны ускорялись до энергии 14 кэВ и бомбардировали медный анод, вызывая тормозное излучение с его поверхности. В импульсном режиме (2 мс, 100 Гц) авторами получен ток эмиссии 28 мА с площади 0.2 см², что соответствует плотности тока эмиссии 140 мА/см². Видимо, это не предельный ток. Но надежно оценить на основании опубликованных данных максимально достижимые с помощью нанотрубных структур токи не представляется возможным. Для использования в СВЧ-устройствах нужны эмиттеры, обеспечивающие большие токи. Как и в работе [36], существенно повысить ток эмитированных электронов можно, увеличивая поперечные размеры всей системы, в том числе катода и сетки. Однако существенный рост поперечных размеров вряд ли возможен в условиях, когда необходимо обеспечить прецизионное крепление бомбардируемой электронами сетки на малом расстоянии от катода. Вероятно, именно трудности с созданием подходящего управляющего электрода препятствовали в работе [43] увеличению площади эмиттера.

Нужно сказать, что конструкции электронных пушек для описанного типа на нанотрубных катодов либо слабо отработаны, либо недостаточно описаны в литературе. Кажется, что наиболее органично подходят для формирования электронных потоков с нанотрубных катодов спиндтовские системы. Для реализации этой достаточно отработанной идеологии необходимо только научиться создавать нанотрубные

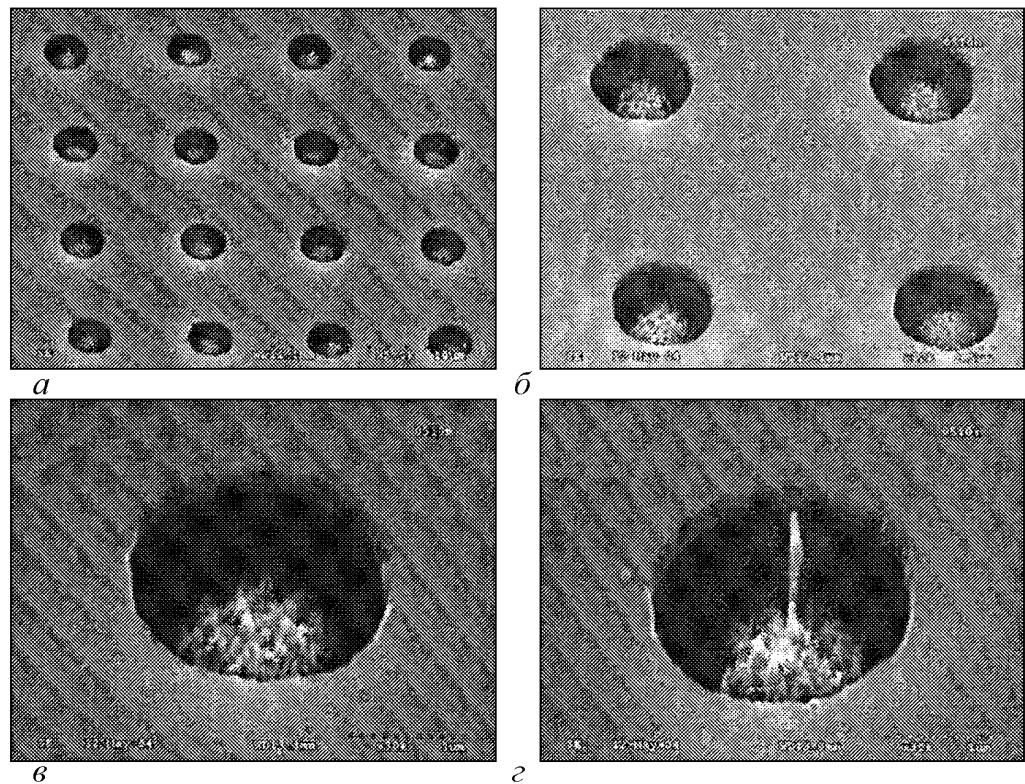


Рис. 8. Изображение катодной системы спиндтовского типа с нанотрубными эмиттерами, выращенными на дне ячеек микронных размеров: *а–в* – изображения, полученные при разном увеличении; *г* – пучок нанотруб с одной выделяющейся по высоте нанотрубкой

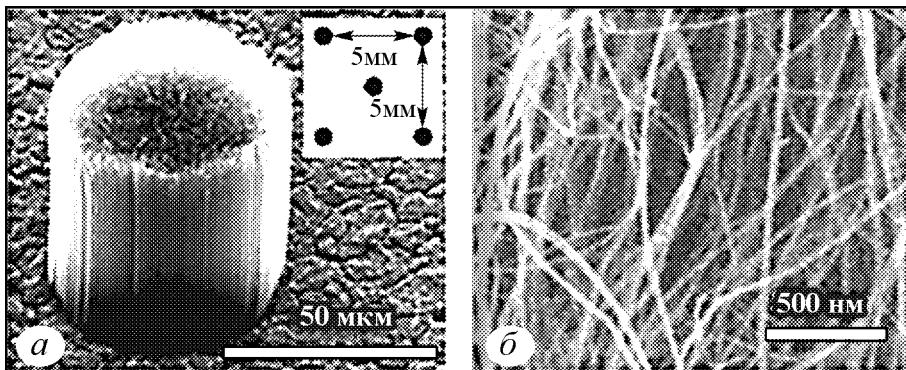


Рис. 9. *а* – пучок углеродных нанотруб (НТ) и расположение пяти пучков НТ на подложке (на вставке). *б* – увеличенное изображение боковой поверхности пучка

эмиттеры в ячейках спиндтовских систем. В последние годы появились работы, в которых продемонстрирована такая возможность. Так, например, в работе [44] создана спиндтовская катодная система, в каждой ячейке которой выращены углеродные нанотрубки. Изображения этой системы, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, показаны на рис. 8. При выбранных размерах ячеек и использованной технологии создания спиндтовской структуры в каждой ячейке формировался пучок близко расположенных нанотруб (рис. 8, *а*, *б*, *в*). Количество нанотруб в ячейке, по мнению авторов, можно менять, меняя размеры ячейки. Близкое расположение нанотруб в ячейке при полученной в эксперименте сглаженной границе пучка нанотруб уменьшает усиление электрического поля у поверхности пучка, и для отбора тока в таких системах требуются большие напряжения на управляемом электроде. Однако эмиттеры из пучка нанотруб могут обеспечить и преимущества при их использовании в высоковольтных электронных устройствах, где электроны ускоряются по выходе из катода напряжениями, существенно превышающими напряжение на управляемом электроде. В этом случае все равно энергия ионов, бомбардирующих катод, определяется полной пройденной разностью потенциалов. Существование же большого количества нанотруб в каждой ячейке обеспечивает потенциальную возможность «резервирования» эмиттеров. При неоднородной выработке нанотруб после разрушения одних нанотруб может усиливаться эмиссия с других. Таким образом может быть повышена долговечность всей катодной системы. Возможность такого резервирования рассматривается в работе [45]. Ее авторы создавали упорядоченно расположенные по поверхности подложки «колонны» из пучков нанотруб (рис. 9). Они обращают внимание на то, что при приблизительно плоской вершине колонны эмиссия должна преимущественно идти с края ее верхней границы, где электрическое поле существенно (почти в 4 раза) превышает поле в центре плоской вершины пучка нанотруб. В связи с этим в максимально напряженном режиме работают нанотрубы, расположенные по краю пучка. Если же они разрушаются, основной вклад в эмиссию начинают вносить цилиндрические слои нанотруб меньшего радиуса.

3.4. Полевые эмиттеры с алмазными, алмазоподобными и некоторыми другими типами неупорядоченных наноуглеродных покрытий. В любых углеродных образованиях возможны три основных типа связей между электронами, которые характеризуются типами гибридизации sp^3 , sp^2 и sp [3]. Гибридизация sp^3 соответствует идеальной структуре алмаза, гибридизация sp^2 имеет место у слои-

стых углеродных структур, гибридизация sp характерна для карбидов. К настоящему времени разработаны методы создания алмазных пленок, практически свободных от других углеродных фаз, а также алмазоподобных пленок, где присутствуют алмазная (sp^3) и неалмазная (sp^2) фазы. Пленки из крупных алмазных кристаллов не используются для получения полевой эмиссии из-за малой их проводимости, поскольку алмаз – полупроводник с большой запрещенной зоной. Мелкодисперсные алмазные пленки обладают существенно большей проводимостью, которая определяется, видимо, проводимостью по границам алмазов малого размера [46]. Проводимость алмазоподобной пленки определяется соотношением sp^3 и sp^2 фаз, концентрацией в пленке разного сорта дефектов и примесей, а также ее микроструктурой. Алмазоподобные пленки, которые используются для создания автоэмиттеров, обычно обладают высокой проводимостью.

Как следует из литературных данных (см., например, [3, 46–49]), автоэмиссия алмазных и алмазоподобных пленок существенно зависит от способа их нанесения и обработки. Эмиссия неоднородна по поверхности и идет из ограниченного количества эмиссионных центров малой площади. Специальные измерения, выполненные методом сканирующей туннельной микроскопии [47–49], свидетельствуют, что в этих центрах достигаются большие по величине плотности тока эмиссии – до единиц ампер с квадратного сантиметра.

Существуют данные [3], свидетельствующие о том, что эмиссионные характеристики алмазоподобных пленок улучшаются при уменьшении размеров алмазных зерен. Принципиально можно ожидать, что эмиссия с мелкодисперсных пленок будет более однородной. В связи с этим в последние годы исследуются ультрананодисперсные пленки [46, 50]. В работе [46] алмазные пленки с кристалликами алмаза размером 2–5 нм создавались на острийных эмиттерах из кремния. Покрытия наносились с использованием высокочастотной CVD плазменной технологии на острие с радиусом вершины 25 нм. На рис. 10 показаны изображения эмиттеров с покрытиями разной толщины. Толщина покрытий определялась на основании этих изображений. Эмиссия с острия измерялась в диодной системе, где торец молибденового анода, изготовленного в виде стержня диаметром 1.89 мм со скругленной вершиной, располагался на расстояниях 50–200 мкм от катода. На основании измерений при малых токах ($\leq 10^{-7}$ А) было установлено, что для получения фиксированного

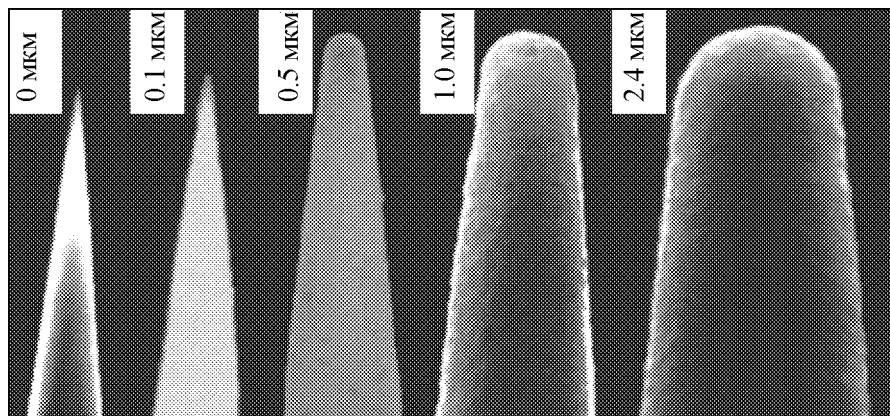


Рис. 10. Изображения эмиттеров из кремния с ультрананодисперсными алмазными покрытиями разной толщины. Диаметр вершины кремниевого острия 25 нм

тока полевой эмиссии требуется минимальные напряжения при оптимальной толщине покрытия около 0.5 мкм. На рис. 11 показаны вольт-амперные характеристики остряя, полученные в этих измерениях при разных толщинах покрытия. Предельные токи эмиссии в этой работе не определялись, но измерения проводились в широком интервале токов. На рис. 12 показаны вольт-амперные характеристики, измеренные при токах с одиночного остряя до 100 мкА и покрытиях от 0.5 до 2.4 мкм. При меньших толщинах покрытия кремниевое остряе «выгорало» уже при токах менее 1 мкА. В измерениях с большими токами эмиссии было установлено, что при толщинах покрытия больше 0.5 мкм с увеличением толщины покрытия увеличивалось напряжение, требующееся для отбора фиксированного тока. Это явление авторы объясняют ростом с толщиной покрытия падения напряжения на нем и уменьшением в связи с этим величины электрического поля на границе остряе – вакуум. Авторы полагают, что в проведенных измерениях ток на анод собирался не только с вершиной, но и с боковой поверхности остряя. Они считают, что иначе практически невозможно объяснить, как может выдержать острый эмиттер огромную (порядка 10^6 Вт/см²) величину отбираемой мощности. Желание авторов объяснить явление понятно. Но кажется неправдоподобным, чтобы при избранной конфигурации электродов диода ток эмиссии с боковой поверхности катода существенно превышал ток с его вершиной.

Выполненные при начальном токе 100 мкА измерения временной стабильности эмиссии (рис. 13) показали, что ток сначала быстро уменьшается

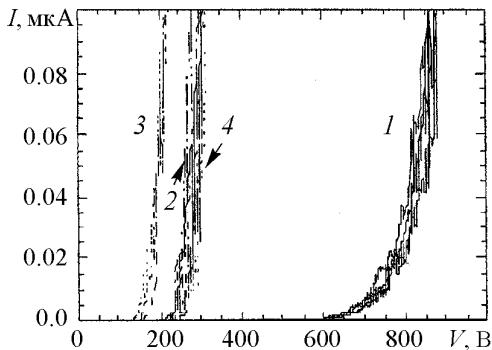


Рис. 11. Вольт-амперные характеристики кремниевого остряного эмиттера с алмазными покрытиями разной толщины, мкм: 1 – 0; 2 – 0.1; 3 – 0.5; 4 – 2.4. При каждой толщине покрытия характеристики измерялись 4 раза (два раза в одну сторону и два раза в другую)

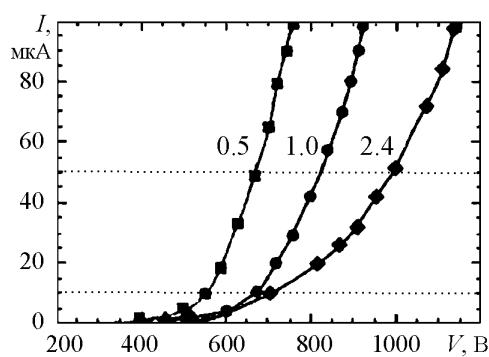


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики кремниевого остряного эмиттера с алмазными покрытиями толщиной 0.5, 1.0 и 2.4 мкм, измеренные при токах эмиссии до 100 мкА

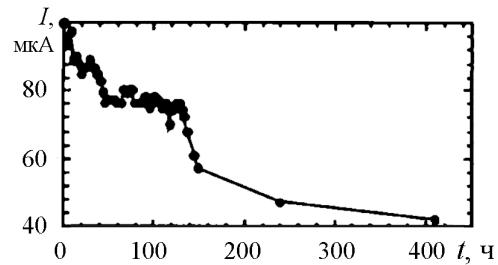


Рис. 13. Изменение во времени тока эмиссии с кремниевого остряя с алмазным покрытием толщиной 1 мкм. Характеристика измерена при постоянном напряжении 1200 В. Расстояние между катодом и анодом 60 мкм

до 55 мкА, а затем его падение становится более медленным. Механизм падения эмиссии в работе не определен. Временные измерения проводились для острия длиной 60 мкм с покрытием толщиной 1 мкм при фиксированном анодном напряжении 1200 В. Анод располагался на расстоянии 60 мкм от вершины острия.

Хотелось бы обратить внимание, что в этой работе, как и в большинстве других исследований полевой эмиссии с углеродных материалов, используются очень малые зазоры между катодом и анодом. В связи с этим, во всяком случае при отборе больших по величине токов с острия, трудно избежать развития ряда паразитных явлений в этом зазоре, которые могут помешать выявлению закономерностей собственно полевой эмиссии. В описанных временных измерениях при начальном токе 100 мкА среднее поле между катодом и анодом (не усиленное на неоднородностях поверхности этих электродов) превышало 10^5 В/см. При этом, даже если принять данное авторами объяснение того, почему острие выдерживает отбор большого тока эмиссии, следует учесть, что плотность мощности, выделяемой на аноде, тоже очень велика и имеет величину порядка 10^9 Вт/см². В таких напряженных условиях трудно избежать сильного нагрева катода и анода, десорбции вещества с поверхности анода, локального увеличения давления в диодном зазоре, газового усиления потока электронов с катода и т.п. В связи со сказанным, не умаляя значимости очень интересной работы [46], хотелось бы иметь данные об эмиссионных характеристиках катодов с алмазными покрытиями, полученные в условиях, когда паразитные явления исключены или хотя бы минимизированы.

Несмотря на уже довольно длительную историю исследований, потенциальные возможности совершенствования катодов с алмазными и алмазоподобными пленочными покрытиями еще, видимо, не исчерпаны. Насколько нам известно, пока не удавалось получать большие токи эмиссии даже с алмазных или алмазоподобных пленок большой площади. Однако покрытия исследованных систем такого типа, возможно, не оптимальны. Одиночные острийные катоды с наилучшими по качеству покрытиями, описанные в работе [46], обеспечивают токи порядка десятков микроампер, недостаточные для пуска СВЧ-приборов. Тем не менее, очевидно, что они представляют значительный интерес для СВЧ-электроники. Действительно, если, например, будут созданы структуры спиндтовского типа с катодами, описанными в работе [46], можно ожидать, что с помощью таких структур удастся получать большие токи, чем со стандартных молибденовых катодов спиндтовской структуры, которую пытались использовать при создании ЛБВ в работе [22]. Пока непонятно, могут ли быть достаточно долговечными катоды на основе спиндтовских структур при их использовании в условиях технического вакуума в высоковольтных устройствах, причем при отборе с них больших токов. Кажется, однако, что катоды с защитными покрытиями должны быть более долговечны в таких условиях, чем металлические.

Алмазные и алмазоподобные пленки, как и многие другие углеродные эмиттеры, отличаются низкими порогами появления автоэмиссии (см., например, [3, 46, 50]). Возможно, это не очень важно в приложении к высоковольтной СВЧ-электронике. Тем не менее остановимся кратко на этой характеристике пленочных катодов, поскольку это необходимо для понимания физики происходящих в них процессов. Экспериментальные исследования свидетельствуют, что пороговые напряжения, необходимые для получения фиксированных и достаточно малых токов, уменьшаются при увеличении шероховатости поверхности пленки и при уменьшении размера образу-

ющих пленку зерен. Первое, очевидно, связано с усилением поля на неоднородностях поверхности, а второе требует специального объяснения.

Пороговые напряжения бывают малы не только у сильно шероховатых, но и у достаточно гладких пленок. Казалось возможным объяснить низкие пороги полевой эмиссии алмазных и алмазоподобных пленок тем, что алмазная фаза пленок может иметь в силу отрицательного электронного сродства чрезвычайно малую работу выхода [3]. Однако такое объяснение представляется не вполне убедительным. Этому противоречит, в частности, тот факт, что пленки, характеризующиеся низким порогом автоэмиссии, не позволяют получить заметную термоэмиссию при низких температурах. Кроме того, аномально низкие пороги автоэмиссии регистрировались и у других типов полевых эмиттеров из углеродных материалов, в которых практически отсутствует алмазная фаза. Так, например, многими авторами, исследовавшими катоды с неупорядоченными пленочными покрытиями из углеродных нанотруб (см., например, [3, 51, 52]), тоже отмечались низкие пороги появления автоэмиссии. Существует множество способов нанесения таких покрытий, например, в каком-либо биндере или осаждением непосредственно на подложку из дугового разряда с графитовым электродом. Но независимо от способа нанесения нанотрубных покрытий и независимо от того, как ориентированы нанотрубы, а также от того, нанесены ли однослойные, многослойные нанотрубы или их смесь, все покрытия такого сорта неизменно демонстрируют низкие пороги автоэмиссии, в том числе и в условиях, когда невелик фактор усиления поля. Таким образом, ясно, что нужно искать объяснение низких порогов автоэмиссии, не связанное с существованием алмазной фазы в покрытии.

В работах [53, 54] было предложено другое и более правдоподобное объяснение, во всяком случае, для покрытий с полупроводниковым типом проводимости. Авторы этих работ связывали низкие пороги полевой эмиссии с возникновением в приповерхностном слое покрытия сильных электрических полей, обусловленных накоплением отрицательного заряда в глубоких ловушках и на дефектах покрытия, а также связанных с поляризацией адсорбированных на поверхности дипольных молекул.

Завершая данный параграф, хотелось бы сказать несколько слов о временной стабильности эмиссионных характеристик рассмотренных пленочных покрытий. К сожалению, данных о временной стабильности эмиссии такого сорта покрытий мало. Воспользуемся для оценки временной стабильности наиболее современными данными [50], полученными для хорошо зарекомендовавших себя (см. [46]) ультрананодисперсных алмазных и алмазоподобных пленок.

В работе [50] исследовалась временная стабильность пленок, нанесенных с использованием высокочастотной плазменной CVD-методики на полированную подложку из молибдена, обработанную предварительно алмазным порошком. Изменение содержания аргона в плазме позволяло изменять соотношение алмазной (sp^3) и неалмазной (sp^2) фаз в покрытии. Измерялись как высокочастотные (мегагерцового диапазона частот), так и медленные флуктуации тока эмиссии. Измерения проводились в диодной системе с молибденовым анодом диаметром 3 мм, расположенным на расстоянии 100 ± 2 мкм от поверхности катода, и обычно продолжались в течение 2 часов при анодном напряжении, обеспечивающем начальный ток эмиссии порядка 16 мкА. Как показали измерения, относительные высокочастотные изменения

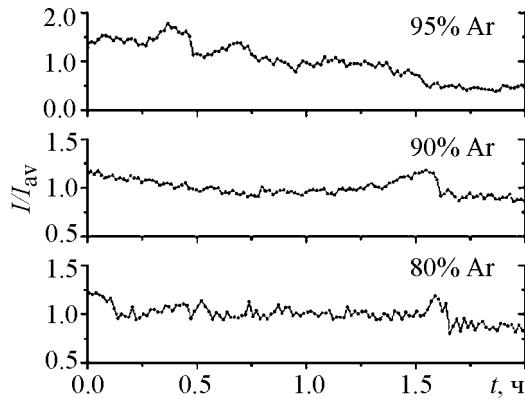


Рис. 14. Изменение во времени отношения I/I_{av} тока с катода к среднему его значению. Характеристики получены в разряде с разным содержанием аргона тока с алмазоподобной пленки (95% Ar) достигали 45%. Таким образом, проведенные измерения флюктуаций тока исследованных мелкодисперсных пленок свидетельствуют о лучшем качестве алмазных пленок, хотя для всех пленок флюктуации тока довольно велики.

Учитывая сильное влияние на качество эмиттеров условий формирования покрытий, трудно оценить, насколько общи выводы, следующие из работы [50], даже применительно только к ультрананодисперсным алмазным и алмазоподобным покрытиям. К тому же, из измерения временных изменений токов для другого типа углеродных эмиттеров [3, 46] следует, что временная стабильность эмиссии практически любых углеродных и содержащих углерод катодов может быть существенно улучшена в результате длительной их тренировки с отбором тока. В данном же случае длительная тренировка, видимо, не проводилась.

3.5. Активировка углеродных и содержащих углерод покрытий. Рассмотренные нами ранее покрытия имеют большую работу выхода, которая меняется для разных углеродных материалов приблизительно от 4.6 до 5 эВ или даже более. Именно поэтому, чтобы работать с созданными на их основе полевыми эмиттерами при умеренных значениях рабочего напряжения, приходится создавать на поверхности углеродных эмиттеров усиливающие электрическое поле структуры. По этой же причине во многих исследованиях предельно уменьшают расстояние между катодом и анодом.

Понизить напряжения, необходимые для получения фиксированных токов эмиссии с углеродных и содержащих углерод материалов, можно и другим методом, понижая их работу выхода с помощью каких-либо активаторов. В этом случае, если сохранится прочность материала, из которого изготовлен катод, следует ожидать не только повышения долговечности создаваемых полевых эмиттеров, но и достижения больших предельных токов эмиссии с их поверхности. Действительно, пондеромоторные силы, «ссылающие» с катода наиболее эффективно эмиттирующие выступы, пропорциональны квадрату электрического поля у их поверхности. Снижая же работу выхода поверхности эмиссионной структуры, принципиально можно получить большие токи при электрических полях меньше предельного, ведущего к ее разрушению.

тока для всех исследованных пленок не превышали 1%. Типичные долговременные относительные изменения тока эмиссии для пленок разного состава иллюстрирует рис. 14. Здесь I/I_{av} – отношение тока с катода к среднему его значению. Согласно результатам рамановской спектроскопии, пленки, полученные в разряде с 80% и 90% содержанием Ar, практически чисто алмазные. Пленка же с 95% Ar содержит смесь алмазной и графитовой фаз. Наименьшие флюктуации тока, около 15%, были отмечены для алмазной пленки с содержанием аргона 90%. Флюктуации же тока с алмазоподобной пленки (95% Ar) достигали 45%. Таким образом, проведенные измерения флюктуаций тока исследованных мелкодисперсных пленок свидетельствуют о лучшем качестве алмазных пленок, хотя для всех пленок флюктуации тока довольно велики.

Уже довольно давно делаются попытки использовать разные методы активировки углеродных и содержащих углерод эмиттеров. К сожалению, пока не выработаны достаточно общие принципы активировки. К тому же, подобные исследования немногочисленны, а сделанные на их основе выводы не всегда достаточно обоснованы. Тем не менее, опишем кратко некоторые методы, представляющие практический интерес.

В работе [55] сообщается о многочисленных попытках допирования нанотрубных и других нанокластерных пленок атомами бария, свинца, цинка и других элементов и приведены свидетельства того, что допирование пленок, например свинцом, снижает их работу выхода.

В середине 1990-х годов проводились исследования воздействия бомбардировки ионами калия на проводимость твердого тела из молекул C_{60} (фуллерита) [56] и фуллереновых пленок на разных подложках [57]. Бомбардировка осуществлялась ионами с энергией 30 кэВ. Была выявлена возможность заметного изменения проводимости при внедрении калия в твердое тело. Эти исследования не имеют прямого отношения к полевой эмиссии, но косвенно свидетельствуют о влиянии внедренных атомов калия на электронную структуру обработанных образцов.

В работе [58] впервые, насколько нам известно, было изучено влияние интеркаляции атомами Cs на работу выхода нанотрубных покрытий. Пленки толщиной около 0.5 мкм из однослойных углеродных нанотруб, созданные в результате лазерного облучения графита, наносились с помощью пульверизатора на подложку из GaAs. После этого на поверхность пленки напылялся цезий. С помощью фотоэмиссионной спектроскопии измерялась работа выхода чистой пленки и пленки, обработанной потоком атомов цезия. Прежде всего, было установлено, что работа выхода однослойных нанотруб имеет величину 4.8 эВ, то есть больше, чем у графита (4.6–4.7 эВ). Напыление атомов цезия приводило к падению работы выхода до 2.4 эВ.

Влияние бомбардировки медленными ионами Cs на эмиссионные характеристики графита и углеродных волокон исследовалось в работе [59]. Относительное изменение работы выхода определялось по изменению наклона измеренных характеристик Фаулера–Нордгейма. Было обнаружено падение работы выхода углеродных волокон в 1.5 раза и графита в 2.0 раза в результате обработки их поверхности ионами цезия с энергией 25 эВ. Однако в процессе отбора тока автоэмиссии работа выхода увеличивалась. В связи с этим авторы делают вывод, что для достижения долговременного снижения работы выхода необходима многоступенчатая обработка ионами разных энергий, обеспечивающая «относительно равномерное распределение Cs по объему материала».

Описанные в [58, 59] способы активировки, как нам кажется, вряд ли могут привести к долговременному снижению работы выхода полевых эмиттеров. Действительно, активирующее вещество должно сильно влиять на работу выхода поверхности только до тех пор, пока оно находится на поверхности. На самом деле атомы цезия, проникшие вглубь нанотрубной пленки или вглубь графитовых образцов любой природы, практически не должны влиять на эмиссию электронов. На поверхности же такого сорта цезиевые покрытия не могут держаться длительное время из-за слабой связи с поверхностью, а также потому, что должны разрушаться под действием ионной бомбардировки. Неудивительно поэтому, что в последнее время ведется поиск более стойких активирующих покрытий и методов активировки.

Заслуживают внимания выявленные возможности изменения электронной структуры углеродных нанотруб при внедрении в них калия [60], а также внедрения атомов калия в молекулы фуллерена [61]. Представляют также интерес предложения формировать на поверхности углеродных эмиттеров слои карбида молибдена Mo_2C [62] и иодида цезия (CsI) [63]. Возможность использовать в качестве покрытия слоев карбида молибдена, имеющего меньшую работу выхода (3.5–3.8 эВ), чем у углерода, продемонстрирована экспериментально [62]. Свойства же иодида цезия авторы [63] пока оценили на основании проведенных численных расчетов. Они пришли к выводу, что покрытие слоем иодида цезия должно снижать работу выхода до 1.2–1.4 эВ. К сожалению, однако, надежность выполненных расчетов на основе краткой публикации оценить трудно.

Уже проведенное рассмотрение говорит о больших потенциальных возможностях улучшения качества углеродных полевых эмиттеров за счет снижения их работы выхода, но имеющейся информации пока мало для реализации хотя бы одного из методов. В существующих публикациях практически отсутствуют данные, которые позволили бы оценить, например, долговечность активированных эмиттеров, их прочность и устойчивость к отбору больших автоэмиссионных токов, а также их химическую стойкость в условиях технического вакуума. Все это требует дальнейшего изучения. Мы ограничимся уже сделанным рассмотрением и продемонстрируем возможности одного из перспективных методов активировки в следующем разделе, рассказывая о разработке и исследовании эмиттеров с фуллереновыми покрытиями в СПбГПУ.

3.6. Эмиттеры с фуллереновыми покрытиями. Разработка методов создания и исследование защитных покрытий из молекул фуллерена C_{60} начато на кафедре физической электроники СПбГПУ авторами данной статьи с сотрудниками в 1997 г. Первые результаты этих исследований были доложены на международной межвузовской конференции UHF-99 в Санкт-Петербурге в 1999 г. К тому времени во всем мире уже широким фронтом шли исследования, нацеленные на создание

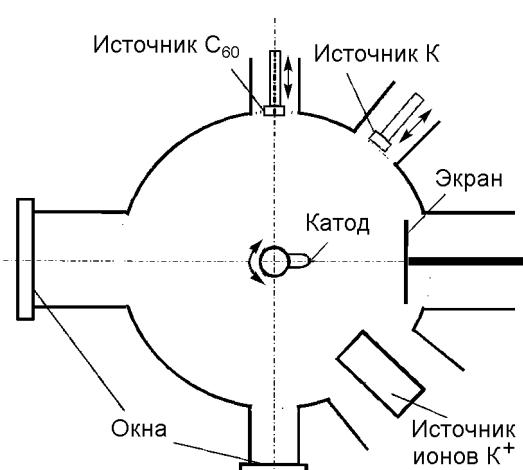


Рис. 15. Схематическое изображение сечения экспериментального прибора

эффективных полевых эмиттеров из углеродных и содержащих углерод материалов, но эмиссионные характеристики фуллереновых пленок изучены не были.

В наших работах были изучены закономерности формирования и эмиссионные свойства фуллереновых покрытий острийных полевых эмиттеров из чистого вольфрама и из вольфрама со слоем карбида вольфрама на поверхности. Кроме того, были изучены возможности активировки фуллереновых покрытий потоками атомов и ионов калия. Диаметр вершины острия варьировался в пределах 0.1–2 мкм. Исследования проводились с использованием многофункциональной вакуумной установки с полевым

эмиссионным микроскопом, который позволяет оперативно и с высоким разрешением ($\sim 1.5\text{--}2$ нм) контролировать рельеф поверхности катода и пространственное распределение потока электронов, эмитированных с этой поверхности. На рис. 15 схематически показано сечение вакуумной камеры, в которой проводились основные эксперименты. Изображены катод на подвижной подвеске, люминесцирующий экран, а также источники фуллереновых молекул, атомов калия и ионов калия. Были предусмотрены возможности поворота катода к источникам фуллереновых молекул, атомов калия и ионов калия, а также к экрану.

Фуллереновые покрытия напылялись на поверхность катода из ячейки Кнудсена. Экран микроскопа, выполнявший роль анода, обычно располагался на расстоянии около 3 см от катода. Тем не менее, в связи с большим усилением поля на острие основные измерения удавалось проводить при умеренных анодных напряжениях, менее 10 кВ. Давление в вакуумной камере можно было оперативно варьировать в широких пределах, приблизительно от 10^{-5} до 10^{-10} мм рт. ст. Основные измерения выполнялись при давлении 10^{-9} мм рт. ст. Чтобы выявить влияние на работу созданных покрытий ионной бомбардировки и газовой среды, часть измерений проводилась при повышенных давлениях остаточного газа вплоть до 10^{-5} мм рт. ст.

Исследования показали, что работа выхода фуллереновых пленок имеет величину около 5 эВ, то есть превышает работу выхода вольфрама. Поэтому нанесение фуллереновых покрытий толщиной более 1 монослоя (мс) неизбежно ведет к увеличению напряжений U_I , необходимых для получения фиксированного тока эмиссии I . Однако эти напряжения можно существенно понизить, создавая на поверхности покрытия усиливающие электрическое поле выступы.

Была разработана методика термической и полевой обработки покрытий, которая позволяла создавать одиночные выступы и распределенные структуры из нескольких десятков выступов, приблизительно одинаковых по поперечным размерам и высоте [64–67]. На рис. 16 показаны исходные эмиссионные изображения монокристалла вольфрама на вершине вольфрамового острия и так называемого ребристого кристалла для острия со слоем карбида вольфрама на поверхности. На рис. 17 приведены изображения ребристого кристалла с разным рельефом фуллеренового (C_{60}) покрытия, в том числе, с одиночным ярко эмитирующим выступом (рис. 17, δ) и с распределенной структурой выступов (рис. 17, ϵ). При формировании структур использовалось перемещение поляризованных молекул C_{60} в неоднородных электрических полях. Обычно такая формовка покрытий становится возможной в довольно сильных полях, порядка $(1\text{--}2)\cdot 10^7$ В/см. В измерениях с одиночными выступами были определены предельные плотности токов эмиссии, которые выдерживает

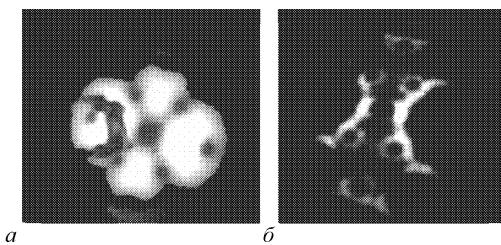


Рис. 16. Эмиссионные изображения монокристалла вольфрама на вершине острия (a) и ребристого кристалла со слоем карбида вольфрама на поверхности (b)

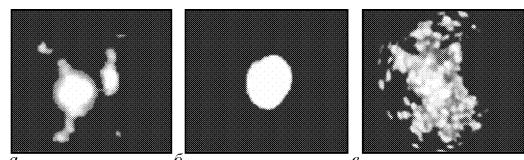


Рис. 17. Эмиссионные изображения ребристого кристалла с фуллереновыми структурами: a – микровыступы на ребрах; б – одиночный центр, обеспечивающий плотности токов до 10^7 А/см²; в – распределенная микрокластерная структура, позволяющая получать в статическом режиме токи до 100–150 мА

фуллереновый выступ с характерным поперечным размером 1–1.5 нм до своего разрушения. Оказалось, что предельные плотности токов эмиссии достигают значений $5 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$, то есть приблизительно на порядок меньше предельных плотностей тока эмиссии, характерных для вольфрамовых острей [10]. Наибольшие предельные токи получались с распределенных фуллереновых структур, созданных на острие со слоем карбида вольфрама на поверхности. С острия диаметром 0.3–0.5 мкм удавалось получать токи до 100–150 мкА в статическом и до 1–2 мА в импульсном режиме (2 мкс, 100 Гц).

Для понижения рабочих напряжений фуллереновые покрытия обрабатывались потоками атомов и ионов калия [68–70]. Напыление атомов калия приводит к падению характерных напряжений, необходимых для отбора фиксированных значений тока эмиссии. Иллюстрирует процесс активировки рис. 18, *a*, на котором показано типичное изменение величины напряжения, необходимого для получения тока 0.002 мкА, от времени нанесения покрытия. Скорость падения этого напряжения зависит от скорости напыления (характеристика 1 рис. 18, *a* измерена при большей скорости напыления, чем характеристика 2). Падение напряжения зависит от температуры эмиттера во время напыления. Напряжение может уменьшаться в 4–5 раз. Однако после окончания процесса напыления, даже при комнатной температуре, напряжение увеличивается (кривая 2 рис. 18, *b*) и через 25–50 часов падение напряжения по сравнению с исходным, характерным для фуллеренового покрытия, уже не превышает 20–25%. Такая дезактивировка связана с уходом калия с поверхности покрытия. Перераспределение калия обусловлено его миграцией и существенно ускоряется с ростом температуры эмиттера. Например, при температуре 650 К перераспределение калия успевает происходить уже в процессе его напыления (кривая 3 рис. 18, *b*).

Гораздо лучшие результаты достигаются при обработке фуллереновых покрытий потоком ионов калия. В специальных экспериментах были оптимизированы режимы активировки покрытий потоком ионов калия. Наибольшее, причем долговременное, снижение рабочих напряжений достигается в результате многоступенчатого процесса, в котором чередуются напыления фуллереновых покрытий и их обработка потоком ионов калия. Оказывают также влияние на качество обработки энергия

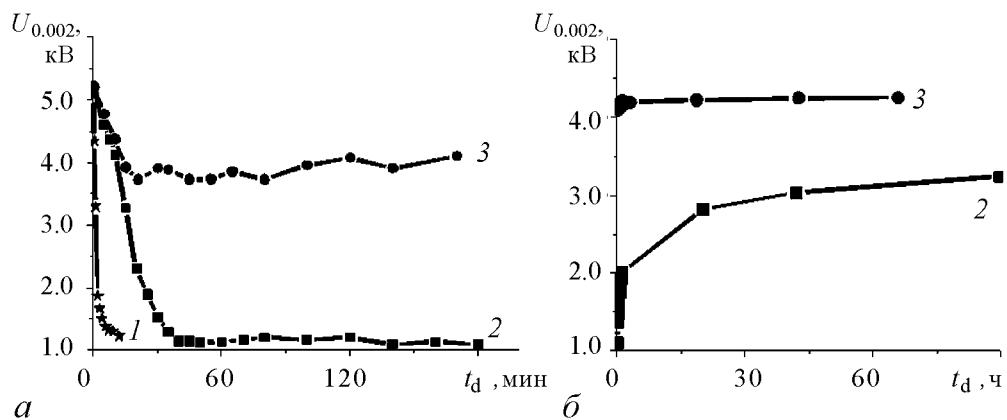


Рис. 18. *a* – Кривые напыления $U_{0.002}(t_d)$ калия на ребристый кристалл, покрытый слоем C_{60} толщиной $\theta = 2$ мс. Характеристики 1 и 2 измерены при разных скоростях напыления на катод при комнатной его температуре. Характеристика 3 измерена при температуре катода 650 К. *б* – 2 и 3 – характеристики дезактивировки $U_{0.002}(t)$ покрытий 2 и 3 рис. *a*

ионов W_i и продолжительность ионной обработки τ при фиксированной плотности потока ионов на катод ($5 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$), а также температура T катода во время нанесения фуллеренового покрытия. При оптимальных значениях $W_i = 40\text{--}90 \text{ эВ}$, $\tau = 1 \text{ час}$ и $T = 500\text{--}600 \text{ К}$ снижение характерного напряжения было более чем в два раза. При отборе малых токов менее 1 мА достигнутая активировка практически не менялась в течение длительного времени.

Полученная устойчивая активировка фуллереновых покрытий связывается на-ми с формированием в покрытии образований типа эндо- ($\text{K}@\text{C}_{60}$) и экзоэдралов ($\text{C}_{60}@\text{K}$), снижающих работу выхода покрытия. Возможность образования таких соединений при бомбардировке молекул C_{60} ионами калия с энергией в несколько десятков электрон-вольт отмечалась ранее в работе [61]. Такие образования имеют гораздо меньшую подвижность, чем атомы калия, и при низких температурах практически не перемещаются по покрытию.

Была испытана работа эмиттеров с активированными потоком ионов калия фуллереновыми покрытиями при отборе больших токов и в сильных электрических полях [71]. Проведенные эксперименты показали, что предельные токи с активированных потоком медленных ионов фуллереновых покрытий меньше, чем для покрытий, необработанных ионами калия. Эмиттеры с обработанными потоком медленных ионов покрытиями могут работать при токах порядка 20–30 мА. При больших токах в существовавшей до этого распределенной структуре выступов происходит формирование небольшого количества (1–3) ярко эмиттирующих центров, ток при фиксированном напряжении увеличивается, а затем происходит срыв покрытия или кончика острия. Уменьшение предельных токов мы связываем с внедрением атомов калия в покрытие, с уменьшением прочности покрытия и/или с ухудшением связи покрытия с подложкой.

Была испытана возможность повышения сцепления покрытия с подложкой за счет ионной обработки поверхности подложки перед нанесением покрытия. Измерения показали, что бомбардировка ионами калия с энергией 1500–5000 эВ заметно модифицирует поверхность ребристого кристалла. На рис. 19 можно сравнить изображения ребристого кристалла до бомбардировки ионами калия с энергией 1500 эВ (рис. 19, *а*) и после ее завершения (рис. 19, *б*). Эмиссионные изображения острия остаются существенно отличными от исходного после длительной (40 часов) выдержки в остаточном газе (рис. 19, *в*), а также после прогрева при температуре 850 К (рис. 19, *г*). Поэтому можно думать, что отмеченные изменения эмиссионных изображений обусловлены, в основном, изменением рельефа поверхности, а не изменением ее эмиссионных характеристик из-за осаждения калия в процессе ионной бомбардировки. Проведенные к настоящему времени эксперименты свидетельствуют, с нашей точки зрения, что проведенная обработка подложки потоком ионов дает положительный результат. После обработки удается увеличивать токи эмиссии ориентированно до 50–60 мА.

Как показали измерения, бомбардировка быстрыми ионами может быть использована и для улучшения структуры поверхности уже созданных и активированных фуллереновых покрытий. Так, после образования на поверхности эмиттера в процессе отбора больших токов выделенных по эмиссионной способности центров, бомбардировка этой поверхности потоком ионов калия с энергией 1500–5000 эВ позволяет повысить однородность распределенной структуры.

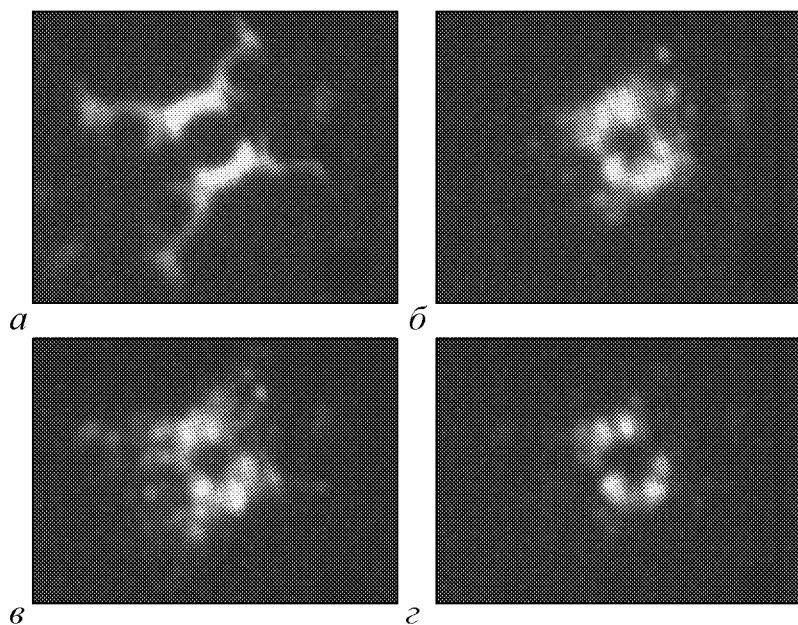


Рис. 19. Ребристый кристалл до (a) и сразу после обработки потоком ионов (б), после выдержки в остаточном газе в течение 40 часов (в), а затем после прогрева при температуре 850 К. Энергия ионов 1500 эВ. Продолжительность обработки 2 часа

Повышается однородность структуры эмиссионных центров на поверхности активированной фуллереновой пленки и в процессе ее работы с отбором тока эмиссии при повышенных давлениях газа, порядка 10^{-7} – 10^{-6} мм рт. ст. Такое изменение структуры поверхности эмиттера мы связываем с бомбардировкой поверхности ионами остаточных газов. Созданная при повышенном давлении однородная структура сохраняется после откачки до давления 10^{-9} мм рт. ст.

Завершая описание результатов исследования полевых эмиттеров с фуллереновыми покрытиями, хотелось бы обратить внимание на их существенное отличие от других известных нам углеродных и содержащих углерод полевых эмиттеров. Фуллереновая молекула отличается прочными связями атомов углерода в ней [72]. Энергия связи атомов углерода в молекуле C_{60} равна 6.99 эВ/атом. С другой стороны, связи этих молекул с твердотельной подложкой значительно слабее [73]. Например, энергия связи термически нанесенной пленки C_{60} с графитовой подложкой всего 1.69 эВ. Связи между молекулами тоже слабые (Ван-дер-Ваальсовские). По этой причине фуллереновым пленкам свойственна своеобразная саморегулировка, которая делает ее устойчивой к ионной бомбардировке. Как следует из наших данных, ионная бомбардировка практически не приводит к разложению фуллереновых молекул и образованию аморфного углерода на поверхности. Об этом говорят как эксперименты, связанные с обработкой фуллереновых покрытий потоками ионов калия, так и эксперименты при повышенных давлениях остаточного газа. Быстрые ионы, падающие на катод, видимо, выделяют большую часть своей энергии в подложке. По дороге ионы могут разрушать созданные на фуллереновой пленке выступы. Однако «освободившиеся» из данного выступа поляризованные молекулы C_{60} тут же, перемещаясь под действием неоднородных полей, захватываются соседними вы-

ступами или создают новый выступ. Таким образом, распределенная структура выступов самовоспроизводится. Возможно, именно эти процессы являются причиной мерцающего характера изображений эмиттера с фуллереновым покрытием на экране полевого эмиссионного микроскопа. Проведенные измерения показали, что при повышенных давлениях порядка 10^{-7} – 10^{-6} мм рт. ст. при мерцаниях изображения ток эмиссии фуллереновых покрытий практически не меняется во время наблюдений, во всяком случае, при токах менее 10^{-7} – 10^{-6} А.

Указанное свойство фуллереновых покрытий дает им преимущество по сравнению с любыми невоспроизводящимися «жесткими» покрытиями. С другой стороны, слабая связь фуллереновых молекул с подложкой может ограничить величину максимальных полей, которые можно создавать у поверхности фуллереновой пленки, не разрушая ее пондеромоторными силами.

3.7. Эмиттеры из композитных материалов. Композиты могут представлять большой интерес в качестве перспективных источников полевой эмиссии, так как позволяют объединять мелкоструктурированные материалы разной природы. На данном этапе нам хотелось разобраться с влиянием на автоэмиссию близкого соседства материалов, сильно отличающихся работой выхода. Поэтому было решено опробовать возможности использования для получения полевой эмиссии композита, созданного из гранул гексаборида лантана в матрице из пирографита.

Гексаборид лантана, судя по литературным данным, имеет работу выхода около 2.8 эВ, работа же выхода пирографита примерно на 2 эВ выше. Гранулы LaB_6 имели неправильную форму и их характерные размеры не превышали 40 мкм. Обволакивал эти гранулы и соединял их между собой слой пироуглерода толщиной около 100 нм. На рис. 20, 21 показаны в разном масштабе участки поверхности композитного образца, полученные с помощью растрового электронного микроскопа JEOL FESEM. Рассмотрение этих рисунков позволяет на основе анализа размеров неоднородностей поверхности оценить значения «геометрического» фактора усиления поля β_g . Определенный таким образом фактор усиления поля имеет величину не более 50.

С помощью созданной триодной системы, включающей кроме катода сетку и люминесцентный экран, были проведены измерения тока эмиссии с катода. Поле у заземленного катода создавалось напряжением U положительной полярности, приложенным к расположенной на расстоянии $d = 2.5$ мм от катода сетке с прозрачностью около 75%. Эмитированные с катода электроны, пройдя сетку, доускоряясь в зазоре между сеткой и экраном напряжением $U_{ce} \approx 0.1U$, попадали на экран и формировали на нем эмиссионные картины, отражающие распределение потока электронов с катода.

Типичная измеренная вольт-амперная характеристика (зависимость тока I с катода от напряжения U) и построенная на ее основе характеристика Фаулера–Нордгейма показаны, соответственно, на рис. 22 и рис. 23. Из этих измерений следует, что макроскопические поля $E_p = U/d$ в пределах вольт-амперной характеристики имеют величину не более $4 \cdot 10^4$ В/см. Автоэмиссию при столь малых полях не удается оправдать только с учетом выявленного выше геометрического фактора усиления поля. Поэтому приходится искать другие источники сильных полей.

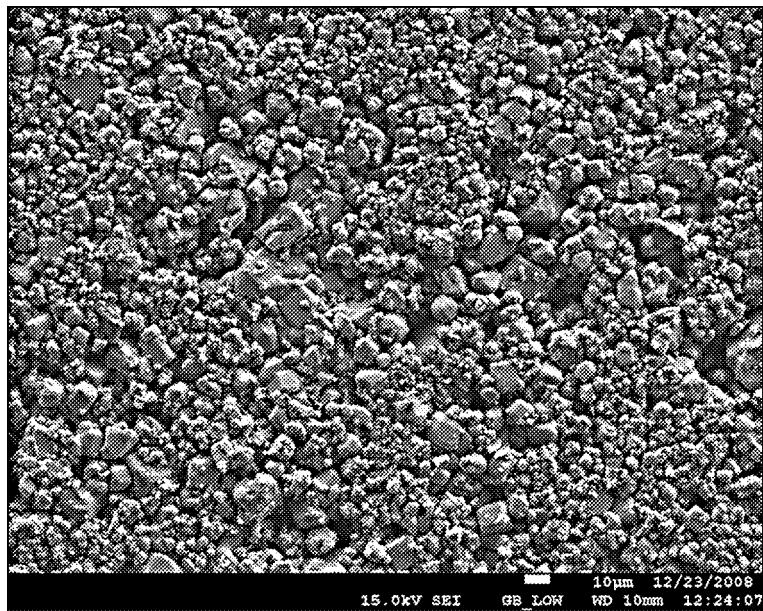


Рис. 20. FESEM изображение поверхности эмиттера из композита LaB₆–C

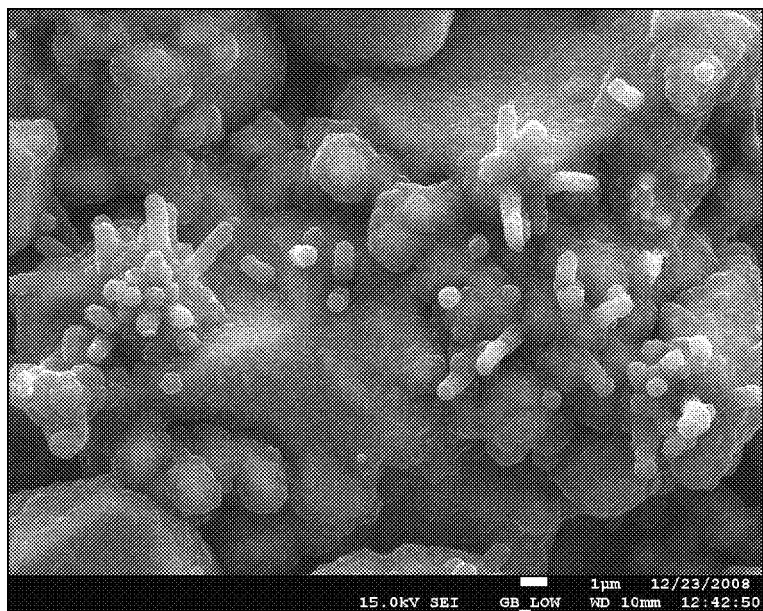


Рис. 21. Увеличенное FESEM изображение малого участка поверхности эмиттера из композита LaB₆–C

Судя по изображениям на экране, поток электронов с катода неоднороден и формируется небольшим количеством эмиссионных центров. Нам кажется, что в качестве источников эмиссии могут выступать не только области заряженных глубоких ловушек и разнообразных дефектов в соответствии с моделью, описанной в работах [51, 52]. Наряду с этим, вклад в эмиссию в случае обследованного нами катода могут дать также такие его участки, где возможен выход в вакуум электронов с областей близкого контакта пироуглерода с гексаборидом лантана. На таких участках поля пятен определяются величиной $\Delta U/\Delta l$, где $\Delta U \approx 2$ В – контактная разность по-

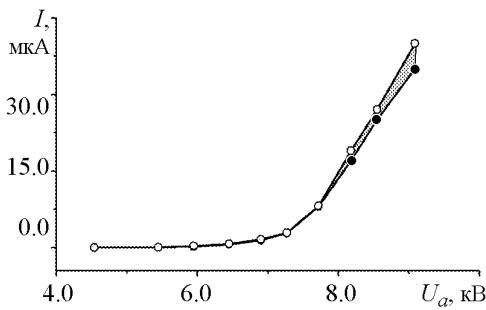


Рис. 22. Вольт-амперная характеристика эмиттера из композита $\text{LaB}_6\text{--C}$. Заштрихованная область отражает размах флюктуаций тока

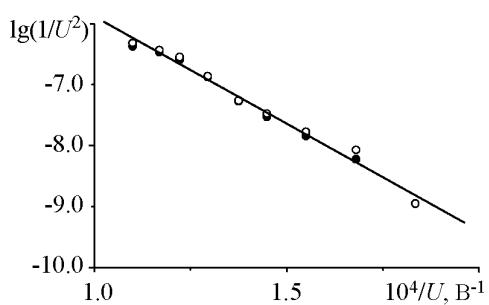


Рис. 23. Характеристика Фаулера-Нордгейма эмиттера из композита $\text{LaB}_6\text{--C}$. Точки разного типа отражают разброс значений тока эмиссии при фиксированном напряжении, связанный с флюктуациями тока

тенциалов, равная разности работ выхода указанных материалов, а Δl – расстояние между границами этих материалов у поверхности. При значениях $\Delta l \leq 1$ нм поля пятен могут иметь величину более $2 \cdot 10^7$ В/см и в таком случае эти участки станут источником интенсивной полевой эмиссии.

Предложенное объяснение эмиссии исследованного композитного образца нельзя пока считать полностью обоснованным. Необходимы, видимо, дополнительные доказательства природы этой эмиссии.

Заключение

Пончики в мечтах – это не пончики, а мечта.

Шalom Алейхем

Завершая лекцию, приходится констатировать, что мечта о создании конкурентоспособных СВЧ-устройств с полевыми эмиттерами как была мечтой, так пока и осталась ею. Однако нам кажется, что реализация этой мечты все же возможна.

Перечислим направления в разработке полевых эмиттеров, где, с нашей точки зрения, возможен в недалеком будущем успех в создании достаточно сильноточных, стабильных и долговечных автотемпературных источников электронов для вакуумной СВЧ-электроники.

Наиболее реальным представляется создание СВЧ-устройств с источниками электронов на основе небольшого количества тугоплавких острийных металлических катодов в системах с сеточным управлением эмиссией, предложенных еще в 1950-е годы классиками полевой эмиссии [10]. Технология создания таких катодов достаточно проста. Правда, для долговечной работы указанного сорта эмиттеров необходимо обеспечить сверхвысокий вакуум в приборах. Но это достижимо в СВЧ-устройствах небольшого размера при использовании, например, современных методов криогенной откачки.

Вероятен успех в создании катодов на основе острийных эмиттеров с ультрананокристаллическим алмазным покрытием [46]. В разработке такого типа эмиттеров

объединили усилия исследователи из России, США, Китая и Израиля. Они создали эмиттеры очень высокого качества, но пока не отработали подходящих устройств формирования электронных пучков. Недостатком таких эмиттеров является чрезвычайно сложная технология приготовления покрытий. Эти эмиттеры, как нам кажется, лучше всего подходят для систем спинтовского типа, поскольку для достижения больших токов необходимо формировать электронный поток большим количеством включенных параллельно острийных эмиттеров. Однако успех в создании таких катодных систем возможен только в том случае, если технология нанесения ультрананодисперсных алмазных покрытий совместима с технологией изготовления спинтовских структур.

Представляют интерес и спинтовские структуры с пучками углеродных нанотрубок в ячейках [44]. Не очевидно, что такие системы будут достаточно долговечны в условиях технического вакуума. Но все же есть надежда, что использование именно пучков углеродных волокон позволит обеспечить приемлемую долговечность такого сорта катодов, поскольку в них предусмотрено определенное «резервирование» нанотруб. Технологии изготовления катодов с пучками углеродных нанотрубок и описанных выше катодов с острийными эмиттерами, имеющими ультрананодисперсное алмазное покрытие, сложны. Поэтому катоды указанных типов будут достаточно дороги.

Спинтовские эмиссионные системы до недавнего времени рассматривались, преимущественно, как источники малых токов для низковольтных устройств типа плоских дисплеев. В работе [22] было показано, что даже со спинтовских структур малого поперечного размера (диаметром 1 мм) с молибденовыми острийными эмиттерами удается получать токи около 100 мА. Видимо, эти структуры могут быть изготовлены большего размера и обеспечить большие токи. Однако проблемы в их использовании возникают в достаточно высоковольтных устройствах, где ионная бомбардировка разрушает металлические эмиттеры. Проблема может быть решена при условии создания в приборах сверхвысокого вакуума. Но нам представляется, что дешевле и проще можно решить задачу и обеспечить долговечную работу спинтовских катодных систем в условиях технического вакуума, если на поверхность острийных эмиттеров нанести стойкие по отношению к ионной бомбардировке и к воздействию газовой среды защитные покрытия. Мы можем быть пристрастны, но, видимо, лучшими из существующих являются исследованные нами саморегулирующиеся пленочные фуллереновые покрытия. Технология нанесения таких покрытий достаточно проста и возможность ее применения к спинтовским системам частично нами уже испытана.

Могут быть перспективны матричные катоды из графита с упорядоченной структурой выступов. Но пока не отработаны пушки, позволяющие на их основе формировать электронные потоки необходимой интенсивности. Кроме того, должна быть еще доказана высокая долговечность пушек с такими катодами в условиях технического вакуума.

По-прежнему актуальны и представляют большой интерес работы, нацеленные на создание разного типа нанокластерных и других типов полевых углеродных и содержащих углерод эмиттеров с развитой поверхностью. Они имеют большую область применения, но пока вряд ли годятся для использования в вакуумной СВЧ-электронике.

Представляется целесообразным продолжить все основные направления исследований. Для ускорения процесса разработки полевых эмиттеров необходимо существенно улучшить финансирование исследовательских лабораторий, а также их обеспечение современным технологическим и исследовательским оборудованием.

Авторы благодарны аспиранту И.А. Светлову за участие в экспериментах, разработчикам и изготовителям исследованного композитного образца С.К. Гордееву и С.Б. Корчагиной (ЦНИИМ, Санкт-Петербург), а также Центру коллективного пользования С.Г. Конникова при ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе и лично Д.А. Саксееву за анализ поверхности композитного образца методом растровой электронной микроскопии.

Исследования полевых эмиттеров с углеродными и содержащими углерод покрытиями выполнены при поддержке РФФИ (гранты №№02-02-16211, 05-02-16936, 08-02-00332).

Библиографический список

1. Бондаренко Б.В., Селиверстов В.А., Шаховской А.Г., Шешин Е.П. //Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32, № 1. С. 199.
2. Гуляев Ю.В., Григорьев Ю.А., Синицын Н.И. и др. //Материалы Всероссийской межвузовской конференции «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ». Саратов: Изд. ГосУНЦ «Колледж». 1997. С. 90.
3. Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд. МФТИ, 2001. 288 с.
4. Fowler R.H., Nordheim L. Electron emission in intense electric fields //Proc. R. Soc. 1928. A 119. P. 173.
5. Good R.H., Mueller E.W. Field Emission //Handbuch der Physik. 1956. Vol. 21 / Ed. S. Fluegge (Berlin: Springer). P. 176.
6. Hawkes P.W., Kasper E. Applied geometrical optics //Principles of Electron Optics. 1996. Vol. II (New York: Academic).
7. Shakir M.I., Nadeem M., Shahid S.A., Mohamed N.M. Carbon nanotube electric field emitters and applications //Nanotechnology. 2006. Vol. 17, R41-R56.
8. Nilsson L., Groening O., Emmenegger C. et al. Scanning field emission from patterned carbon nanotube films //Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76, № 15. P. 2071.
9. Бочаров Г.С., Елецкий А.В. Влияние экранировки на эмиссионные характеристики холодных полевых катодов на основе углеродных нанотрубок //ЖТФ. 2005. Т. 75, № 7. С. 126.
10. Martin E.E., Trolan J.K., Dyke W.P. Stable, high density field emission cold cathode //J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31, № 5. P. 782.
11. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: «Наука», 1989. С. 69.
12. Шарбонье Ф.М., Барбур Дж.Р., Гаррет Л.Ф., Дайк В.П. Исследование природы и прикладных свойств холодной эмиссии на СВЧ //ТИИЭР. 1963. Т. 51, № 7. С. 989.

13. Афанасов С.Г. и др. О некоторых результатах экспериментального исследования низковольтных электронно-вакуумных приборов СВЧ //Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 11. С. 1773.
14. Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В. Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроелектронике //Саратов: Изд. ГосУНЦ «Колледж», 1996. 238 с.
15. Spindt C.A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E.R. Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones //J. of Appl. Phys. 1976. Vol. 47, № 12. P. 5248.
16. Brodie I., Spindt C.A. //Microelectronics. Advances in Electronics and Electron Physics. 1992, Vol. 83. P. 1.
17. Spindt C.A., Holland C.E., Rosengreen A., Brodee I. Field-emitter arrays for vacuum microelectronics //IEEE Trans. on ED. 1991. Vol. ED-38, № 10. P. 2355.
18. Garven M., Spark S.N., Cross A.W., Cooke S.J., Phelps A.D.R. Gyrotron experiments employing a field emission array cathode //Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77, № 11. P. 2320.
19. Spindt C.A., Holland C.E., Schwoebel P.R., Brodie I. Field emitter array development for microwave applications //J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. Vol. 14. P. 1986.
20. Spindt C.A., Holland C.E., Schwoebel P.R., Brodie I. Field emitter array development for microwave applications // J. Vac. Sci. Technol. B. 1998. Vol. 16. P. 758.
21. Makishimia H., Imura H., Takahashi M. et al. Remarkable improvements of microwave electron tubes through the development of cathode materials //In Tech. Dig. Of the 10th Int. Vacuum Microelectronics Conf. (Aug. 17-21 1997, Kyonggiu, Korea), EDIRAK, Seoul, 1997, p. 194.
22. Whaley D.R., Armstrong C.M., Gannon B. et al. PPM focused TWT using a field emitter array cold cathode //In Proc. IEEE Int. Conf. Plasma Sci. (Piscataway, NJ), 1998.
23. Whaley D.R., Gannon B.M., Smith C.R. et al. Application of field emitter arrays to microwave power amplifiers //IEEE Trans. on Plasma Sci. 2000. Vol. 28, № 3. P. 727.
24. Whaley D.R. et al. Experimental demonstration of an emission-gated travelling wave tube amplifier //IEEE Trans. on Plasma Sci. 2002. Vol. 30, № 3. P. 998.
25. Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M. et al. Operation of a low-voltage high transconductance field emitter array TWT //Conference Abstracts of The 35th IEEE International Conference on Plasma Science (June 15-19, 2008, Karlsruhe, Germany), p. 310.
26. Baker F.S., Osborn A.R., Williams J. The carbon fibre field emitter //J. Phys. D: Appl. Phys. 1974. Vol. 7, № 15. P. 2105.
27. Braun E., Smith J.E., Sykest D.E. Carbon fibers as field emitter //Vacuum. 1975. Vol. 25, № 9/10. P. 425.
28. Бондаренко Б.Б., Черепанов А.Ю., Шахбазов С.Ю. и др. Сильноточный автокатод на основе углеродных волокон //Электронная техника, сер.1, Электроника СВЧ. 1987, № 10. С. 45.
29. Бондаренко Б.Б., Габдулин П.Г., Гнучев Н.М. и др. Эмиссионные характеристики порошков из нанопористого углерода //ЖТФ. 2004. Т. 74, № 10. С. 113.

30. Бондаренко В.Б., Габдуллин П.Г., Гнучев Н.М., Давыдов С.Н. Эмиссионная способность углеродных наноструктур, полученных из карбидов //Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 3(59). С. 165.
31. Бондаренко В.Б., Ильин В.Н., Шешин Е.П. и др. Эмиссионные характеристики автокатодов из пластин пирографита //Электронная техника, сер.1, Электроника СВЧ. 1988. № 1. С. 34.
32. Суворов А.Л., Шешин Е.П., Протасенко В.В. и др. Микрошероховатые плоские автоэмиссионные катоды из графита, полученные радиационным способом //ЖТФ. 1996. Т. 66, № 7. С. 156.
33. Grigoriev Y.A., Petrosyan A.J., Penzyakov V.V. et al. Experimental study of matrix carbon field-emission cathodes and computer aided design of electron guns for microwave power devices, exploring these cathodes //J. Vac. Sci. Technol. B 15(2), War/Apr. 1997. P. 503.
34. Андреев К.В., Григорьев Ю.А., Милютин Д.Д. и др. Импульсные автоэмиссионные источники электронов на основе углеродных микро и наноструктур для луночных СВЧ-приборов: численное и экспериментальное исследование //В сборнике: Материалы 13 зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 31 января – 5 февраля 2006). Саратов. 2006. Изд. ГосУНЦ «Колледж». С. 64.
35. Савельев С.Г., Синицын Н.И., Торгашов Г.В., Григорьев Ю.А. Исследование пленочных углеродных катодов, полученных методом пиролиза гептана //В сб. Материалы международной межвузовской конференции «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ» (20–24 марта 2001, Саратов), с. 138.
36. Dzbanovsky N.N., Pilevsky A.A., Suetin N.V., Rakhimov A.T., Timofeev M.A. Cold cathode and methods for producing the same //United States Patent № 6,593,681 B1. Date of Patent: Jul. 15, 2003.
37. Дзбановский Н.Н., Минаков П.В., Пилевский А.А., Рахимов А.Т. и др. Сильноточная электронная пушка на основе автоэмиссионного катода и алмазной сетки //ЖТФ. 2005. Т. 75, № 10. с. 111.
38. Bonard J.M., Maier F., Stokli T. et al. Field emission properties of multiwalled carbon nanotubes //Ultramicroscopy. 1998. Vol. 73(7).
39. Teo K.B. et al. Plasma enhanced chemical vapour deposition carbon nanotubes/nano fibers: how uniform do they grow? //Nanotechnology. 2003. Vol. 14, 204.
40. Milne W.I., Teo K.B.K., Amaratunga G.A.J. et al. Carbon nanotubes as field emission sources //J. Mater. Chem. 2004. № 14. P. 933.
41. Purcell S.T., Vincent P., Journet C., Binh V.T. Hot nanotubes: stable heating of individual multiwall carbon nanotubes to 2000 K induced by the field emission current //Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 88. P. 105502.
42. Vincent P., Purcell S.T., Journet C., Binh V.T. Modelization of resistive heating of carbon nanotubes during field emission //Phys. Rev. 2002. Vol.B 66. P. 075406.
43. Бочаров Г.С., Елецкий А.В. Тепловая неустойчивость холодной полевой эмиссии углеродных нанотрубок //ЖТФ. 2007. Т. 77, № 4. С. 107.
44. Yue G.Z., Qiu Q., Gao Bo et al. Generation of continuous and pulsed diagnostic imagine X-ray radiation using a carbon-nanotube-based field-emission cathode // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81, № 2. P. 355.

45. *Ding Ming Q., Li Xinghui, Bai Guodong et al.* Fabrication of Spindt-type cathodes with aligned carbon nanotube emitters // *Appl. Surf. Sci.* 2005. Vol. 251. P. 201.
46. *Fujii Shunjiro, Honda Shin-ichi, Machida Hironobu et al.* Efficient field emission from an individual aligned carbon nanotube bundle enhanced by edge effect // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. 153108-1.
47. *Krauss A.R., Auciello O., Ding M.Q. et al.* Electron field emission for ultrananocrystalline diamond films // *J. of Appl. Phys.* 2001. Vol. 89, № 5. P. 2958.
48. *Рахимов А.Т., Самородов В.А., Солдатов Е.С. и др.* Исследование полевой эмиссии нанокристаллических алмазных пленок методом сканирующей туннельной микроскопии // *Поверхность.* 1999. № 7. С. 43.
49. *Рахимов А.Т., Самородов В.А., Солдатов Е.С. и др.* Исследование корреляции эмиссионных и структурных характеристик алмазных пленок методом сканирующей туннельной микроскопии // *Поверхность.* 1999. № 7. С. 47
50. *Rakhimov A.T., Suetin N.V., Soldatov E.S.* Scanning tunneling microscope study of diamond films for electron field emission // *Vacuum Science Technology.* 2000. Vol. B18. P. 76.
51. *Uppireddi Kishore, Weiner Brad R., Moreli Gerardo.* Studi of the temporal current stability of field-emitted electrons from ultrananocrystalline films // *J. of Appl. Phys.* 2008. Vol. 103. 104315(1-5).
52. *Sinitsyn N.I., Gulyaev Y.V., Torgashov G.V. et al.* Thing films consisting of carbon nanotubes as a new material for emission electronics // *Appl. Surf. Sci.* 1997. Vol. 111. P. 145.
53. *Fursey G.N., Novikov D.V., Dyuzhev G.A. et al.* The field emission from carbon nanotubes // *Appl. Surf. Sci.* 2003. Vol. 215. P. 135.
54. *Фурсей Г.Н., Баскин Л.М.* Особенности полевой эмиссии полупроводников // *Микроэлектроника.* 1997. Т. 26, № 2. С. 117.
55. *Baskin L.M., Fursey G.N.* Decisive role of dip trap states in initiating of vacuum breakdown in presence of dielectric insertions // *Proc. of the 13th ISDEIV* (Paris, 1988), Part 1. P. 31.
56. *Синицын Н.И., Гуляев Ю.В., Девятков Н.Д. и др.* Углеродные нанокластерные структуры – один из материалов эмиссионной электроники будущего // *Радиотехника.* 2000. № 2. С. 9.
57. *Troillas P., Moliton A., Ratier B.* Doping effects induced by potassium ion implantation in solid C₆₀ // *Synthetic Metals?* 1995. Vol. 73. P. 145.
58. *Troillas P., Ratier B., Moliton A. at all.* Field-effect studies of C₆₀ thin films before and after implantation with potassium // *Synthetic Metals?* 1996. Vol. 81. P. 259.
59. *Suzuki Satoru, Bower Chris, Zhou Otto.* Work functions and valence band states of pristine and Cs-intercalated single-walled carbon nanotube bundles // *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 76. P. 4007.
60. *Бобков А.Ф., Давыдов Е.В., Зайцев С.В. и др.* Некоторые аспекты использования углеродных материалов в автоэлектронных эмиссионных катодах // *ЖТФ.* 2001. Т. 71, № 6. С. 95.
61. *Suzuki Satoru, Maeda Fumihiko, Watanabe Yoshio, Ogino Toshio.* Electronic struc-

- ture of single-walled carbon nanotubes encapsulating potassium // Phys. Rev. 2003. Vol.B 67. 115418(1-6).
62. *Campbell E.E.B., Tellgmann R., Krawez N., Hertel I.V.* Production LDMS characterization of endohedral alkali-fullerene films //J. Phys. Chem. Solids. 1997. Vol. 58, № 11. P. 1763.
63. *Bagge-Hansen M., Outlaw R.A., Miraldo P. et al.* Field emission from Mo₂C coated carbon nanosheets //J. of Appl. Phys. 2008. Vol. 103. 014311-(1-9).
64. *Vlahos Vasilios, Morgan Dane, Booske John H.* Material analysis and characterization of cesium iodide (CsI) coated C fibers for field emission applications // Conference Abstracts of The 35th IEEE International Conference on Plasma Science (June 15–19, 2008, Karlsruhe, Germany), p. 126.
65. *Sominski G.G., Tumareva T.A., Polyakov A.S., Zabello K.K.* Field Emitters with Carbon Containing Coverages and Based on Carbon Fibers: Possibilities of Creation and Use in Microwave Electronics //Proc. of Int Univ. Conf. «Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies». St.Petersburg State Technical University, St.Petersburg, Russia. May 24–28, 1999. P. 327.
66. *Tumareva T.A., Sominski G.G., Polyakov A.S.* Fullerene Coverages Formation on Tungsten Tip Surface at High Electric Fields // ITG-Fachbericht Proceedings «Displays and Vacuum Electronics» (May 2-3, 2001, Garmisch-Partenkirchen, Germany). 2001, VDE Verlag GMBH, Berlin, Offenbach, N165, p. 269.
67. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Ефремов А.А., Поляков А.С. Острыйные полевые эмиттеры с фуллереновым покрытием //ЖТФ. 2002. Т. 72, № 2. С. 105.
68. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Поляков А.С. Формирование микрообразований с упорядоченной структурой в фуллереновых покрытиях полевых эмиттеров //ЖТФ. 2002. Т. 72, № 2. С. 111.
69. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Веселов А.А. Активировка калием полевых эмиттеров с фуллереновыми покрытиями //ЖТФ. 2004. Т. 74, № 7. С. 110.
70. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Бондаренко А.К., Веселов А.А., Светлов И.А. Активирование фуллереновых покрытий полевых эмиттеров потоками атомов и ионов калия // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 7. С .81.
71. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Бондаренко А.К., Морозов А.Н., Светлов И.А. Полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями и их активировка //Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006, № 3. С. 51.
72. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Морозов А.Н. Активированные потоком ионов калия полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями в сильных электрических полях //ЖТФ. 2008. Т. 78, № 11. С. 119.
73. Соколов В.И., Станкевич И.В. Фуллерены – новые аллотропные формы углерода: структура, электронное строение и химические свойства //Успехи химии. 1993. Т. 62, № 5. С. 455.
74. Ходорковский М.А., Мурашов С.В., Артамонова Т.О. и др. Исследование энергии связи между молекулами фуллерена в тонких пленках //Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, № 4. С. 1.

Поступила в редакцию 26.02.2009

DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF FIELD EMITTERS CONTAINING CARBON MATERIALS

G.G. Sominski, T.A. Tumareva

Achievements and problems in creation of field emitters for vacuum microwave devices are described. The main attention is devoted to the emitters made of containing carbon materials for high-voltage devices operating at technical vacuum conditions 10^{-6} – 10^{-8} Torr. The brief review of existing works is presented. Results of investigations performed in SPbSPU are described.

Keywords: Field emitters, carbon and containing carbon materials, fullerene coatings, vacuum microwave electronics, technical vacuum, strong electric fields, high currents, durability, activation, ion treatment.

Тумарева Татьяна Алексеевна – родилась в Ленинграде (1937), окончила (1960) Ленинградский политехнический институт (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет – СПбГПУ). После окончания работала в Государственном оптическом институте, а с 1964 года – в ЛПИ. Защищила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (ЛПИ, 1972), посвященную созданию и исследованию полевых эмиттеров с разнообразными активирующими покрытиями. В настоящее время – старший научный сотрудник кафедры физической электроники СПбГПУ. Научные интересы связаны с разработкой и исследованием полевых эмиттеров. Разработала оригинальные методы диагностики полевых эмиттеров и формируемых ими электронных потоков. Разработала перспективные полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями. Автор более 100 печатных работ и 3 изобретений.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
E-mail:sominski@rphf.spbstu.ru



Соминский Геннадий Гиршевич – родился (1935) в Ленинграде. Окончил Ленинградский политехнический институт (1960). Защитил кандидатскую диссертацию (1967) и докторскую диссертацию на соискание ученой степени д. ф.-м. н. (1984). Докторская диссертация была посвящена исследованию мощных СВЧ устройств со скрещенными полями. С 1960 года по настоящее время работает на кафедре физической электроники СПбГПУ, профессор (с 1991). В 1968 году организовал на кафедре лабораторию сильноточной и СВЧ электроники и руководит ею по настоящее время. Область основных научных интересов – процессы в пространственном заряде и их влияние на работу сильноточных электронных устройств. Кроме того, занимается исследованием и разработкой полевых эмиттеров для формирования интенсивных электронных потоков. Автор более 200 печатных работ и 17 изобретений.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
E-mail:sominski@rphf.spbstu.ru

