

УДК 621.385.6

ЭМИССИОННО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ

© 2020 г. В. И. Шестеркин*

Научно-производственное предприятие “Алмаз”,
ул. Панфилова, 1, Саратов, 410033 Российская Федерация

*E-mail: ShesterkinVI@almaz-rpe.ru

Поступила в редакцию 29.03.2019 г.

После доработки 29.03.2019 г.

Принята к публикации 15.04.2019 г.

Представлен обзор эмиссионных и эксплуатационных характеристик различных типов автоэмиссионных катодов (катодов Спиндта, катодов из стеклоуглерода СУ-2000, катодов на основе углеродных нанотрубок). Проанализированы достоинства и недостатки каждого типа катодов и возможности их применения в электровакуумных приборах, в том числе в СВЧ-приборах *O*-типа.

DOI: 10.31857/S0033849420010040

ВВЕДЕНИЕ

История создания электровакуумных приборов с автоэмиссионными катодами началась с открытия Р. Вудом в 1897 г. явления автоэлектронной эмиссии. В 1928 г. Фаулером и Нордгеймом была создана квантово-механическая теория автоэлектронной эмиссии, получившая в 1929 г. экспериментальное подтверждение в работах Милликена и Лауритцена. От момента открытия явления автоэлектронной эмиссии до создания в 1936 г. электронного прибора — проектора Мюллера, прошло почти 40 лет. Сообщение о создании СВЧ-прибора — двухрезонаторного фемитрона с игольчатыми автоэмиссионными катодами из вольфрама, появилось в 1963 г. [1]. Возможность получения с одиночного автоэлектронного эмиттера больших плотностей тока ($\sim 10^{11}$ А/см² — теоретический предел; $\sim 10^8$ А/см² в эксперименте Дайка [2]) и высокая крутизна вольт-амперной характеристики (ВАХ) стимулировали исследования по созданию нового класса электровакуумных приборов [3–5], в том числе ламп бегущей волны (ЛБВ) и клистронов [6, 7], работающих на принципах автоэлектронной эмиссии.

Важным этапом в развитии автоэмиссионной электроники явилось создание в 1968 г. матричного автоэмиссионного катода Спиндта [8]. В 1986 г. на конференции по вакуумной микроэлектронике в Монтерее был представлен доклад о создании электронной пушки с катодом Спиндта для ЛБВ [9]. На конференции в 1993 г. (Ньюпорт, США) были представлены результаты экспериментальных исследований электронной пушки с матричным автоэмиссионным катодом из стек-

лоуглерода СУ-2000 [10], а ее испытание в ЛБВ было проведено в нашей стране 1995 г. [11, 12]. Лабораторный образец ЛБВ с катодом Спиндта был создан в 1997 г. [13]. В 2009 г. опубликованы результаты испытаний 100-ваттной ЛБВ *C*-диапазона, проработавшей при различных значениях тока и коэффициентах заполнения импульса около 150 ч [14, 15].

Теория автоэлектронной эмиссии хорошо разработана и продолжает совершенствоваться на основе новых экспериментальных результатов [16, 17]. Корректируется и уточняется классическое уравнение Фаулера–Нордгейма для адекватного описания эмиссионных процессов в широком диапазоне изменения напряженности поля и работы выхода на вершинах автоэмиттеров с большой кривизной поверхности [18]. Однако до сегодняшнего дня промышленные приборы, работающие на принципах автоэлектронной эмиссии, все еще не созданы.

Совершенно иначе обстоят дела с теорией термоэлектронной эмиссии, созданием катодов и промышленных электровакуумных приборов на их основе. Совершенствование термоэмиссионных катодов осуществлялось “...путем подбора материалов и технологий, а не посредством применения основательных знаний физики поверхностей” [19, 20]. Дж. Пирс в 1946 г. описал ситуацию с созданием термоэмиссионных катодов следующим образом: “пока одних ученых теория катодов не занимает все, а другие пребывают в замешательстве, созданием катодов будто бы занимаются колдуны и фокусники. Когда что-то идет не по плану, они изгоняют парочку демонов и все опять

встает на свои места. И вот таким невероятным образом катоды продолжают совершенствоваться” (цит. по [19, 20]).

Существенное отставание в создании электровакуумных приборов на автоэмиссионных катодах, в сравнении с аналогами приборов на термоэмиссионных катодах, связано с недостаточной для промышленного применения надежностью и долговечностью их работы в техническом вакууме при интенсивной бомбардировке ионами с высокими энергиями и пробоями в электровакуумных приборах [21].

Из большого многообразия известных в настоящее время типов автоэмиссионных катодов, изготовленных из различных материалов с применением различных технологий, в данной работе проведен анализ лишь тех, на основе которых созданы и экспериментально исследованы электронные пушки для СВЧ-приборов *O*-типа и лабораторные образцы самих приборов. Это катоды Спиндта, катоды из углеродных нанотрубок (УНТ) и катоды из стеклоуглерода СУ-2000. Приведены результаты экспериментальных исследований их эмиссионных характеристик, зависящих от свойств материала эмиттеров, геометрии и конструкции автоэмиссионных ячеек, проведен анализ эксплуатационных характеристик, зависящих от величины отбираемого тока, давления остаточных газов, пробоев в приборе, переходных процессов электротехнических цепей аппаратуры.

1. ДОБРОТНОСТЬ АВТОЭМИТТЕРОВ И ЯЧЕЕК НА ИХ ОСНОВЕ

В 1990 г. на Третьей международной конференции по вакуумной микроэлектронике Т. Утсуми выделил основной фактор успешного развития вакуумной автоэмиссионной микроэлектроники: “тесная связь физики, материаловедения и микротехнологии” [22]. В последующие годы на основе современных технологий были созданы автоэлектронные эмиттеры различных геометрических форм (острийные, лезвийные, пленочные и др.) из разных материалов, включая углеродные [3, 23, 24]. Для оценки эффективности автоэмиттеров Т. Утсуми ввел параметр добротности F , связывающий ток эмиттера I , его линейные размеры L , потенциал на вытягивающем электроде V и соответствующие параметры I_0 , L_0 и V_0 идеального автоэмиттера:

$$F = (I/I_0)(V/V_0)^{-1}(L/L_0)^{-1}. \quad (1)$$

Концепция добротности основана на минимизации напряжения и линейных размеров автоэмиттеров, соответствующих максимальному значению тока.

Идеальной формой автоэлектронного эмиттером является сфера, подвешенная на нити между

обкладками конденсатора. Максимально близкой к идеальной форме является тонкий и длинный эмиттер цилиндрической формы со сферической вершиной. Для получения близкого к предельному экспериментально полученному значению автоэмиссионного тока $J \sim 10^8$ А/см² на вершине автоэмиттера с работой выхода 4.5 эВ необходимо создать напряженность электрического поля $E \sim 5 \times 10^7$ В/см. Для указанных значений J и E соотношение, связывающее максимально достижимый ток и соответствующий ему потенциал V , по Т. Утсуми, имеет вид

$$I_{\text{макс}} \approx 4 \times 10^{-8} V^2. \quad (2)$$

Значение добротности эмиттера в виде цилиндрического стержня с большим аспектным отношением и сферической вершиной составляет ~ 0.6 . Добротность острия в форме прямого конуса (острие в классической ячейке Спиндта) составляет ~ 0.025 . Из известных форм эмиттеров наибольшую добротность ~ 0.18 имеет острие в форме “Эйфелевой башни” [22].

Соотношение (1) может быть использовано для сравнения добротности автоэмиссионных ячеек с автоэмиттерами различных форм и размеров.

2. АВТОЭМИССИОННЫЕ КАТОДЫ СПИНДТА

Стабильность автоэлектронной эмиссии и продолжительность работы любых типов автоэмиссионных катодов в основном зависит от температуры и ее распределения по длине автоэмиттера, стабильности работы выхода электронов, сохранения размеров и формы вершины острия, а также интенсивности ионной бомбардировки. Температура вершины автоэмиттера определяется термическими эффектами Джоуля и Ноттингама. Вклад каждого из этих эффектов в температуру вершины автоэмиттера определяется плотностью протекающего через нее автоэмиссионного тока. При достижении некоторого значения температуры, зависящего от температуры плавления материала эмиттера, наступает режим термоавтоэлектронной эмиссии и далее взрывной эмиссии [5, 25]. В сильном электрическом поле, при достижении температуры вершины автоэмиттера более одной трети от температуры плавления материала, начинается процесс диффузии атомов к вершине острийного автоэмиттера [26], который приводит к увеличению напряженности электрического поля и неконтролируемому росту плотности тока и температуры. Температура вершины автоэмиттера возрастает до некоторого критического значения, приводящего к его “взрывному” разрушению и пробое вакуумного промежутка [5, 27]. Для металлических автоэмиттеров с различной геометрией и радиусами закругления вер-

шины, предельные значения токов могут существенно отличаться, но предельное значение плотности тока, выше которого наступает пробой, для всех типов острий из тугоплавких металлов составляет $(4...7) \times 10^7$ А/см² [28–30].

В [26] приведены результаты экспериментальных исследований влияния величины отбираемого с одиночного острия тока на продолжительность работы молибденовых катодов Спиндта с различной токовой нагрузкой. С этой целью в вакуумной камере одновременно были испытаны четыре образца катодов, вырезанных из одной пластины и содержащих 25000, 10000, 100 и 100 автоэмиссионных ячеек. К сеткам всех четырех образцов были приложены напряжения в форме положительных синусоидальных полувольт, соответствующие одинаковым значениям тока величиной 10 мА. Токи с одиночного эмиттера в образцах составляли 0,4, 1,0, 100 и 100 мкА соответственно. Параметр добротности одиночной ячейки составлял $\sim 0,025$. После 12 ч испытаний на образцах, содержащих 25000 и 10000 ячеек, величина тока не изменилась, а на двух образцах, содержащих по 100 ячеек, ток уменьшился до 3 мА (рис. 1). Снижение тока на образцах со 100 ячейками авторы объяснили заострением вершин за счет их разогрева теплом Джоуля и поверхностной диффузией атомов к кончику острия в сильном электрическом поле, что привело к уменьшению площади эмиссии. Фотографии образцов после испытаний, подтверждающие данную гипотезу, в работе не были представлены. Известно, что процесс заострения вершин автоэммиттеров в сильном электрическом поле развивается лавинообразно, заканчивается пробоем и разрушением вершин острий, что неоднократно подтверждалось экспериментально [5]. Динамика процесса разрушения (взрыва) вершины автоэммиттера, разогретого до высокой температуры теплом Джоуля, исследована в работе [27]. Для данного случая наиболее вероятной представляется версия “затупления” кончиков острий вследствие распыления материала под воздействием термического нагрева и ионной бомбардировки. Это могло привести к напылению молибдена на поверхность, разделяющей катод и сетку керамики внутри ячеек и, как следствие, к появлению возрастающей во времени утечки в цепи катод–сетка. Возросшее после 12 часов испытаний значение катодного тока в области низких напряжений, вероятно, являлось током утечки.

Независимо от приведенных выше обоснований следует констатировать сам факт снижения эмиссии тока катода в 3,3 раза за относительно короткий промежуток времени. Следовательно, можно лишь предположить, что предельный для данной геометрии ячеек ток одиночного острия, не приводящий к термической деградации катода, значительно меньше 100 мкА.

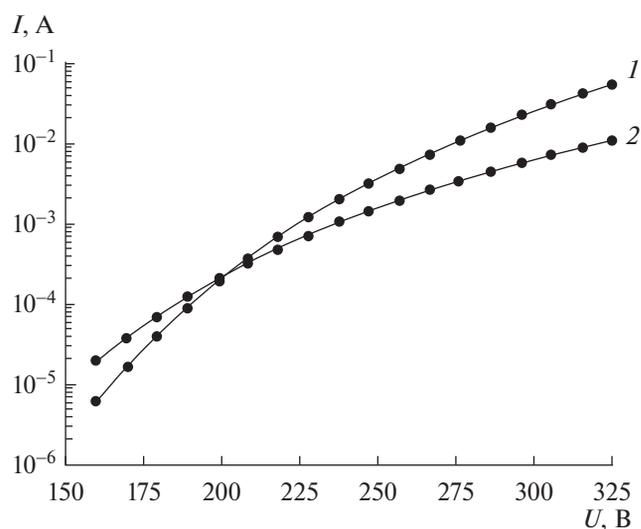


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики катода, содержащего 100 ячеек: 1 – в начале испытаний, 2 – после 12 ч испытаний.

По данным [31], продолжительность работы катода Спиндта с током одиночного острия 20 мкА составила 8 лет. Однако, по заявлению авторов указанной работы, даже при токе с одиночного острия ~ 4 мкА, что соответствует плотности тока катодной матрицы 2,5 А/см², пробой между катодом и сеткой “были не редкими”. Испытания проводились при давлении остаточных газов $10^{-10}...10^{-9}$ Торр и были прерваны из-за отказа вакуумного насоса. В 100-ваттной ЛБВ при техническом вакууме и энергии ионов более 3 кэВ при различных значениях токов эмиссии и коэффициентах заполнения импульса время работы катода в общей сложности составило 153 ч [14, 15]. Максимальное значение тока одиночной ячейки составило $\sim 2,4$ мкА при пиковом значении плотности тока катода в режиме одиночных импульсов 15,4 А/см². Вероятно, для катода Спиндта в составе электровакуумного прибора, величину тока одиночного острия 1...2 мкА, которая не приведет к его чрезмерному термическому нагреву и разрушению, следует считать близкой к предельной.

Надежность и долговечность работы автоэмиссионных катодов в значительной степени определяется сохранением изоляционных свойств керамической пленки, разделяющей катод и сетку. В [32] впервые отмечено наличие замыкания цепи катод–сетка по разделяющей их керамике из SiO₂ внутри ячеек традиционной конструкции. Вероятно, это послужило основанием для модернизации конструкции классической ячейки Спиндта. В модернизированной ячейке между пленкой из SiO₂ и сеткой был сформирован дополнительный слой диэлектрика с диаметром отверстия меньшим, чем диаметр отверстия в сетке (рис. 2). Ве-

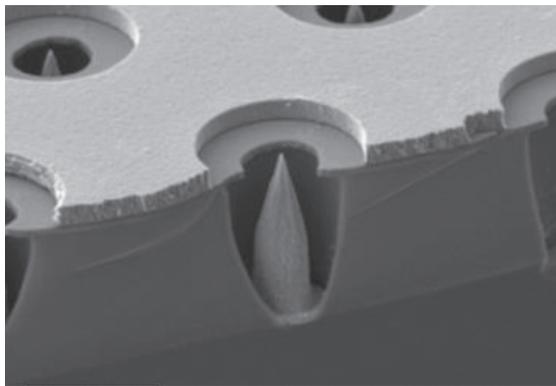


Рис. 2. Модернизированная конструкция катода Спиндта [32].

роятной причиной нарушения изоляции по поверхности диэлектрика внутри ячейки может являться напыление на поверхность диэлектрика, разделяющего катод и сетку, материала автоэммиттера в результате его термического разогрева и распыления при протекании тока большой плотности.

Эмиссионные параметры автоэмиссионных катодов при техническом вакууме изменяются в широких пределах вследствие изменения эффективной работы выхода электронов при адсорбции атомов, молекул и ионов остаточных газов [33]. Изменение работы выхода с 4.6 до 6.3 эВ приводит к уменьшению плотности автоэмиссионного тока на четыре порядка величины [34]. Температура кончиков острых автоэммиттеров в режиме интенсивного отбора тока может достигать 1000°C и более [5]. Вероятно, при высоких температурах процесс десорбции адатомов преобладает над процессом адсорбции, что приводит к стабилизации эффективной работы выхода на значении, близком к работе выхода материала автоэммиттера, и, как следствие, к стабилизации эмиссионного тока. Однако при такой температуре, по данным [26], происходит процесс самодиффузии атомов к вершине автоэммиттера, увеличению кривизны поверхности вершины автоэммиттера, увеличению плотности тока и развитию его неконтролируемого роста. Принимая во внимание вышесказанное, для получения стабильной автоэлектронной эмиссии не нужно стремиться к получению чрезмерно больших токов с одиночного острия и работать на ВАХ с невысокой крутизной.

При стабилизации работы выхода существенное влияние на эмиссионные характеристики автоэмиссионного катода оказывают рельеф эмитирующей поверхности, который изменяется в процессе ионной бомбардировки. При давлении остаточных газов $\sim 10^{-6}$ Торр количество ударов ионов на единицу поверхности составляет $\sim 4 \times 10^{14} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, а количество ударов ионов в секунду о поверхность

вершины острия достигает нескольких сотен [35]. Даже при сверхвысоком вакууме можно лишь минимизировать негативные последствия ионной бомбардировки, но избавиться от ее разрушительного действия, без принятия специальных мер, невозможно. Негативное влияние ионов возрастает с увеличением их энергии, что ограничивает долговечность работы автоэмиссионных катодов в высоковольтных приборах.

При работе автоэммиттеров в СВЧ-полях ионную бомбардировку вершин острий удается практически полностью устранить за счет эффекта “выдавливания” ионов неоднородным полем, что было подтверждено экспериментально [36] и может повысить надежность и долговечность СВЧ приборов с модуляцией плотности тока автоэлектронной эмиссии [37, 38].

Важной характеристикой эффективности любых типов эмиттеров, работающих в режиме больших значений автоэмиссионных токов, является устойчивость к воздействию пондеромоторных сил, возрастающих пропорционально квадрату напряженности поля, достигающих $\sim 10 \text{ кг/мм}^2$ и способных оторвать основания автоэммиттеров от подложки [39]. По данному критерию ячейки Спиндта являются достаточно надежными, поскольку в опубликованных разными авторами работах, посвященных испытаниям данного типа катодов, отказов по причине отрыва оснований эмиттеров от подложки не было установлено.

Одной из причин, ограничивающих надежность матричных автоэмиссионных катодов, является разброс значений радиусов кривизны острий, обусловленный технологией их изготовления. Уменьшение рабочего напряжения на управляющей сетке до 100 В и менее в катодах Спиндта достигнуто за счет уменьшения радиуса кривизны вершин конусов до нескольких десятков нанометров. При экспоненциальной зависимости автоэмиссионного тока от напряженности поля даже незначительные отклонения радиуса кривизны приводят к значительному разбросу отбираемых токов с автоэммиттеров в катодной матрице. Это приводит к выгоранию наиболее заостренных автоэммиттеров и в лучшем случае – к ограничению полного тока катода, а в худшем – к пробое и разрушению катода в целом. Данная проблема исследована в [40] на примере матричного катода с автоэммиттерами из кремния, размещенными на подложке с плотностью упаковки 10^8 см^{-2} . Более острые наконечники располагались в центре матрицы. Равномерность эмиссии автоэммиттеров с различными радиусами кривизны была достигнута благодаря использованию ограничителей тока в виде кремниевых наностержней в форме цилиндра диаметром 200 нм с аспектным отношением 50, на вершинах которых размещались острые автоэммиттеры. Плотность тока катода

100 А/см² была получена при напряжении управляющей сетки 75 В с диаметром отверстий 350 нм и токе с одиночного автоэммиттера не более 2.5 мкА.

Принципиальным ограничением для использования катодных матриц с микронными размерами ячеек и диэлектрическим зазором катод-сетка в импульсных СВЧ приборах является их большая емкость, которая увеличивает длительности фронтов импульса тока и выходной мощности [41]. Емкость матричного катода Спиндта пропорциональна количеству ячеек и может достигать десятков нанофарад. Вследствие большого значения емкости длительность фронта импульса тока в ЛБВ с матричным катодом Спиндта достигала ~25 мкс при длительности импульса напряжения задающего генератора 40 мкс [14]. Предельно допустимая длительность фронта импульса выходной мощности современных приборов не должна превышать ~1 мкс в широком диапазоне скважностей и длительностей импульса. Для уменьшения емкости необходимо увеличивать зазор катод-сетка и отказаться от разделяющего катод и сетку диэлектрика в пользу вакуума. Использование вакуумного зазора позволит также избавиться от омических утечек по керамике и повысить надежность и долговечность катода и прибора в целом.

Полупроводниковая технология, используемая при изготовлении катодов Спиндта, не позволяет формировать автоэмиссионные ячейки на криволинейных (сферических или цилиндрических) поверхностях катодов для электронных пушек со сходностью с целью осуществления компрессии пучка по площади и увеличения плотности тока в пучке при ограниченной плотности тока на катоде.

3. КАТОДЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Большое количество публикаций посвящено созданию технологий изготовления и исследованию эмиссионных характеристик катодов на основе углерода в различных его модификациях (УНТ, алмазоподобные пленки, наноалмазные пленки, нанокристаллический графит, фуллерены, графены и др.) [24, 42].

Особый интерес представляют автоэммиттеры на основе нанокристаллических углеродных и наноалмазных пленок, автоэлектронная эмиссия с которых регистрируется при напряженности электрического поля порядка единиц вольт на микрометр. На микроскопическом уровне пленка состоит из ребристых кристаллитов размером 50...70 Å, размещенных с плотностью несколько ребер на квадратный микрометр [43]. Пленки имеют высокую адгезию с подложкой и не отделяются от нее при напряженностях поля до

30 В/мкм. В диоде с вакуумным зазором ~500 мкм и напряженностью поля между обкладками 9.5 В/мкм плотность тока с пленочного катода площадью несколько квадратных сантиметров достигала 2.5 А/см². Равномерное свечение люминофорного экрана размером 20 × 20 мм² свидетельствовало о высокой однородности эмиссии. Авторы считают наиболее перспективным применением данного типа катодов в автоэмиссионных дисплеях.

Аналогичные наноалмазографитовые пленки были получены в микроволновой плазме паров этанола низкого давления [44]. Пленка состояла из аморфной углеграфитовой матрицы с распределенными по поверхности микрокристаллитами алмаза. В диоде с вакуумным зазором 120 мкм при напряженности поля 9 В/мкм плотность тока составила 2.5 мА/см². Коэффициент усиления поля на микрокристаллитах достигал 1500. Столь высокое значение коэффициента усиления поля авторы указанной работы связывают не с фактором непосредственно микрокристаллитов, а с “высокой поверхностной концентрацией электронов, создающей поле поверхностного заряда до 10⁷...10⁸ В/см, которое сильно искривляет энергетические зоны вблизи поверхности кристаллитов и усиливает локальное электрическое поле на эмиссионных центрах”. К сожалению, в данных работах не приведены результаты испытаний пленочных катодов на сохранение стабильности эмиссии во времени при техническом вакууме.

В работе [45] представлена технология формирования регулярной матрицы из вертикально стоящих на подложке двухслойных графеновых ребер. Продемонстрирована стабильная эмиссия с плотностью тока ~5 мкА/см² в течение 100 ч с уровнем флуктуации менее 1%. Представлен автоэмиссионный дисплей с диагональю 21 см на основе автоэммиттеров из графена.

Следует отметить, что в конструкциях триодов и электронных пушек для электровакуумных приборов из большого многообразия катодов на основе углерода экспериментально были исследованы катоды из углеродных нанотрубок.

Большое аспектное отношение, высокая механическая прочность, химическая инертность, высокие значения тепло- и электропроводности делают УНТ весьма привлекательными для их использования в качестве материала автоэмиссионных катодов. При малом диаметре (единицы-десятки нанометров) и большой длине (до нескольких микрометров) аспектное отношение УНТ достигает 3000 и более единиц. Это позволяет в сотни раз увеличить напряженность электрического поля на их кончиках и отбирать токи с большими плотностями при низких напряжениях на вытягивающем электроде.

Химическая инертность, присущая углеродным материалам, в том числе и углеродным нанотрубкам, позволяет сохранять в техническом вакууме работу выхода более стабильной по сравнению с металлическими автоэммитерами в тех же условиях. Однако высокая механическая прочность не гарантирует сохранение УНТ в режиме интенсивного отбора тока. Вследствие термического разогрева вершины и недостаточно хорошего теплового контакта с подложкой наблюдается неоднородность распределения температуры по длине нанотрубки, что является причиной тепловой неустойчивости, приводящей к их разрушению. Под действием пондеромоторных сил электростатического поля нанотрубки разрушаются на расстоянии $\sim 1/5$ длины нанотрубки от ее кончика [24]. Механическая неустойчивость УНТ трудно прогнозируема и препятствует получению устойчивых и предсказуемых токов автоэлектронной эмиссии.

Разброс значений работы выхода для УНТ, по данным различных источников, составляет от 4.3 до 7.3 эВ. Среднее значение работы выхода находится в пределах 5.26 ± 0.85 [24]. Заявленная в работе [46] аномально низкая работа выхода ~ 1 эВ выходит далеко за рамки принятых в литературе значений. По данному важнейшему параметру углеродные нанотрубки уступают металлическим автоэмиссионным катодам из молибдена и вольфрама. Даже сформированные на одной подложке УНТ имеют разброс значений работы выхода [24]. Учитывая экспоненциальную зависимость плотности тока от работы выхода электронов, можно констатировать, что вклад в общий ток катода отдельных, даже выровненных по высоте нанотрубок, не будет одинаковым. При увеличении тока катода с множеством нанотрубок за счет увеличения напряжения, вероятность механического разрушения или распыления нанотрубок с меньшей работой выхода возрастает, что снижает стабильность и надежность катодов с УНТ.

В [24] приведены оценки предельных значений тока и плотности тока катодов на основе углеродных нанотрубок. Максимальный ток с одиночных УНТ не превышает 1 мкА. Плотность тока массива УНТ высотой 1 мкм, с учетом максимально плотного (не более $1 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$) их размещения на подложке без взаимной экранировки может достигнуть 100 А/см^2 . Указанную плотность тока можно ожидать при условии, если все УНТ в матрице ориентированы строго вертикально, не экранируют друг друга, имеют одинаковые аспектное отношение и работу выхода, что на практике трудно реализуемо. Поэтому данную оценку сверху для УНТ в режиме автоэлектронной эмиссии следует считать сильно завышенной. Плотности тока более 100 А/см^2 с УНТ получены в режиме взрывной эмиссии при одиночных импульсах [47].

К настоящему времени созданы и экспериментально исследованы три типа катодов на основе УНТ:

- катоды с хаотично ориентированными нанотрубками;
- катоды с матрицей одиночных нанотрубок;
- катоды с плотно прижатыми нанотрубками, объединенными в жгуты.

Эмиссионные характеристики УНТ существенно зависят от способа их получения. Вероятно, по этой причине наблюдаются не согласующиеся экспериментальные результаты и выводы авторов публикаций относительно влияния вакуумных условий на их характеристики. По результатам работы [48], эмиссия хаотически ориентированных нанотрубок существенно улучшается при очищении их от адсорбатов в процессе откачки вакуумной камеры. Авторы [49] наблюдали снижение эмиссии на порядок в процессе очищения нанотрубок от адсорбатов. Приведенные результаты подтверждают высокую чувствительность эмиссионных характеристик УНТ к присутствию на их поверхности адсорбатов и свидетельствуют о недостаточной изученности процессов автоэлектронной эмиссии УНТ в условиях технического вакуума.

Катодам с хаотически ориентированными нанотрубками (рис. 3а) характерна плотность тока в единицы миллиампер на квадратный сантиметр при напряженности электрического поля до 10 В/мкм (рис. 3б) [48, 50, 51]. Катоды с матрицей одиночных нанотрубок (рис. 4а) имеют низкие значения пороговой напряженности поля (рис. 4б) за счет отсутствия взаимной экранировки УНТ [52]. В диоде при напряжении анода 3000 В катод с отдельно стоящими нанотрубками при плотности тока $\sim 0.2 \text{ А/см}^2$ проработал в течение 500 ч (рис. 4в). Режим испытаний (импульсный или непрерывный) и давление остаточных газов в испытательной камере в работе не были приведены.

Катоды, состоящие из жгутов с плотно упакованными УНТ, работают при более высоких значениях напряженности электрического поля (несколько десятков вольт на микрометр) вследствие взаимной экранировки нанотрубок [53]. Сравнительные характеристики обоих типов катодов представлены на рис. 5.

Вследствие недостаточно высокой надежности автоэмиссионных ячеек с интегрированной через пленку диэлектрика сеткой, в конструкции триода была применена крупноячеистая сетка, размещенная над нанотрубками на расстоянии 100 мкм. Авторы отмечали наличие в электронном потоке больших поперечных скоростей электронов $\sim 12 \text{ эВ}$ за сеткой с потенциалом 2000 В.

В [54] приведены эмиссионные характеристики катода диаметром 1 мм с хорошо выровненными по

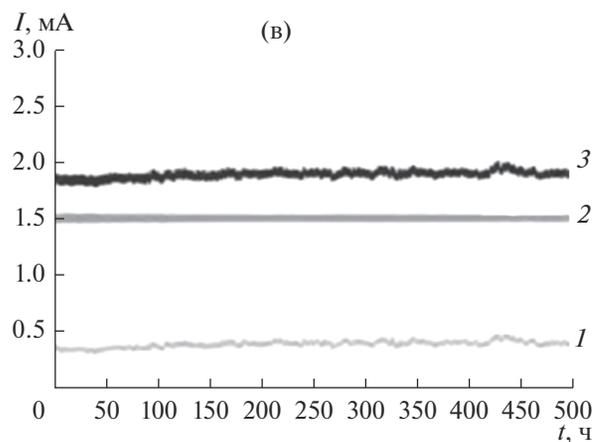
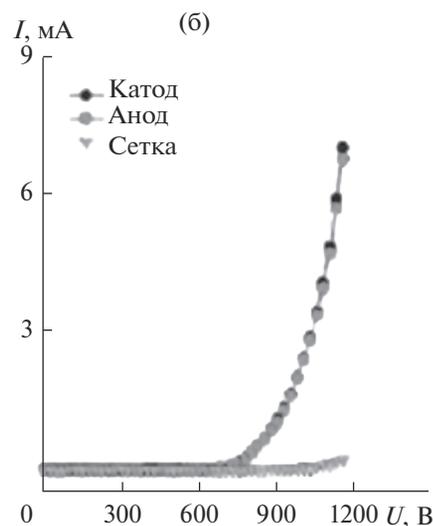
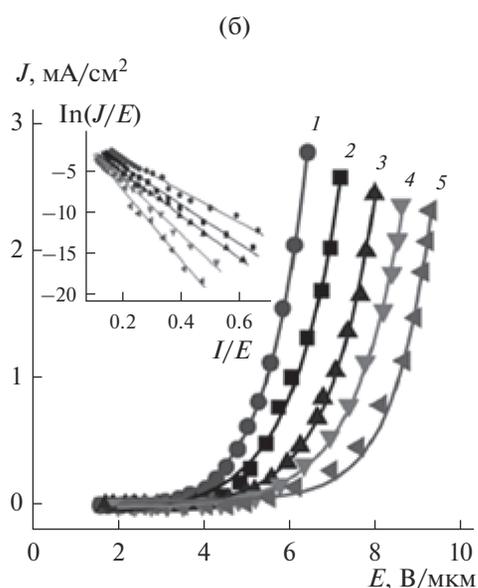
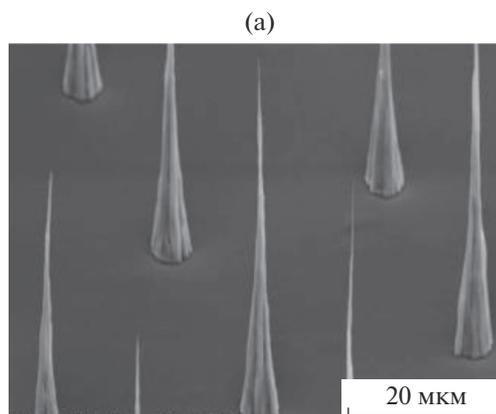
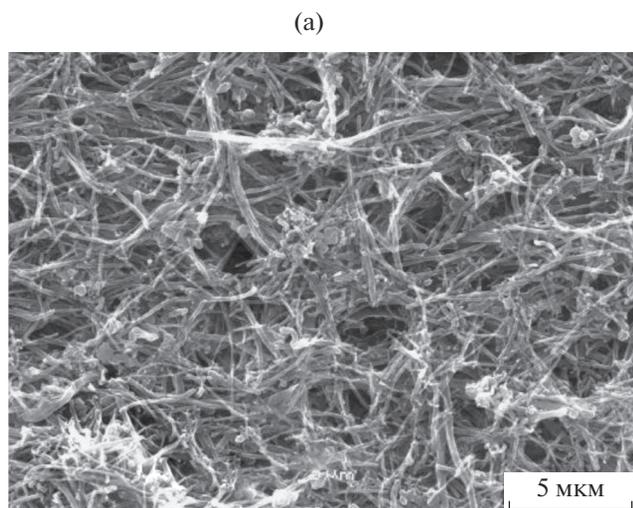


Рис. 3. Фотография катода с хаотически ориентированными УНТ (а); ВАХ при различных давлениях остаточных газов (б): 2×10^{-7} (1), 1.5×10^{-4} (2), 3.2×10^{-4} (3), 9.4×10^{-4} (4) и 2.1×10^{-3} Па (5); на вкладке – ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма [51].

высоте и плотно упакованными нанотрубками, размещенными на площадках размером $2.5 \times 2.5 \text{ мкм}^2$, отстоящих друг от друга на расстоянии 7.5 мкм. Максимальная плотность тока катода $\sim 4.5 \text{ А/см}^2$ в диоде при расстоянии катод–анод 300 мкм и напряжении анода 2000 В была получена при токе катода 36 мА. Давление остаточных газов составляло $\sim 8.5 \times 10^{-8}$ Торр.

Одной из проблем, ограничивающей применение катодов с УНТ в вакуумных электронных устройствах, является отрыв УНТ от подложки при воздействии сильных электрических полей вследствие недостаточной энергии связи основа-

ния трубок с подложкой. Для устранения данной проблемы в работе [55] была разработана технология формирования пучков из плотно прилегающих друг к другу и выровненных по высоте УНТ на подложке из графена. Последовательность

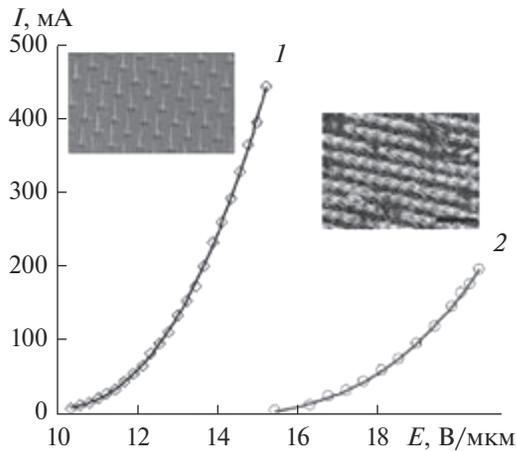


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики катодов с одиночными (1) и упакованными в жгуты (2) нанотрубками [53].

технологических операций включала в себя формирование на кремниевой подложке пленки из двуоксида кремния толщиной 300 нм, осаждение на нее пленки никеля, а затем формирование многослойных пленок графена методом плазменного осаждения. С помощью фотолитографии на графене были сформированы островки катализатора из железа с желаемыми размерами и плотностью упаковки, на которые высаживались углеродные нанотрубки. В диоде с размером катода $2 \times 2 \text{ мм}^2$ получен ток более 200 мА, что соответствовало усредненной по катоду плотности тока $\sim 2.5 \text{ А/см}^2$ (рис. 6). Стабильность эмиссии катода с током 100 мА зарегистрирована в течение 24 ч.

При формировании жгутов с плотно прижатыми нанотрубками утрачивается основное их преимущество — большое аспектное отношение.

Жгут из нанотрубок приобретает форму цилиндра или прямоугольной пирамиды с шероховатой эмитирующей поверхностью с малым значением параметра преобразования поля. Напряженность электрического поля на вершине жгута распределена неравномерно, она возрастает от центра к периферии. Высокая плотность тока, зависящая от напряженности поля по экспоненте, может вызвать термическое разрушение нанотрубок на периферии жгута.

Достаточно простой в технологическом исполнении способ изготовления автоэмиссионного катода с УНТ предложен в [56]. Паста с измельченными и перемешанными с графитовым наполнителем нанотрубками наносилась на торец графитового стержня диаметром 0.7 мм. В диодном режиме при напряжении анода 2000 В ток катода составил 8.4 мА, что соответствовало усредненному по поверхности стержня значению плотности тока 2.2 А/см^2 . Ток катода, равный 1 мА, оставался стабильным в течение 20 ч.

Для уменьшения напряжения в триодах с УНТ предпринимаются попытки создать автоэмиссионные ячейки (типа Спиндта) с интегрированной через пленку диэлектрика сеткой. Так, в работах [57, 58] хаотически ориентированные УНТ были высажены на донья углублений в пленке SiO_2 , сформированной на кремниевой подложке, методом плазмохимического осаждения из паровой фазы. Углубления диаметром $\sim 2 \text{ мкм}$ были расположены на расстоянии 4.8...10 мкм друг от друга. УНТ высотой 1...8 мкм высаживались в течение нескольких минут. На поверхности диэлектрика внутри ячейки видны углеродные нанотрубки (рис. 7), которые могут быть причиной утечек при формировании ячеек типа Спиндта с интегрированной сеткой. Вероятно, по этой причине, сеточный электрод на диэлектрике так и не был

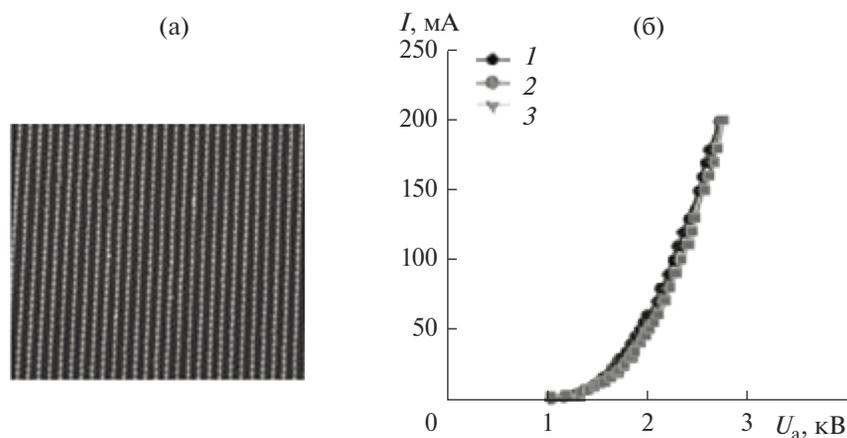


Рис. 6. Катодная матрица с островками из УНТ (а); вольт-амперные характеристики (б) в начале испытаний (1) и после 12 (2) и 24 ч (3) испытаний [55].

сформирован. Измерения эмиссии катода диаметром $\sim 0.75 \text{ мм}^2$ были проведены в плоском диоде с вакуумным зазором между диэлектриком и анодом $\sim 18 \text{ мкм}$ при давлении $\sim 8 \times 10^{-7} \text{ Торр}$. Усредненная по площади катода с УНТ высотой 8 мкм плотность тока составила $\sim 370 \text{ мА/см}^2$ при напряженности поля $\sim 22 \text{ В/мкм}$.

В [59] “была предпринята попытка” изготовления и испытания автоэмиссионной матрицы с УНТ и интегрированным затвором (сеткой) из титана. Для улучшения сцепления УНТ с подложкой последняя была выполнена из карбида титана. Технология формирования ячеек с УНТ являлась многоуровневой и включала осаждение на танталовую подложку нитрида титана, на которой формировались островки карбида титана диаметром 50 мкм и шагом 120 мкм , а затем высаживались УНТ. Изолятор и затвор были изготовлены с помощью станков с числовым программным управлением. Матрица из 253 ячеек была сформирована на площадке диаметром 2 мм . Испытания созданной триодной структуры в работе не представлены, а измерения эмиссионных характеристик катода проведены в диодном режиме. При напряженности поля 12 В/мкм ток катода составил 21.3 мА , а плотность тока 335 А/см^2 . При постоянном токе 5 мА и плотности 2.3 А/см^2 катод проработал в течение 3000 ч без заметного ухудшения эмиссионных характеристик. К сожалению, в статье не приведены данные о конструкции диода, условиях испытаний по вакууму и напряжению, что не позволило определить, к чему относится приведенное значение плотности тока.

Судя по приведенным выше результатам, ячейки с интегрированной сеткой так и не были испытаны в триодном режиме, поэтому можно сделать вывод, что конструкции ячеек типа Спиндта с интегрированными сетками являются недостаточно надежными как с молибденовыми острями, так и с УНТ. Главная причина связана с увеличением утечек во времени и возникновением пробоев между катодом и сеткой по разделяющему их диэлектрику. Авторы [60] считают наиболее предпочтительной конструкцию ячейки с вакуумным зазором катод–сетка.

Использование автоэмиссионных катодов с интегрированными сетками на основе УНТ в высоковольтных приборах СВЧ диапазона к настоящему времени не вышло за рамки лабораторных исследований. Это обусловлено, по-видимому, как было отмечено выше, более высоким значением работы выхода, недостаточной механической прочностью, вызванной тепловой неустойчивостью и утечками в цепи катод–сетка. Следует так же обратить внимание на отсутствие публикаций по стойкости УНТ к вибрационным и ударным механическим воздействиям с большим

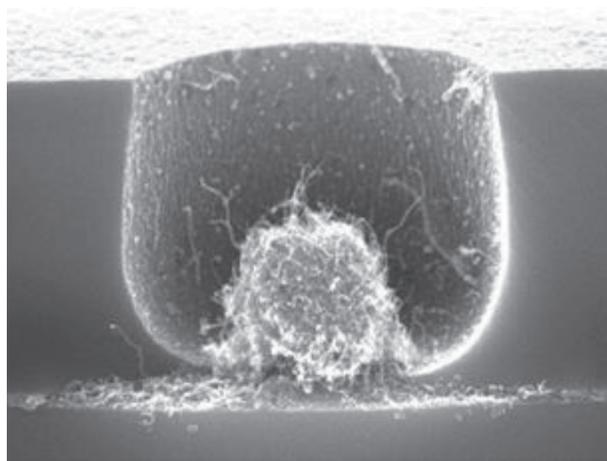


Рис. 7. Ячейка “типа Спиндта” с хаотически ориентированными УНТ [58].

ускорением, которым подвергаются электронные приборы космического и военного назначения.

Проводятся исследования по совершенствованию технологий создания полевых эмиттеров с алмазными, алмазоподобными и другими типами наноуглеродных покрытий. В [42] приведены результаты исследований в данной области и отмечены достоинства этого типа катодов. Общий недостаток — слабая энергия связи пленок с подложкой, что является причиной их отрыва пондеромоторными силами электростатического поля [61]. Достигнутые значения токов явно не достаточны для их использования в СВЧ-приборах. Продолжительность стабильной эмиссии таких катодов в условиях технического вакуума нуждается в дальнейших исследованиях.

Увеличение автоэмиссионного тока всех типов автоэмиссионных катодов даже с небольшим параметром усиления поля возможно за счет уменьшения работы выхода. С этой целью проводятся исследования и разрабатываются технологии допирования поверхности автоэмиттеров атомами элементов с малой работой выхода. Было обнаружено существенное уменьшение работы выхода, однако в процессе работы катодов под действием ионной бомбардировки и температуры за достаточно короткое время ее значение возрастало до значения работы выхода непосредственно материала автоэмиттера [42].

Авторами [62] разработана технология защиты автоэмиттеров от ионной бомбардировки нанесением двух–шести слоев фуллереновых молекул. Для снижения работы выхода пленка из фуллеренов активировалась потоком ионов калия энергией 49 эВ . Экспериментально подтверждена стабильная эмиссия многоострийного (до 350 наконечников) катода в диоде при техническом вакууме с общим током 250 мкА в течение нескольких часов.

4. АВТОЭМИССИОННЫЕ КАТОДЫ ИЗ СТЕКЛОУГЛЕРОДА СУ-2000

Удачное сочетание физико-химических свойств стеклоуглерода СУ-2000: высокая вакуумная плотность, работа выхода ~ 4.6 эВ, химическая инертность, высокая механическая прочность (возрастает с увеличением температуры и сохраняется вплоть до температуры $\sim 3000^\circ\text{C}$), удельное электрическое сопротивление $(3\dots 8) \times 10^{-6}$ Ом \cdot м делают его привлекательным материалом для автоэмиссионных катодов [63, 64]. Создание автоэмиссионных катодов из стеклоуглерода СУ-2000 и исследование их автоэмиссионных характеристик сдерживались отсутствием технологии изготовления острийных матриц.

Предложенная авторами [65] технология плазмохимического травления в среде кислорода позволяет формировать на пластинах изотропного пиролитического графита матрицу острий в форме прямого конуса высотой до одного микрона и радиусом закругления вершины ~ 0.1 мкм (рис. 8а).

В работах [66, 67] был предложен способ формирования матричных автоэмиссионных катодов с остриями в форме прямого усеченного конуса методом термохимического травления в среде водорода. Высота острий в матрице не превышала 14 мкм, размер вершин более 1.6 мкм, плотность упаковки не превышала 2×10^6 см $^{-2}$ (рис. 8б). На пластинах изотропного пиролитического графита высота острий достигала 60 мкм с размером вершины такого же порядка величины. Для увеличения параметра преобразования поля проводилось их заострение в кислородной плазме. При этом на вершинах острий формировалась шероховатая поверхность, определяемая пористой структурой стеклоуглерода СУ-2000 (рис. 8в) [68].

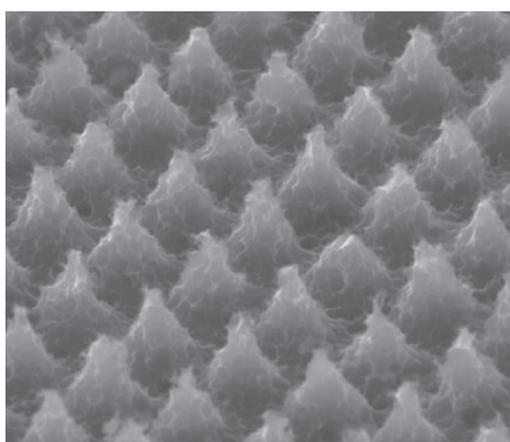
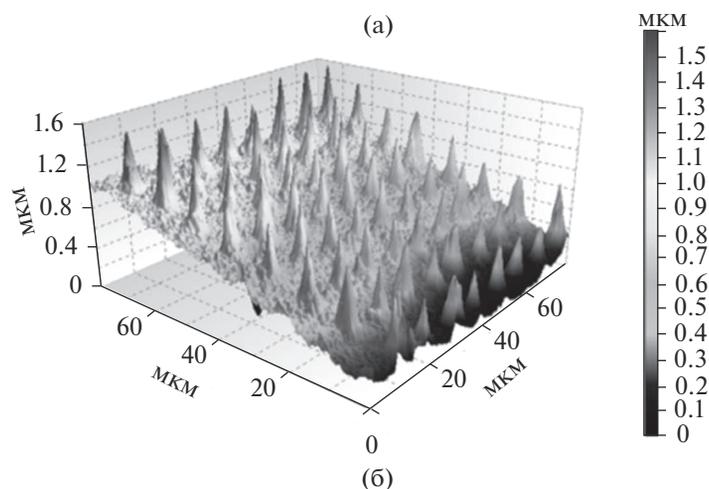
Стабильность эмиссии катодов из стеклоуглерода СУ-2000, так же как и других типов автоэмиссионных катодов, обеспечивалась их формовкой в сильных электрических полях [69]. Измерения ВАХ катодов проводились в диодах после их формовки при давлении остаточных газов $\sim 2 \times 10^{-7}$ Торр [70–73]. Максимальная плотность тока катода ~ 6.6 А/см 2 была получена в импульсном режиме. Дальнейшее увеличение плотности тока было ограничено высокой температурой анода (материал медь, молибден) и расплавлением участков его поверхности напротив острий (рис. 9). Последующие исследования диодов проводились с анодами из пиролитического графита или стеклоуглерода СУ-2000, способными рассеивать более высокие мощности электронного потока за счет более высокой рабочей температуры. Температура сублимации стеклоуглерода составляет $\sim 3700^\circ\text{C}$.

Вольт-амперные характеристики измеряли при различных зазорах между вершинами острий и плоскостью анода — от 0 мкм (касание анодом вер-

шин острий) до 200 мкм (рис. 10). Экспериментально установлено, что при сохранении макроскопической напряженности поля в диоде, автоэмиссионный ток катода возрастал с увеличением зазора диодного промежутка [74]. По мнению авторов, это связано с увеличением напряженности электрического поля на вершинах острий за счет возрастания коэффициента усиления электрического поля [75]. У катодов с различным аспектным отношением (с матрицей острий в форме прямого усеченного конуса, с текстурированной термохимическим травлением поверхностью и с полированной поверхностью) наблюдалась единая закономерность: возрастание коэффициента усиления электрического поля на вершинах эмиттеров с ростом величины зазора диодного промежутка (рис. 11а) [74, 75].

Данная закономерность может быть объяснена нарушением принципа геометрического подобия: при увеличении зазора диодного промежутка размеры острийных автоэмиттеров не изменялись. При зазорах, сравнимых с размером вершины острий, для “наблюдателя”, находящегося на поверхности анода, кривизна поверхности вершины острия практически не проявляется и напряженность электрического поля на вершине острия определяется потенциалом анода и величиной зазора, как в плоском конденсаторе. В этом случае коэффициент усиления поля определяется аспектным отношением острийных эмиттеров меньшего геометрического масштаба (наноострия), размещенных на вершинах острия, и не превышает 10 единиц [76]. С увеличением зазора все в большей степени проявлялось влияние кривизны поверхности острий, что приводило к увеличению напряженности поля и росту коэффициента усиления поля. При длине зазора, равной трем и более периодам матрицы, коэффициент усиления возрастал незначительно и его величина стремилась к некоторому максимальному значению, характерному для данной матрицы острий [77]. На рис. 11б представлены зависимости тока матричных автоэмиссионных катодов от напряженности электрического поля на эмиссионных центрах, которые были рассчитаны с учетом коэффициента усиления при различных зазорах катод–анод в диоде.

При зазорах, сравнимых с размером вершин острий, напряженность поля на вершинах большинства наноострий была примерно одинаковой, а количество эмиссионных центров максимально. Вследствие этого, эффективная площадь эмиссии, прямо пропорциональная количеству эмиссионных центров, имела максимальное значение при зазорах диода, сравнимых с размером вершин острий, и резко уменьшалась с увеличением зазора (рис. 12) [76, 78, 79]. Для фиксированного значения тока катода уменьшение эффективной площади эмиссии с увеличением зазора приводи-



(в)

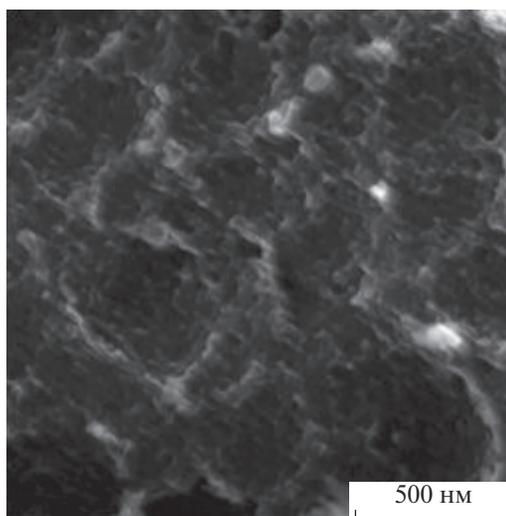


Рис. 8. Автоэмиссионные матрицы острий: а – из изотропного пиролитического графита; б – из стеклоглерода СУ-2000; в – структура поверхности на вершинах острий из стеклоглерода СУ-2000.

ло к возрастанию эффективной плотности тока на работающих эмиссионных центрах вплоть до критического значения, приводящего к их “взрыву” и пробую [80]. Для одиночного острия МАЭК

при малых зазорах эффективная площадь эмиссии составляла $\sim 3 \times 10^{-10}$ см² и равнялась примерно одной тысячной от площади вершины [79]. При больших зазорах эффективная площадь

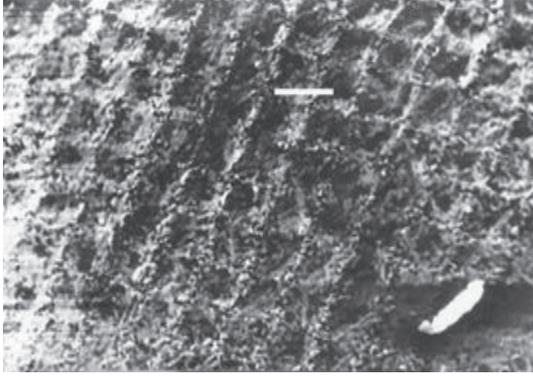


Рис. 9. Фотография поверхности анода из меди после испытаний в диоде с МАЭК.

эмиссии уменьшалась до $\sim 10^{-15}$ см², что, по порядку величины, сопоставимо с площадью эмиссии острий для катодов Спиндта, а эффективная плотность тока катода достигала $\sim 10^8$ А/см² [5].

Важной характеристикой автоэмиссионного катода является ширина спектра энергий электронов, которая определяет величину фазового объема электронного потока. При низких значениях температуры экспериментально измеренная ширина спектра хорошо согласуется с теоретическими данными и не превышает 1эВ [81]. При повышении температуры ширина спектра энергий увеличивается за счет термически возбужденных электронов [33]. Исходя из экспериментально полученной эффективной площади эмиссии МАЭК из стеклоглерода СУ-2000 в самом неблагоприятном режиме (при больших зазорах диода) эффективная плотность тока одиночного наноострия может достигать близкого к критическому значения, $\sim 10^9$ А/см². При такой плотности тока температура эмиссионных центров достигала

2800 К, а ширина спектра энергий возрастала до 7 эВ [82].

Стабильность эмиссии является одним из важнейших показателей эффективности и пригодности к эксплуатации автоэммиттеров. В [76] представлены результаты исследований влияния давления остаточных газов на стабильность эмиссии МАЭК из стеклоглерода СУ-2000 в диодах с анодами из молибдена и пиролитического графита. При изменении давления от 2×10^{-7} до 8×10^{-7} Торр в диоде с молибденовым анодом эмиссионный ток катода не изменялся, а его флуктуации возрастали с 3 до 15%. Дальнейшее увеличение давления приводило к уменьшению величины эмиссионного тока. При восстановлении давления до $\sim 4 \times 10^{-7}$ Торр эмиссия катода полностью восстанавливалась, а флуктуации катодного тока не превышали 1.5%. В диоде с анодом из пиролитического графита в аналогичных условиях уровень флуктуаций не превышал 0.5% и стабилизировался в течение короткого времени (рис. 13). Эмиссия катода с плотностью тока 0.36 А/см² и амплитудой флуктуаций не более 1.5% при напряжении анода 5.5 кВ сохранялась стабильной в течение 2000 ч испытаний в техническом вакууме.

В [83] приведены результаты исследований эмиссионных характеристик МАЭК с плотностью упаковки острий 1×10^6 см⁻² и большой площадью эмиссионной поверхности. Измерения проведены в диоде с анодом из стеклоглерода в импульсном режиме при длительности импульса 5 мкс и скважности 10000. При напряженности поля 155 В/мкм ток катода площадью 7 мм² составил 98 мА, а с катода площадью 100 мм² величина тока не превышала 160 мА. Ожидаемого увеличения тока пропорционально площади катода получить не удалось вследствие непараллельности анода с плоскостью острий и, как следствие, не-

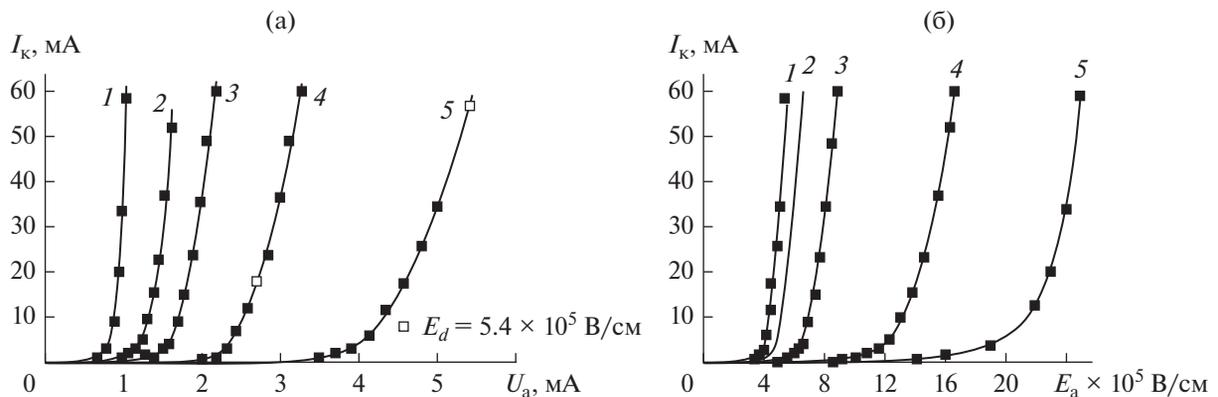


Рис. 10. Эмиссионные характеристики МАЭК в зависимости от изменения зазора диодного промежутка $d_{к-а}$: а – ВАХ при $d_{к-а} = 4$ (1), 10 (2), 25 (3), 50 (4) и 100 мкм (5); б – ток катода в зависимости от напряженности поля вблизи анода при $d_{к-а} = 100$ (1), 50 (2), 25 (3), 10 (4) и 4 мкм (5).

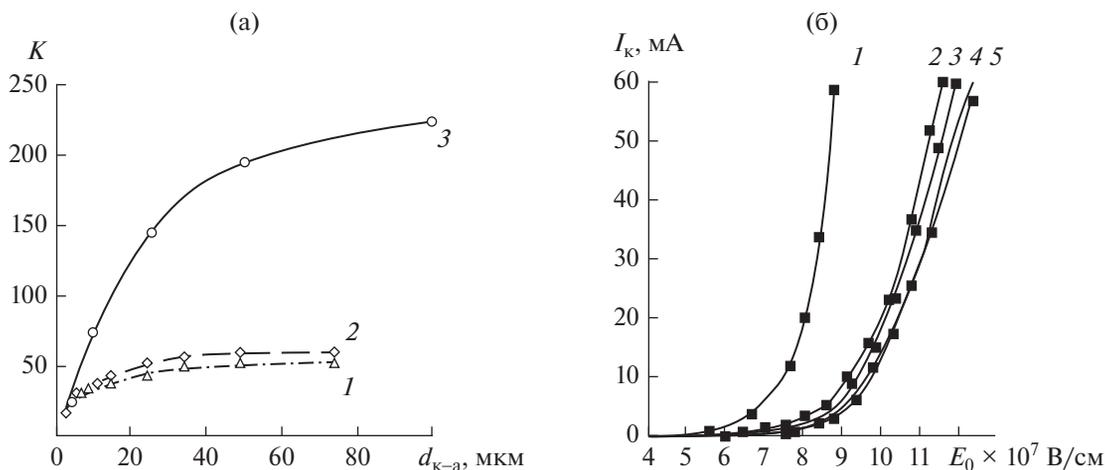


Рис. 11. Зависимость коэффициента усиления поля K в диоде от величины зазора катод–анод (а) – для катода с полированной поверхностью (1), с шероховатой поверхностью без острий (2) и с матрицей острий (3); зависимость тока катода МАЭК от напряженности поля на эмиссионных центрах (б) – при $d_{k-a} = 4$ (1), 10 (2), 25 (3), 50 (4) и 100 мкм (5).

равномерности распределения напряженности электрического поля по поверхности катода.

Для уменьшения рабочей напряженности электрического поля острия из стеклоуглерода покрывались пленкой нанокластеров толщиной 0.2...0.3 мкм из аллотропных фаз углерода [84]. Зарегистрировано смещение ВАХ в низковольтную область и снижение порогового значения напряженности поля с 47 до 23 В/мкм. Стабильность эмиссии во времени не исследовалась.

Катоды, сформированные термохимическим травлением, имеют низкий параметр преобразования поля, который определяется их малым аспектным отношением (около 10 единиц). Добротность острий, по классификации Т. Утсуми, ниже, чем у катодов Спиндта в форме пирамид. С учетом шероховатости поверхности вершин острий параметр добротности катодов составляет $F \sim 2.5 \times 10^{-5}$.

Для увеличения добротности была разработана технология формирования острий в форме иголок с аспектным отношением до 1000 единиц методом микроразмерного лазерного фрезерования [85–88]. На рис. 14 представлены фотографии катодов с одним, семью и девятнадцатью игольчатыми остриями, сформированными на диске диаметром 3.1 мм из стеклоуглерода СУ-2000.

Высота острий достигала 1.17 мм, а минимальный радиус вершин ~ 0.5 мкм (рис. 14а–14г). На рис. 14д и 14е представлены фотографии автоэмиссионного катода с 19-ю пьедесталами высотой до 500 мкм, диаметром основания ~ 300 мкм и радиусом закругления вершины ~ 60 мкм. Для повышения коэффициента усиления поля и увеличения

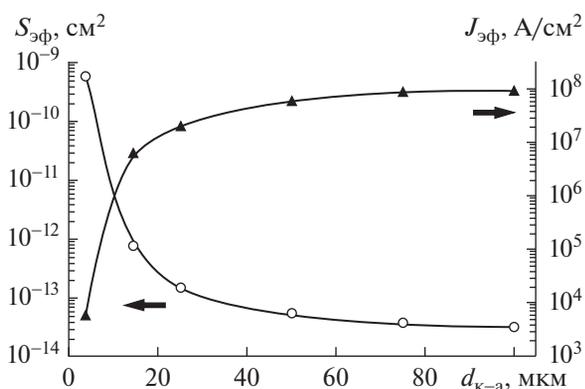


Рис. 12. Изменение эффективной площади эмиссии и эффективной плотности тока МАЭК от величины зазора в диоде.

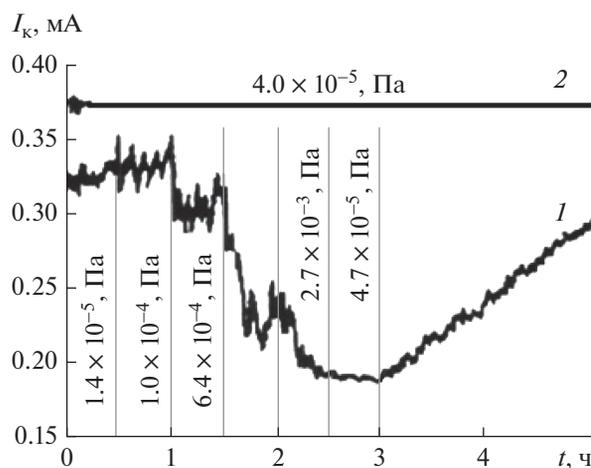


Рис. 13. Изменение тока катода и его флуктуаций в диоде при различных давлениях остаточных газов для анода из молибдена (1) и из пиролитического графита (2).

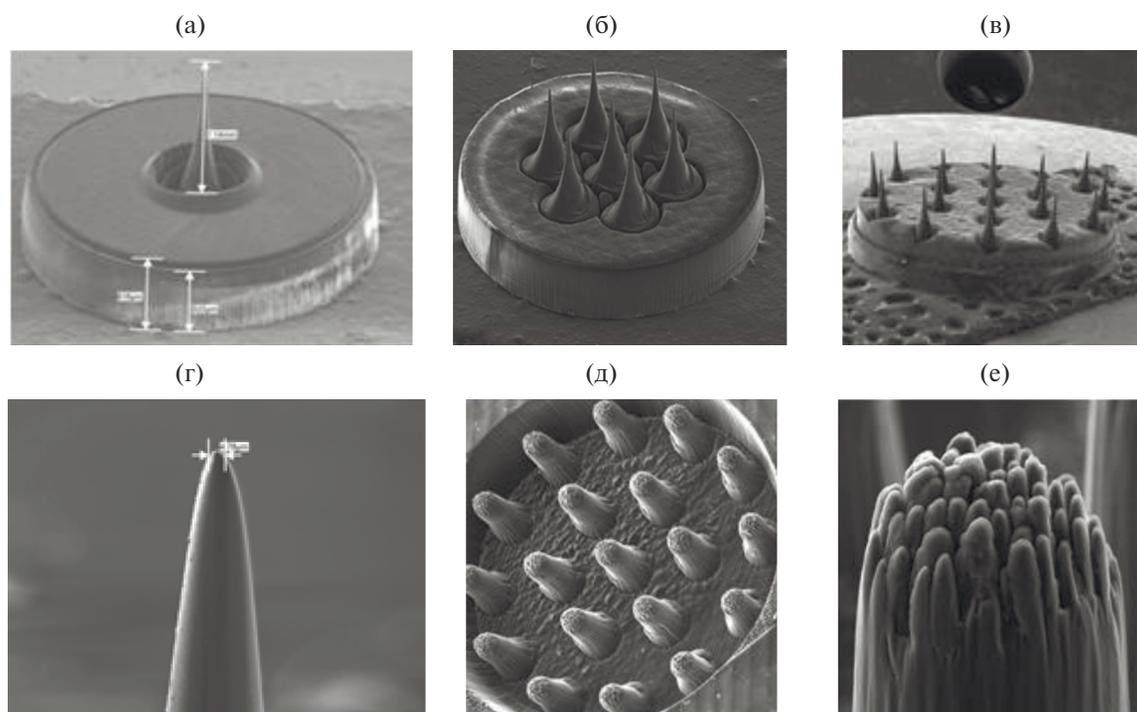


Рис. 14. Автоэмиссионные катоды из стеклоглерода СУ-2000: а – одиночное острие в форме “Эйфелевой башни”; б – семь острий; в – девятнадцать острий; г – вершина одиночного острия; д – катод с 19-ю пьедесталами и остриями на их вершинах; е – вершина пьедестала.

добротности катода на вершинах пьедесталов были сформированы острия меньшего масштаба – высотой ~ 40 мкм и радиусом закругления ~ 7 мкм.

Известно, что стеклоглерод СУ-2000 имеет пористую структуру, состоящую из полых фуллереноподобных сфероидов размером от 10 нм до 2.5 мкм [67, 89]. В процессе микроразмерного лазерного фрезерования можно было ожидать, что поверхность острий будет такой же шероховатой, как после термохимического травления (см. рис. 8в). Однако исследованиями поверхности на сканирующем электронном микроскопе показано, что поверхность острий является гладкой. Этот результат можно объяснить наличием у стеклоглерода жидкой фазы, которую он имеет лишь при температуре, близкой к температуре сублимации, $\sim 3700^\circ\text{C}$ и давлении 10.5 МН/м^2 . Вероятно, что оба условия для образования жидкой фазы стеклоглерода реализуются в процессе изготовления иголок при воздействии лазерного излучения с большой плотностью мощности. Гладкая поверхность вершин острий обеспечивает равномерность автоэлектронной эмиссии по всей поверхности, где напряженность поля достигает порогового значения и уменьшает вероятность пробоев, которые неизбежно возникают на эмиттерах с шероховатой поверхностью.

На рис. 15а представлены ВАХ триодной ячейки в непрерывном режиме с одиночным острием

высотой 480 мкм и радиусом кривизны вершины 5 мкм [85, 90, 91]. Толщина сетки с центральным отверстием диаметром 480 мкм составляла 120 мкм. Вершина острия была смещена на 180 мкм относительно центра отверстия и не доходила до наружной плоскости сетки на 50 мкм. Добротность ячейки составила ~ 0.02 .

Смещение ВАХ в низковольтную область при уменьшении давления остаточных газов связано с очищением поверхности острий от адатомов. Автоэлектронная эмиссия все в большей степени определялась работой выхода непосредственно стеклоглерода СУ-2000. Очищению поверхности также способствовал термический нагрев вершин острий джоулевым теплом при протекании собственного автоэмиссионного тока. Увеличение тока в непрерывном режиме сопровождалось ухудшением вакуума и снижением эмиссии вследствие разогрева сетки перехваченным ею током. В импульсном режиме величина тока 8 мА (рис. 15б) была ограничена тепловым режимом сеточной структуры.

Для электронных пушек со сходимостью была разработана технология формирования матриц игольчатых острий с большим аспектным отношением на криволинейных поверхностях (сферических и цилиндрических) [92].

Игольчатые острия с большим аспектным отношением из стеклоглерода СУ-2000 успешно

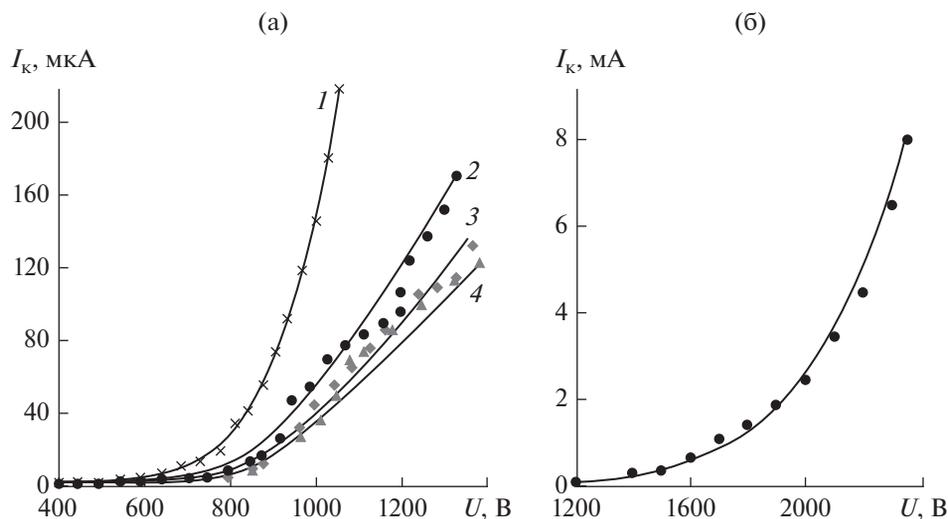


Рис. 15. Эмиссионные характеристики ячейки с одиночным острием: а – непрерывный режим при различном давлении остаточных газов: 5.8×10^{-7} (1), 7.2×10^{-7} (2), 8×10^{-7} (3) и 1×10^{-6} Торр (4); б – ВАХ в импульсном режиме при давлении 2×10^{-7} Торр.

прошли испытания на устойчивость к синусоидальным вибрациям с амплитудой ускорения до 20g в диапазоне частот 10...2000 Гц и к одиночным ударам с пиковым ускорением до 100g [93].

Одним из электронных устройств, где возможно применение одиночных острий из стеклоуглерода СУ-2000 с большим аспектным отношением являются рентгеновские трубки, в которых токи не превышают 1 мА. Высокое ускоряющее электронное напряжение 30...40 кВ способствует уменьшению углового разброса электронов и формированию на мишени пучка диаметром в несколько десятков микрометров.

5. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУШКИ И ЛБВ С АВТОЭМИССИОННЫМИ КАТОДАМИ

5.1. Электронные пушки с катодами из стеклоуглерода СУ-2000

Конструкции электронных пушек (ЭП) с автоэмиссионными катодами из стеклоуглерода СУ-2000 были созданы на базе конструкций и с использованием технологий, применяемых на предприятиях электронной промышленности при производстве электровакуумных приборов с термоэмиссионными катодами [94, 95]. Наиболее простой по конструкции и технологичной в исполнении являлась ЭП с токоперехватывающей сеткой, размещенной над вершинами острий. Танталовая сетка с квадратными отверстиями ($125 \times 125 \text{ мкм}^2$) была размещена на расстоянии 70 $\mu\text{м}$ над плоскостью катода. С катода диаметром 1.5 мм был получен ток 7.5 мА при напряжениях на сетке и аноде 9 кВ. Усредненная по катоду плотность автоэмиссионного тока составила

$\sim 0.42 \text{ А/см}^2$. Прямой перехват тока с острий под перемычками сетки приводил к ее разогреву, повышенному газоотделению и препятствовал получению более высоких значений тока.

Прямой перехват тока сеткой в значительной степени был устранен в конструкции электронной пушки с размещенной непосредственно на катоде многослойной сеточной структурой: проводник–диэлектрик–проводник (“сэндвич-сеткой”) [96]. Сэндвич-сетка состояла из пленки пиролитического нитрида бора толщиной 200 $\mu\text{м}$ с нанесенными с обеих сторон пленками из пиролитического графита толщиной 10 $\mu\text{м}$. Сеточная структура имела шесть отверстий диаметром 350 $\mu\text{м}$, размещенных на окружности диаметром 1.25 мм, и одно отверстие в центре. Острия с плотностью упаковки $2.5 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ были изготовлены на катодном диске диаметром 3 мм методом термохимического травления [65]. При напряжении на сетке 4.5 кВ плотность тока каждого из семи парциальных пучков за сеткой составляла $\sim 1 \text{ А/см}^2$, а токовая нагрузка на одиночное острие не превышала $\sim 4.2 \text{ мкА}$ (рис. 16) [77, 97].

Проводящий слой сэндвич-сетки (формирующая сетка), размещенный на вершинах острий ослабляет электрическое поле на катоде в кольцевой области, прилегающей к формирующей сетке [98]. Ослабление поля возрастает с увеличением ее толщины и позволяет, при определенном соотношении размеров сэндвич-сетки, устранить неравномерность распределения напряженности поля по диаметру ячейки, вызванную провисанием потенциала в отверстиях управляющей сетки. Вектор напряженности электрического поля в кольцевой области направлен к оси ячейки, за счет

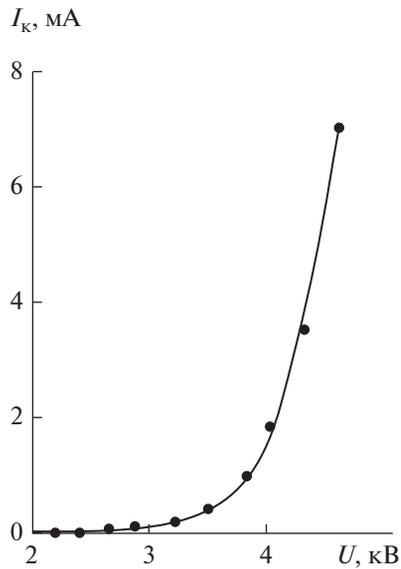


Рис. 16. Вольт-амперная характеристика триода с «сэндвич»-сеткой.

чего осуществляется фокусировка электронного потока. Выбор оптимального соотношения, связывающего толщины формирующей сетки, пленки диэлектрика, управляющей сетки и диаметр отверстия в сэндвич-сетке позволяет добиться равномерности распределения напряженности поля, а следовательно, и плотности тока, по поверхности катода в ячейке и сформировать электронный поток с минимальным углом расходимости на выходе из ячейки [99, 100]. Расходимость электронов в области вытягивающей сетки компенсировалась их сходимостью полем формирующей

сетки. В результате уравнивающего влияния разнонаправленного действия обеих линз электронный поток на выходе из ячейки имел кроссовер (рис. 17а) [101]. Добротность ячейки составила $\sim 1.3 \times 10^{-3}$.

Недостатком сэндвич-сетки, ограничивающим ее надежность и долговечность, являются омические утечки между катодом и управляющей сеткой по поверхности диэлектрика. При достижении плотности тока некоторого порогового значения фиксировались микроразряды (начальная стадия пробоя) в цепи катод–сетка, которые приводили к возрастающим во времени утечкам по боковой поверхности нитрида бора внутри ячейки и последующим пробоям. Следы пробоев были обнаружены на катоде по периметру ячеек (рис. 17б) и по периметру отверстий вытягивающей сетки (рис. 17в) [102]. Сопротивление в цепи катод–сетка уменьшилось с 1000 МОм до 6 кОм вследствие напыления углерода на изолирующую поверхность нитрида бора с разогретых до высокой температуры эмиссионных центров собственным автоэмиссионным током. Спектральный анализ поверхности нитрида бора после пробоев показал наличие углерода, что подтвердило данную гипотезу. Вероятно, аналогичные процессы характерны для миниатюрных ячеек типа Спиндта, в которых используется диэлектрик в качестве электрической изоляции промежутка катод–сетка. Для уменьшения вероятности возникновения пробоев и сохранения изоляционных свойств поверхности диэлектрика внутри ячейки необходимо избегать токовой перегрузки острий, работая на участке ВАХ с малой крутизной. Кардинальным решением данной проблемы является отказ от использования диэлектриче-

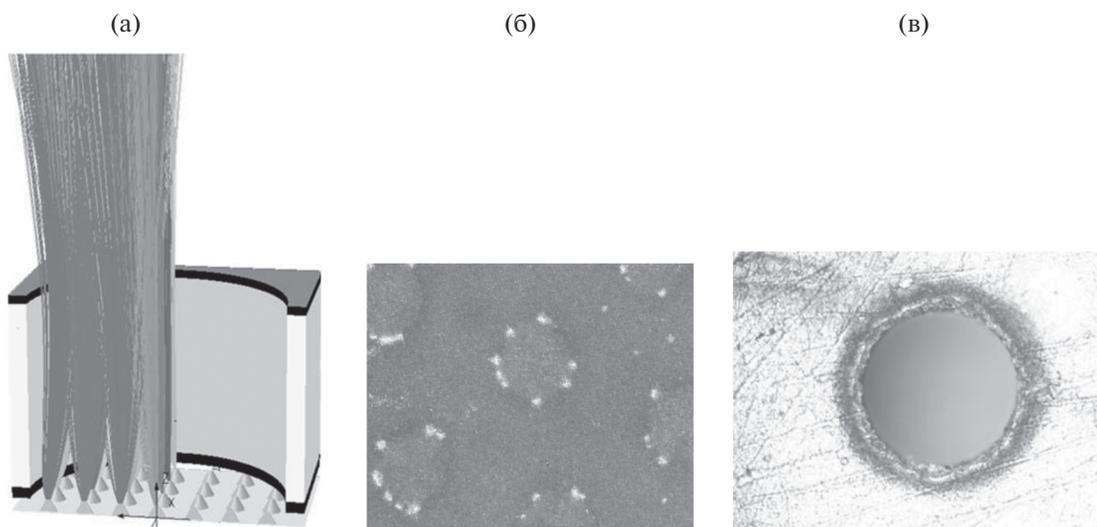


Рис. 17. Траектории электронов в «сэндвич»-ячейке (а); следы пробоев на поверхности катода (б); следы пробоев на сетке (в).

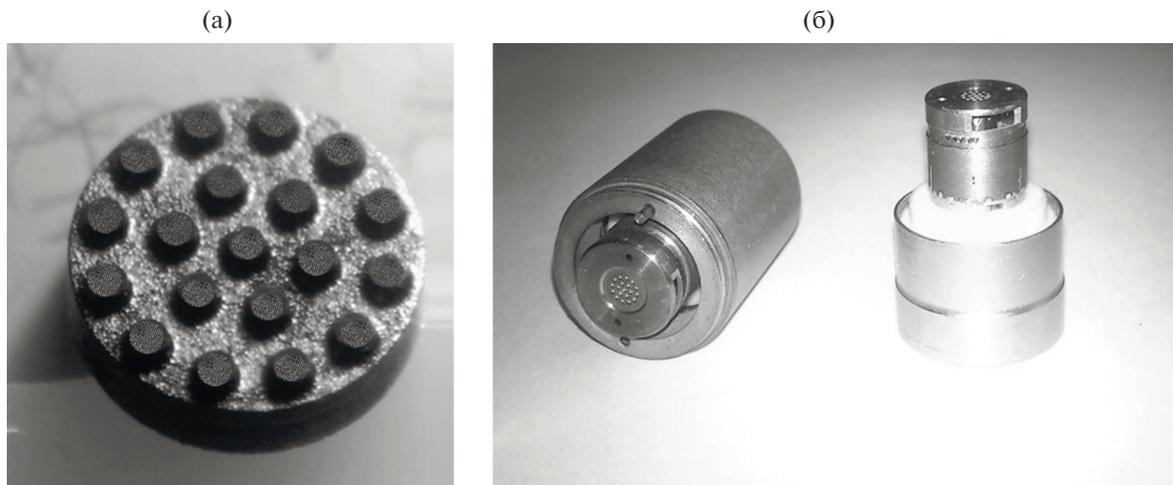


Рис. 18. Катодный диск с 19-ю парциальными цилиндрическими “катодами-пьедесталами” (а); электронная пушка в сборе (б).

ской изоляции между катодом и сеткой в пользу вакуума.

Вакуумный зазор катод–сетка был реализован в конструкции электронной пушки с 19-ю парциальными автоэмиссионными катодами из стеклогуглерода СУ-2000 в форме цилиндров, сформированных на катодном диске диаметром 3.1 мм методом электроискровой обработки (рис. 18) [79, 103]. Парциальные катоды-пьедесталы высотой 500 мкм и диаметром $d_k = 370$ мкм были размещены на двух концентрических окружностях с диаметрами 1.25 и 2.5 мм по 6 и 12 штук соответственно. Еще один катод был расположен в центре катодного диска. На плоской поверхности каждого парциального катода была сформирована матрица острий в форме усеченного конуса высотой 12 мкм и диаметром вершины ~ 1.6 мкм. Плотность упаковки острий составляла 1×10^6 см⁻². Управляющая сетка из анизотропного пиролитического графита толщиной 110 мкм с 19-ю отверстиями диаметром $d_c = 500$ мкм располагалась над поверхностью острий. Анод электронной пушки с 19-ю отверстиями диаметром $d_a = 500$ мкм был размещен соосно с отверстиями сетки и парциальными катодами. За анодом размещалась диафрагма из молибдена с малым (диаметром 30 мкм) отверстием, которая использовалась для измерения распределения плотности тока по диаметру пучка за анодом пушки и одновременно являлась коллектором для прошедших через анод электронов (рис. 19а).

При напряжении управляющей сетки $U_c = 6550$ В и токе катода $I_k = 270$ мА (рис. 19б) усредненное по поверхности парциальных катодов значение плотности тока составило ~ 13.2 А/см², а плотность тока в парциальных электронных пучках за анодом ~ 4.4 А/см². Коэффициент токопро-

хождения через анод составил 33% от тока катода. Линейность вольт-амперных характеристик в координатах Фаулера–Нордгейма свидетельствует об автоэмиссионном режиме работы катода (рис. 19в). Первеанс электронного пучка за анодом $P = 0.17 \times 10^{-6}$ А/В^{3/2}, добротность парциальной ячейки ~ 0.008 .

Результаты расчетов электростатических полей в парциальных ячейках [98, 104] показали неравномерность распределения напряженности электрического поля по поверхности парциального катода. Максимальное значение напряженности поля имело место в кольцевой области шириной не более 20 мкм на периферии катода-пьедестала (рис. 20а). Внутри кольцевой области, площадь которой не превышала 20% площади парциального катода, размещались примерно 220 острий. Электроны, эмитированные с периферийной кольцевой области, отклонялись электрическим полем от оси ячейки и оседали на боковой поверхности сетки и на аноде ЭП [105]. Ток с одиночного острия внутри кольца составил примерно 43 мкА, а усредненное по площади кольца значение плотности тока – более 40 А/см². Плотность тока на эмиссионных центрах достигала $\sim 7 \times 10^8$ А/см² (рис. 20б). Для центральной области парциального катода ток с одиночного острия составлял примерно 4.9 мкА, а плотность тока не превышала 5 А/см². Электроны, пролетевшие через анод, эмитировались в основном остриями из центральной области парциального катода.

На рис. 21 представлены измеренные с помощью диафрагмы с малым отверстием огибающие плотности тока электронного пучка, образованного пятью парциальными пучками на различных расстояниях от анода. Полуугол расходимости

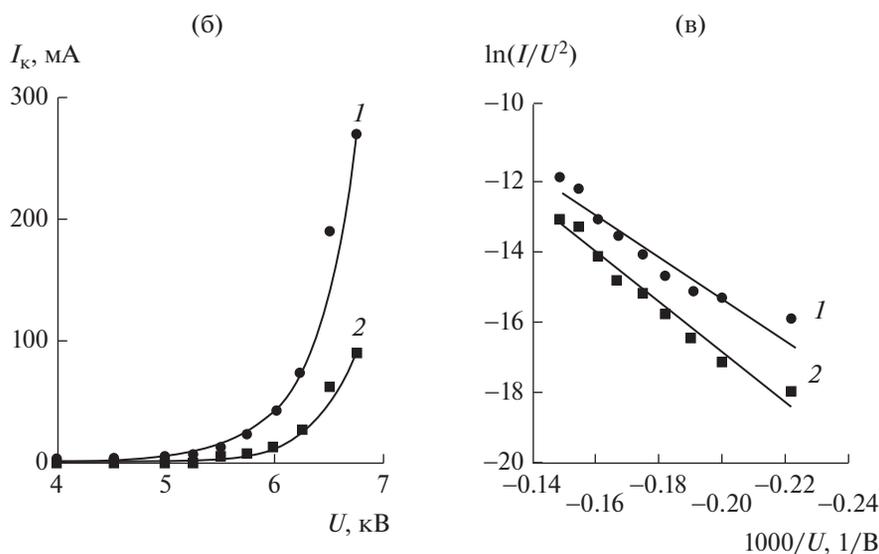
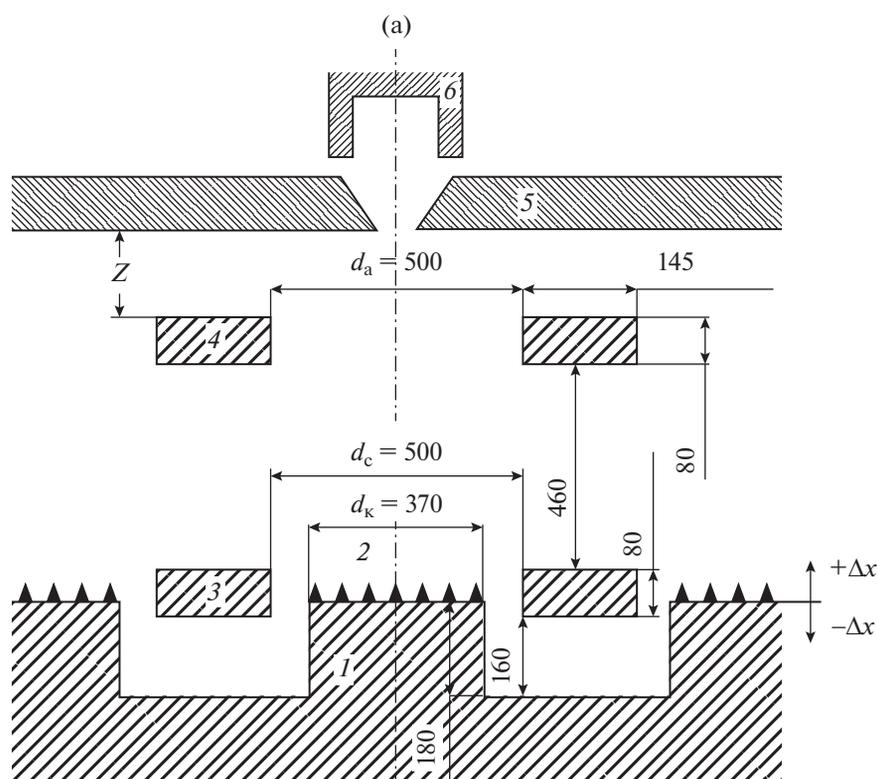


Рис. 19. Размерная схема (а) одиночной ячейки с острыми на “педестале”, все размеры даны в мкм; 1 – педестал; 2 – острия; 3 – сетка; 4 – анод; 5 – диафрагма с малым отверстием; 6 – коллектор электронов. ВАХ пушки (б) и пушки в координатах Фаулера–Нордгейма (в); 1 – ток катода; 2 – ток коллектора [103].

электронного пучка $\sim 13^\circ$ был сопоставим с полууглом расходимости пучка, сформированного пушкой с теневой и управляющей сетками и термоэмиссионным катодом. Электроны с большими углами наклона к оси были “вырезаны” перемычками вытягивающей сетки и анода. Недостатком конструкции пушки является высокое напряжение вытягивающей сетки вследствие низкой добротности парциальных ячеек.

Снижение рабочего напряжения на сетке может быть реализовано в конструкции электронной пушки, использующей ячейки с высокой добротностью за счет применения автоэммиттеров с большим аспектным отношением. Авторами [106–108] разработаны и экспериментально исследованы электронные пушки с острыми в форме иглы из стеклоглерида СУ-2000, изготовленными методом микроразмерного лазерного фрезерования.

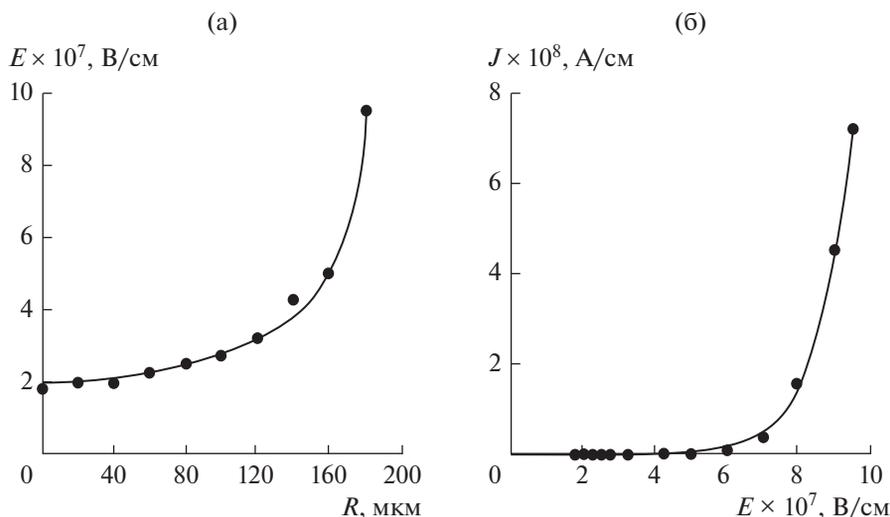


Рис. 20. Зависимости напряженности электрического поля по радиусу парциального катода (а) и плотности тока от напряженности поля (б).

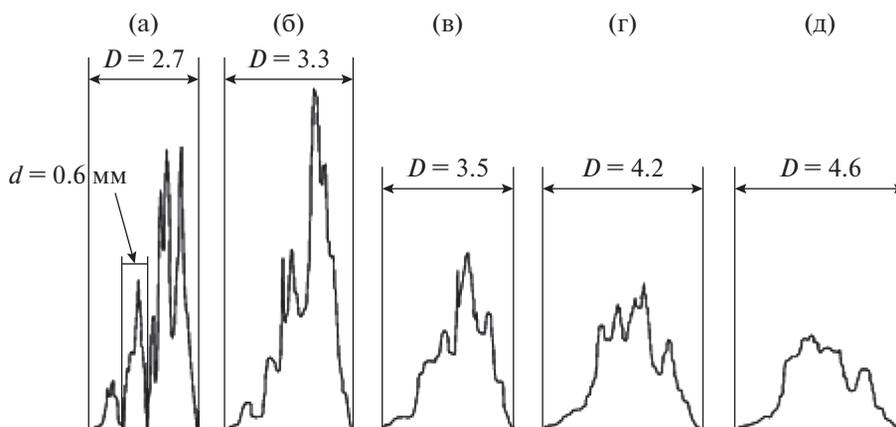


Рис. 21. Огибающие плотности тока по сечению пучка при различном удалении от анода: $Z = 0.7$ (а), 1.7 (б), 2.7 (в), 3.7 (г) и 4.7 мм (д); D – полный диаметр электронного пучка; d – диаметр парциального электронного пучка.

Острие высотой 870 мкм и радиусом кривизны вершины 2.5 мкм имело аспектное отношение ~350 единиц. Вершина острия была расположена в отверстии между верхней и нижней плоскостями сетки на расстоянии 40 мкм от внешней плоскости и смещена от центра ячейки на 80 мкм (рис. 22а). Сетка толщиной 120 мкм с центральным отверстием диаметром 400 мкм была изготовлена из гафния. Анод с отверстием диаметром 500 мкм располагался на расстоянии 200 мкм от сетки. Охлаждение коллектора электронов, размещенного за анодом пушки, осуществляли за счет теплопроводности на детали пушки и излучения.

Измерения ВАХ проведены в непрерывном режиме при напряжениях анода и коллектора 2000 В (рис. 22б). При токе с острия до 700 мкА оседание

на сетку не превышало 11%, а токопрохождение на коллектор составляло ~40%. При токах более 700 мкА оседание тока на сетку возрастало, ухудшался вакуум и регистрировались микроразряды. Поэтому дальнейшие измерения ВАХ проводили в импульсном режиме с длительностью импульса до 20 мкс и скважностью 650 (рис. 23а, 23б). Давление остаточных газов поддерживалось на уровне 2×10^{-7} Торр, которое измерялось на расстоянии 70 см от пушки. При увеличении напряжения на сетке перехваченный ею ток возрастал и достигал 37% при токе острия 14 мА. При дальнейшем увеличении тока вакуум ухудшался, регистрировались пробои, эмиссия с острия уменьшалась. При пиковом значении тока катода 14 мА плотность тока на вершине острия в форме полусферы

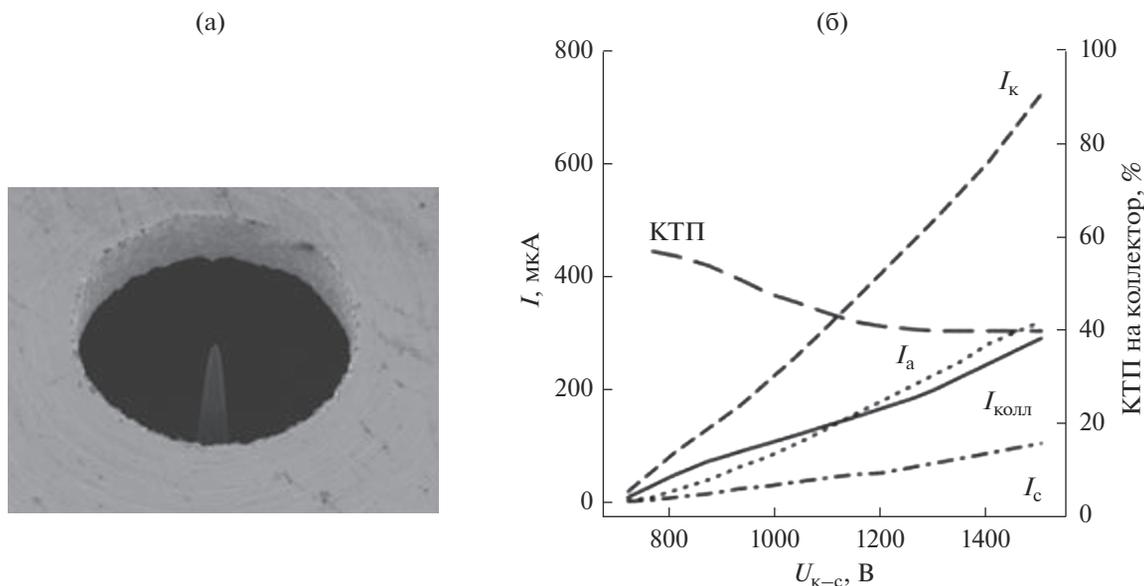


Рис. 22. Катодно-сеточный узел с одиночным острием (а), ВАХ электронной пушки в непрерывном режиме (б); КТП – коэффициент токопрохождения на коллектор.

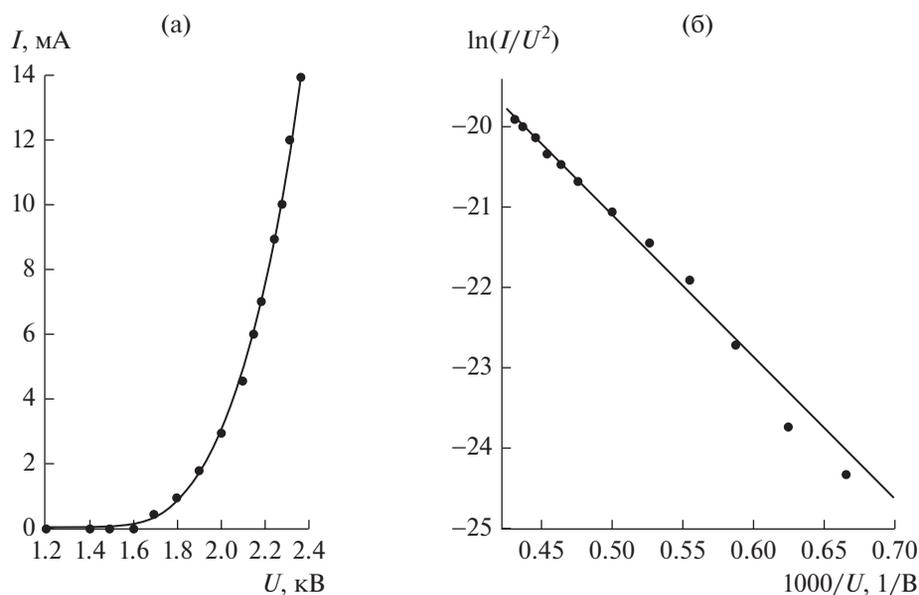


Рис. 23. Вольт-амперные характеристики (в координатах $I-U$ (а) и в координатах Фаулера–Нордгейма (б)) электронной пушки с единичным острием в импульсном режиме.

составила $\sim 3.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, а плотность тока в пучке, усредненная по площади отверстия в сетке, составляла 11.2 A/cm^2 [109, 110].

Добротность ячейки составила 0.06, что в 7.5 раз больше, чем добротность ячейки в 19-лучевой пушке, но в шесть раз меньше, чем добротность ячейки Спиндта. Увеличение добротности ячеек с острием в форме иглы возможно за счет уменьшения диаметра отверстия и уменьшения радиуса кривизны вершины острия.

В 1993 г. матричный автоэмиссионный катод из стеклоуглерода СУ-2000, изготовленный термохимическим травлением, был испытан в ЛБВ O -типа дециметрового диапазона [11, 12]. На катодном диске диаметром 1.5 мм была сформирована матрица острий высотой 9.0 $\mu\text{м}$ с диаметром вершины 7.0 $\mu\text{м}$ с плотностью упаковки $4.0 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$. На расстоянии 200 $\mu\text{м}$ от вершин острий размещалась сетка из анизотропного пиролитического графита толщиной 110 $\mu\text{м}$ с квад-

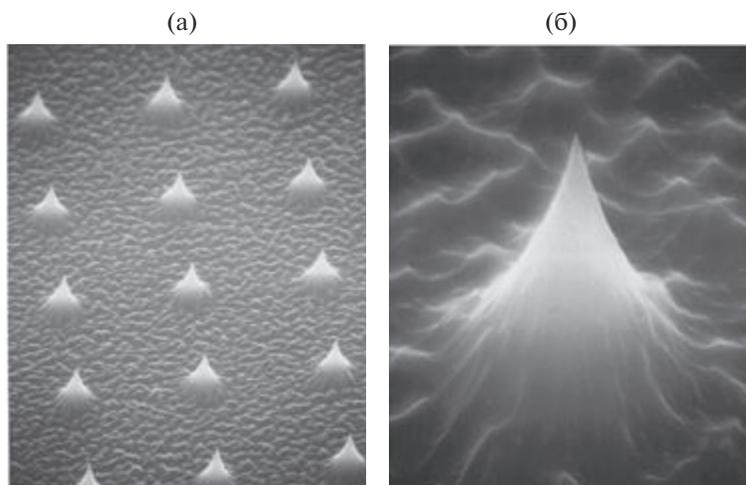


Рис. 24. Микроострия из стеклоглерода, изготовленные плазмохимическим травлением: а – матрица микроострий; б – одиночное острие [64].

ратными ячейками размером 175×175 мкм² и шириной перемычек 70 мкм. Оптическая прозрачность сетки составляла 50%. Перед испытаниями в ЛБВ эмиссионные характеристики катода были измерены в триоде с плоским анодом в импульсном режиме с длительностью импульса 20 мкс и скважностью 500 при давлении остаточных газов 1×10^{-7} Торр. При напряжении на сетке 8.5 кВ ток катода составлял 5 мА. Усредненная по катоду плотность тока равнялась 0.28 А/см². При напряжении 9 кВ ток катода увеличился до 7.5 мА, а плотность тока катода составила 0.42 А/см². В ЛБВ при напряжении сетки и замедляющей системы (ЗС) 3 кВ ток катода был равен 1.5 мА, а ток коллектора 60 мкА. При входной мощности 51.5 мВт на частоте 1470 МГц выходная мощность составила 32.7 мкВт, что соответствовало компенсации холдных потерь в ЗС на 40 дБ.

В 1997 г. в Корнельском университете США была разработана технология формирования матриц острий из стеклоглерода методом ионного травления в среде кислорода [64]. Острия высотой 5 мкм, диаметром основания 2.5 мкм и радиусом кривизны вершин 2 нм (аспектное отношение 2500) были сформированы на подложке из стеклоглерода размером $50 \times 50 \times 1$ мм³ с плотностью упаковки 1×10^{-6} см⁻² (рис. 24). Вольт-амперные характеристики катодной матрицы размером 1.2×1.2 мм² были исследованы в триоде с сеточным электродом прозрачностью 60%, размещенным над поверхностью катода на расстоянии 160 мкм от вершин острий. При напряжении на сетке 1350 В ток катода составил 50 мкА, ток анода 42 мкА (84% от тока катода), а ток с одиночного острия составил около 3.6 нА (рис. 25). Плотность тока катода, усредненная по всей его площади, составила 2.1 мА/см². Отклонение ВАХ

от прямой линии в координатах Фаулера–Нордгейма может быть связано с режимом термоавтоэлектронной эмиссии за счет разогрева кончиков острий джоулевым теплом. В этой связи полученный ток 3.6 нА с одиночного острия со столь малым радиусом кривизны, следует считать предельным, так же как и плотность тока с катода в 2.1 мА/см², что совершенно не достаточно для использования данного катода в приборах СВЧ-диапазона.

5.2. Электронные пушки с катодами на основе УНТ

В работе [111] представлены результаты исследований планарного триода с катодом из плотно упакованных УНТ, сформированных методом химического осаждения из паровой фазы. Эмитирующие области на поверхности катода, образованные плотно прилегающими друг к другу УНТ, представляли собой квадраты со стороной 54 мкм, отстоящие друг от друга на 31 мкм (рис. 26). УНТ не были выровнены по высоте и имели различные аспектные отношения. Молибденовая сетка толщиной 25 мкм с квадратными отверстиями и геометрической прозрачностью 40% была размещена над поверхностью катода на расстоянии 70 мкм через изолирующую пленку из слюды толщиной 70 мкм. Расстояние между катодом и анодом составляло 100 мкм. Совмещение эмитирующих областей с отверстиями сетки было осуществлено с помощью оптического микроскопа. Расстояние анод–сетка составляло 1 мм. При напряжениях на сетке 600 В и аноде 2000 В ток катода составил 370 мкА, а плотность тока в пучке 0.35 мА/см² (рис. 27). Прозрачность сетки по току составила 13%, что свидетельствовало о перехвате тока боковыми стенками сетки на уровне 27% от тока катода. Параметр добротности одной

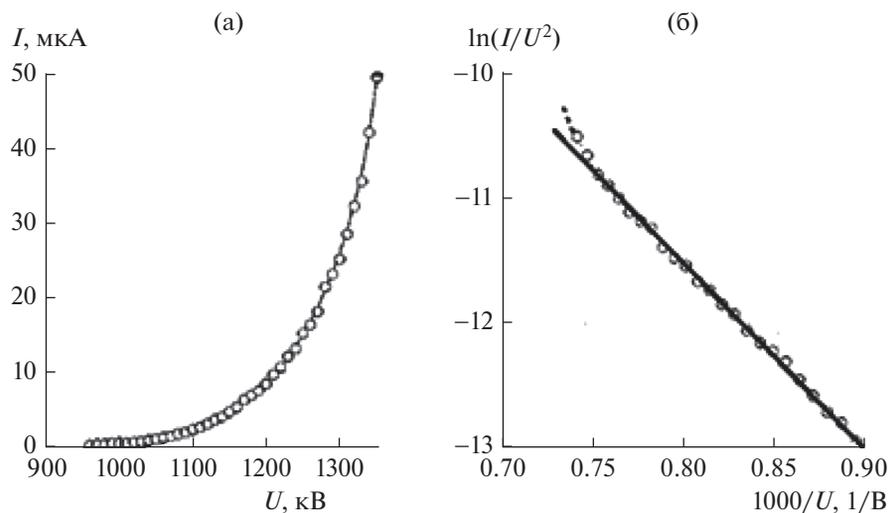


Рис. 25. Вольт-амперные характеристики триода с УНТ в координатах $I-U$ (а) и в координатах Фаулера–Нордгейма (б) [64].

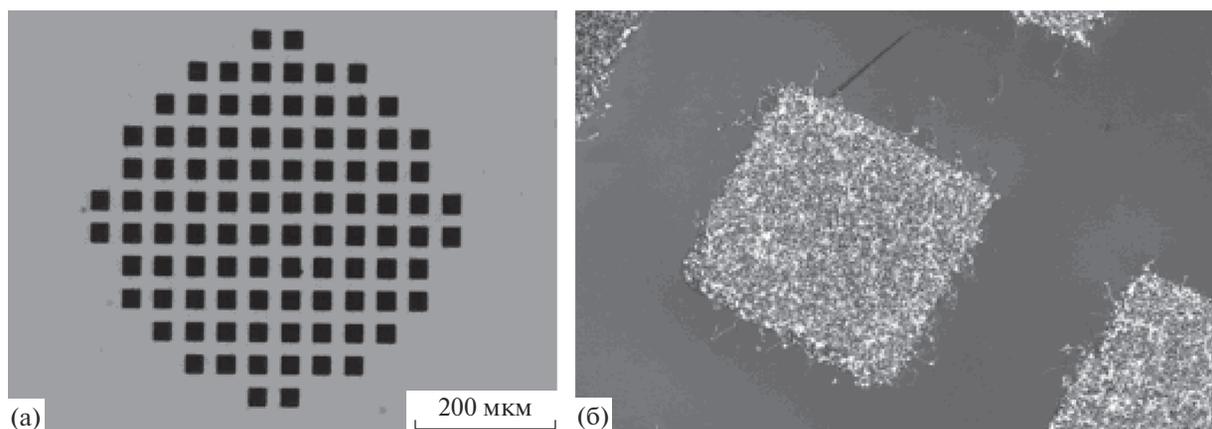


Рис. 26. Катод с плотно упакованными УНТ: а – общий вид; б – единственный эмитирующий элемент поверхности катода [111].

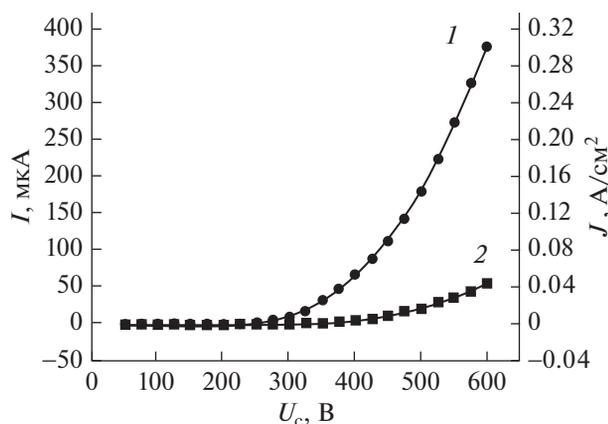


Рис. 27. Вольт-амперные характеристики триода с УНТ: 1 – ток анода; 2 – ток сетки.

ячейки катода составил примерно 3×10^{-4} . После оптимизации конструкции авторы высказали уверенность в том, что плотность тока катода может увеличиться до нескольких сотен миллиампер на квадратный сантиметр.

В работе [112] представлены результаты испытаний электронной пушки с выровненными по высоте нанотрубками. Технология получения нанотрубок и конструкция триода аналогичны технологии и конструкции триода в [111]. Шаг сетки с квадратными ячейками размером 110×110 мкм² составил 130 мкм. Вольт-амперная характеристика катода диаметром 1 мм приведена для диодного режима (рис. 28). При максимальном токе катода 36 мА плотность тока с катода составила 4.5 А/см². Добротность ячейки катода составила ~ 0.005 .

На основе экспериментальных ВАХ был проведен расчет электронной пушки для ЛБВ со сходимостью электронного потока по диаметру 3.3 : 1. Авторы [112] отметили, что им удалось добиться хорошей ламинарности электронного пучка.

Французская фирма Thales Electron Devices при финансовой поддержке Европейского космического агентства (проект CVED) разработала и испытала лабораторный образец ЛБВ С-диапазона с автоэмиссионным катодом на основе УНТ и с сеткой, отделенной от катода вакуумным зазором [113]. Авторы статьи считают принципиально важным в пушках с УНТ использование вытягивающей сетки, не интегрированной с катодом, а отделенной от него вакуумным зазором. Ими была усовершенствована технология формирования матрицы отдельно стоящих УНТ на пятнах катализатора малых размеров с большой плотностью упаковки. В результате напряженность поля была снижена на 39% по сравнению с катодом из пучков нанотруб. Перехват тока катода сеткой составил около 30%. Катод с током эмиссии 450 мкА проработал в течение трех месяцев. Катод диаметром 1/2 от диаметра спирали был испытан в ЛБВ С-диапазона с током 4 мА в импульсном режиме. Величина тока, прошедшего на коллектор, составила 2.1 мА. Даже при таком малом токе ЛБВ продемонстрировала положительное усиление 2.8 дБ.

Увеличение плотности тока в электронном пучке традиционно осуществляют за счет его компрессии по площади в области пушки с криволинейной поверхностью катода. Автоэмиссионные катоды, изготовленные по полупроводниковой технологии, являются планарными, что существенно затрудняет осуществление компрессии электронного пучка и нарушает его ламинарность. Этот недостаток был устранен в конструкции традиционной пушки Пирса со сферической поверхностью катода, рабочая поверхность которого была покрыта пастой из стеклообразного фритта с измельченными и перемешанными в нем углеродными нанотрубками [114].

В работах [115, 116] представлены результаты компьютерного проектирования и экспериментального исследования электронных пушек со сходимостью для ЛБВ на основе УНТ, синтезированными методом химического осаждения из паровой фазы, измельченными и перемешанными в пасте из органических веществ. Пасту высушивали, наносили тонким слоем на поверхность катода диаметром 4.3 мм и радиусом кривизны рабочей поверхности 9.73 мм, а затем запрессовывали на сферическую поверхность катода металлическим стержнем с тем же радиусом кривизны.

По программе MAGIC2D были проведены расчеты геометрии электродов, их взаимное расположение и потенциалы, а так же проведен тра-

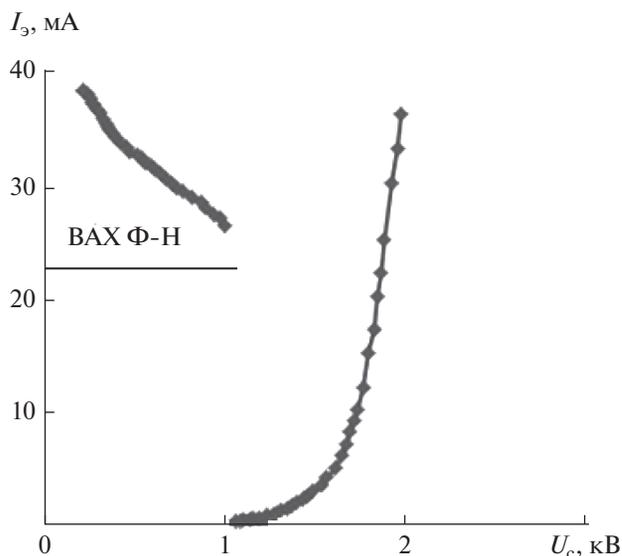


Рис. 28. Вольт-амперная характеристика диода с выровненными по высоте УНТ; на вкладке — ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма [112].

екторный анализ электронного потока внутри ЭП и в поле магнитной периодической фокусирующей системы с диаметром пролетного канала 2.7 мм. При сохранении напряженности электрического поля между катодом и сеткой 5 В/мкм увеличение напряжения на аноде с 4 до 8 кВ позволило уменьшить радиус пучка в кроссовере с 0.93 до 0.68 мм.

Вольт-амперные характеристики катода были измерены в диоде со сферическим анодом, который был размещен на расстоянии 480 мкм от поверхности катода. При напряжении анода 2400 В, что соответствовало напряженности поля в диодном зазоре 5 В/мкм, был получен ток катода 11 мА. Усредненная по поверхности катода плотность тока автоэлектронной эмиссии составила 73 мА/см². Были изготовлены две ЭП с сеткой толщиной 38 мкм и размером отверстий 0.216 × 0.216 мкм². Сетка размещалась на расстоянии 200 мкм от поверхности катода. Оптическая прозрачность сетки составляла 72%. Измерения характеристик пушек были проведены в импульсном режиме с длительностью импульса 100 мкс, частотой следования 10 Гц при давлении остаточных газов до 2 × 10⁻⁷ Торр. При напряжениях на сетке 1.38 кВ и аноде 4 кВ ток катода составил 2.8 мА, а ток анода 1.8 мА. Прохождение катодного тока через сетку составило 64%, что на 8% меньше ее геометрической прозрачности.

Авторы отметили трехкратное снижение тока автоэлектронной эмиссии катода после проведения технологических операций сборки пушки, одной из которых являлась лазерная приварка электродов. Были выражены сомнения в возмож-

ности получения более высоких значений тока и плотности тока с катодов на основе УНТ.

5.3. Электронные пушки и ЛБВ с катодами Спиндта

Первый экспериментальный образец ЛБВ О-типа с катодом Спиндта был разработан в 1997 г. [13]. Электронная пушка содержала катод диаметром 0.84 мм с 14350 молибденовыми острьями в форме конуса с плотностью упаковки $2.6 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$. При напряжении на вытягивающей сетке 115 В ток катода составил 58 мА, что соответствовало плотности тока 10 А/см^2 , ток с одиночного острья $\sim 4 \text{ мкА}$. Токпрохождение на коллектор не превышало 83%. Оседание тока на ЗС становилось заметным при напряжении на сетке 80 В, токе катода 10 мА и возрастало по мере увеличения напряжения на сетке. Выходная мощность при токе насыщения 58 мА на частоте 10.5 ГГц в полосе 3 ГГц при КПД 14% и усилении 19.5 дБ составила 27.5 Вт. Параметр добротности единичной ячейки данного катода составил $\sim 7.6 \times 10^{-3}$.

Теми же авторами была создана модернизированная ЛБВ. Диаметр эмитирующей поверхности катода был уменьшен до 0.6 мм, изменены размеры фокусирующего электрода. В аноде был размещен коллиматор для осаждения электронов с большими поперечными скоростями. При токе на коллектор 29 мА и усилении 22 дБ получена выходная мощность 8 Вт на частоте 11.5 ГГц.

Объединенные усилия компаний L-3 Communications и SRI International привели к серии публикаций по созданию ЛБВ О-типа на катодах Спиндта. В [117] приведены данные о создании ЛБВ с выходной мощностью 55 Вт на частоте 4.5 ГГц при усилении 23.4 дБ и КПД 17%. Был использован катод Спиндта диаметром 1 мм с 50000 молибденовыми острьями. При напряжении на сетке 250 В и усредненной по матрице острей плотности тока 19 А/см^2 ток катода составил 91.4 мА. Для уменьшения углового разброса электронов в пучке была применена система электростатических линз, которая также защищала катод от бомбардировки ионами. При напряжении на ЗС 5000 В перванс электронного пучка был равен $0.27 \times 10^{-6} \text{ А/В}^{3/2}$. Параметр добротности единичной ячейки $\sim 7 \times 10^{-4}$.

В 2002 г. разработан ЛБВ-усилитель, работающих в диапазоне частот 3.9...6.75 ГГц [118]. Диаметр катода был равен 0.3 мм. При плотности тока 7 А/см^2 и токе катода 5.03 мА токпрохождение на коллектор составило 98.5%. На частоте 6.8 ГГц импульсная выходная мощность с периодом следования импульсов 100 мкс составила 280 мВт.

В 2008 и 2009 г. опубликованы результаты испытаний ЛБВ в С-диапазоне с выходной пиковой мощностью 100 Вт [14, 32]. Катод Спиндта диа-

метром 1 мм содержал матрицу молибденовых острей с увеличенной плотностью упаковки до $6.25 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$, что позволило снизить напряжение на вытягивающей сетке с 280 до 79 В при токе с единичного острья 2.4 мкА и плотности тока по матрице 15.4 А/см^2 . При напряжении ЗС 3500 В пиковое значение тока с катода в режиме одиночных импульсов составило 121 мА. Добротность единичной ячейки $\sim 9 \times 10^{-3}$. Для фокусировки электронного пучка была использована периодическая магнитная фокусирующая система, обеспечивающая в статическом режиме токпрохождение на многоступенчатый коллектор 99.4 и 97.3% в режиме максимальной выходной мощности. Авторы отмечали, что электронный пучок имел значительно более высокий эмиттанс по сравнению с аналогичным пучком, сформированным пушкой с термоэмиссионным катодом. Однако авторы не видят трудностей с фокусировкой и сопровождением пучка с малыми потерями в данном диапазоне длин волн. В режиме одиночных импульсов пиковое значение выходной мощности на частоте 5 ГГц составило 100 Вт при КПД 24%. Усиление в режиме малого сигнала составило 32.7 дБ, а в режиме насыщения 22.1 дБ. В составе ЛБВ катод Спиндта проработал ~ 150 ч при различных значениях коэффициента заполнения импульса, уровнях катодного тока и выходной мощности.

В 2013 г. компания L-3 Communications опубликовала результаты испытаний лабораторного образца ЛБВ X/Ku-диапазона [32]. По мнению авторов, была продемонстрирована "превосходная фокусировка электронного пучка" и положительное усиление выходного сигнала в диапазоне частот 6...18 ГГц при токе катода 50 мА. Выходная мощность сигнала на частоте 10 ГГц при максимальном усилении 13.5 дБ составила 10 Вт. В данной работе впервые отмечены сложности, приводящие к снижению эмиссии катода при встраивании электронной пушки в ЛБВ. Впервые также было отмечено, что в процессе работы катода в ЛБВ С-диапазона были выявлены проблемы с возрастающими утечками по поверхности разделяющего катод и сетку диэлектрика. С целью минимизации утечек была модернизирована конструкция ячейки. Между разделяющим катод и сетку слоем диэлектрика из окиси кремния и сеткой был сформирован дополнительный слой диэлектрика с меньшим, чем у сетки, диаметром отверстия. Перед размещением в ЛБВ электронная пушка с измененной конструкцией катодной матрицы проработала в непрерывном режиме 100 ч с током 100 мА. Добротность единичной ячейки измененной конструкции составила ~ 0.01 .

Аналогичные исследования по созданию электронных пушек на катодах Спиндта для ЛБВ проводились в Пекинском НИИ по вакуумной электро-

нике [119]. Катоды диаметром 0.6 мм содержали по 17500 молибденовых острий и были испытаны в составе электронной пушки при вакууме $\sim 4 \times 10^{-8}$ Торр. Авторы констатировали уменьшение тока катода с 30 до 4.2 мА при встраивании электронных пушек с катодами Спиндта в ЛБВ с использованием традиционных для термоэмиссионных катодов технологий сборки. В дальнейшем были исключены технологические операции лазерной сварки вблизи катода, а его крепление к корпусу осуществляли механически – прижимом электродом Венельта [120]. Потеря эмиссии катодов, по мнению авторов, была связана с газоотделением из электродов и внутренней оболочки прибора, что приводило к деградации острий в результате их бомбардировки ионами с высокими энергиями и пробоями внутри ячеек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как известно, главным требованием со стороны современных СВЧ-приборов, которому должны удовлетворять автоэмиссионные катоды, это стабильная и долговременная (по крайней мере ~ 1000 ч) работа при плотностях тока $1...20$ А/см² в условиях технического вакуума и бомбардировки ионным потоком с энергией от единиц до десятков киловольт. Требованию по плотности тока катоды Спиндта удовлетворяют в полной мере. Однако стабильность и долговечность работы в ЛБВ более 150 ч к настоящему времени не подтверждена. Остается нерешенной проблема утечек в цепи катод–сетка по разделяющей их керамике. Большая величина паразитной емкости, вызванная миниатюризацией и использованием разделяющего катод и сетку диэлектрика, увеличивает длину фронта импульса мощности выходного сигнала до 25 мкс, что на два порядка превосходит допустимые требования со стороны радиоаппаратуры. Уменьшение емкости представляется возможным за счет отказа от разделяющего катод и сетку диэлектрика в пользу вакуума и увеличения зазора катод–сетка, формируя автоэммиттеры с большим аспектным отношением за счет увеличения их высоты.

Для увеличения плотности тока в электронном пучке за счет его компрессии по площади необходимо разработать технологии формирования автоэмиссионных ячеек на криволинейных (сферической или цилиндрической) поверхностях. Современная технология формирования матриц Спиндта, основанная на полупроводниковой технологии и литографии, такими возможностями не обладает.

Катоды на основе УНТ продемонстрировали значения плотности тока в десятки ампер на квадратный сантиметр лишь в диодном режиме. Формирование ячеек “типа Спиндта” с УНТ и

интегрированной через пленку диэлектрика сеткой находится на стадии технологической разработки. Однако, даже в случае реализации таких конструкций, вряд ли следует ожидать плотности тока автоэлектронной эмиссии более 1 А/см² вследствие взаимной экранировки плотно расположенных УНТ в ячейках. Кроме того, ячейкам с УНТ и диэлектрическим зазором будут присущи недостатки, характерные для аналогичных ячеек Спиндта как по длительности нарастания фронта импульса выходной мощности, вследствие большой емкости, так и по недостаточно надежной электрической изоляции зазора катод–сетка.

По совокупности требований, предъявляемых к автоэмиссионным катодам со стороны СВЧ-приборов, в том числе и по вибропрочности, автоэмиссионные катоды из стеклоуглерода СУ-2000 с большим аспектным отношением, гладкой поверхностью вершины с радиусом кривизны в единицы микрометров и вакуумным зазором катод–сетка, данным требованиям в основном удовлетворяют. Однако автоэмиссионные ячейки с игольчатыми остриями нуждаются в усовершенствовании с целью уменьшения рабочего напряжения на сетке, которое может быть снижено за счет уменьшения диаметра отверстий в сетке с 400 до 200 мкм и менее при существующих технологиях и оборудовании.

Одной из характерных особенностей всех типов автоэмиссионных катодов является наличие больших поперечных скоростей электронов, которые вызваны не только большим углом эмиссии с острий, но и, в большей степени, линзовым эффектом в отверстиях вытягивающей сетки. Большой фазовый объем автоэлектронных потоков является главным препятствием для их использования в ЛБВ и клистронах миллиметрового и, тем более, терагерцового диапазонов. Для сопровождения сформированных автоэмиссионными ячейками электронных пучков в пролетных каналах малого размера требуются магнитные поля порядка 1 Тл и напряжения на аноде пушки более 15000 В [110].

Основным фактором, снижающим длительность работы любых типов автоэмиссионных катодов в техническом вакууме, является разрушение вершин автоэммиттеров ионами, которые образуются как вдали от автоэммиттера (пространство взаимодействия и коллектор электровакуумного прибора), так и внутри автоэмиссионной ячейки. В этой связи более предпочтительной (в сравнении с конфигурацией “острие в ячейке”) может оказаться конструкция ячейки с автоэммиттерами, расположенными на ее периферии, где ионам предоставляется возможность осаждаться в центральной области ячейки, свободной от автоэммиттеров. В области электронной пушки необходимо формировать ионную ловушку с помощью дополнительного электрода (или нескольких электродов), ко-

торый размещается между вытягивающей сеткой и анодом и имеет нулевой или отрицательный потенциал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Charboneer F.M., Barbour J.P., Garrett L.F., Dyke W.P.* // *Pros. IEEE*. 1963. V. 51. № 7. P. 989.
2. *Dyke W.P., Trolan J.K.* // *Phys. Rev.* 1953. № 89. P. 799.
3. *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* Автоэлектронная эмиссия: принципы и приборы. Долгопрудный: ИД “Интеллект”, 2011.
4. *Бондаренко Б.В., Шешин Е.П., Шука А.А.* // *Зарубеж. электрон. техн.* 1979. № 2. С. 3.
5. *Фурсей Г.Н.* Автоэлектронная эмиссия. СПб.; М.: Лань, 2012.
6. *Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В.* Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ “Колледж”, 1996.
7. *Трубецков Д.И., Краснова Г.М.* // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2013. Т. 21. № 1. С. 35.
8. *Spindt C.A.* // *J. Appl. Phys.* 1968. V. 39. № 6. P. 3504.
9. *Lally P.M., Mack C.D., Spindt C.A.* // *Proc. IEEE Microwave Power Tube Conf.* 1986. Monterey. CA. N.Y.: IEEE, 1986.
10. *Grigoriev Y.A., Rehen G.A., Semenov V.C., Shesterkin V.I.* // *Tech. Dig. Int. Vacuum Microelectronics Conf. (IVMC-93).* Newport. USA. 12–15 Jul. 1993. P. 156.
11. *Григорьев Ю.А., Рехен Г.А., Семенов В.К., Шестеркин В.И.* // *РЭ.* 1995. Т. 40. № 7. С. 1127.
12. *Grigoriev Y.A., Petrosyan A.I., Penzharov V.V. et al.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 1997. V. 15. P. 503.
13. *Imura H., Tsuida S., Takahai M. et al.* // *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meeting (IEDM-97).* 10 Dec. 1997. N.Y.: IEEE, 1997. P. 721.
14. *Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M. et al.* // *IEEE Trans. ED.* 2009. V. 56. № 5. P. 896.
15. *Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M. et al.* // *Proc. IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC'08).* Monterey. CA. 22–24 April. 2008. N.Y.: IEEE, 2008.
16. *Бродский А.М., Гуревич Ю.Я.* Теория электронной эмиссии из металлов. М.: Наука, 1973.
17. *Forbs R.G.* // *Proc. IEEE IVESC-ICEE-2014.* Saint-Petersburg. Russia. June 30–July 04. 2014. N.Y.: IEEE, 2014. P. 87.
18. *Semet V., Adessi Ch., Capron T. et al.* // *Phys. Rev.* 2007. V. 75. 045430.
19. *Гилмор А.С., мл.* Лампа с бегущей волной. М.: Техносфера, 2013.
20. *Coupling J.J.* A pseudonym of J.R. Pierce. 1964. (Цит. по: [19]).
21. *Мелешкевич П.М.* // *Электрон. техн. Сер. 1. СВЧ-техника.* 2016. № 4. С. 6.
22. *Utsumi T.* // *IEEE Trans.* 1991. V. ED-38. № 10. P. 2283.
23. *Ненакаливаемые катоды / Под ред. Елинсона М.И.* М.: Сов. радио, 1974.
24. *Елецкий А.В.* // *Успехи физ. наук.* Т. 180. № 9. С. 897.
25. *Петрин А.Б.* // *ЖЭТФ.* 2009. Т. 136. № 2. С. 369.
26. *Spindt C., Holland C., Schwoebel P.* // *Proc. IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC'14).* Monterey. CA. 22–24 April 2014. N.Y.: IEEE, 2014. P. 149.
27. *Баскин Л.М., Глазанов Д.В., Фурсей Г.Н.* // *ЖТФ.* 1989. Т. 59. № 5. С. 130.
28. *Dyke W.P., Trolan J.K., Martin E.E., Barbour J.P.* // *Phys. Rev.* 1953. V. 91. P. 1043.
29. *Dolan W.W., Dyke W.P., Trolan J.K.* // *Phys. Rev.* 1953. V. 91. № 5. P. 1054.
30. *Martin E.E., Trolan J.K., Dyke W.P.* // *J. Appl. Phys.* 1960. V. 31. № 5. P. 782.
31. *Spindt C., Holland C., Stowe R.D.* // *Appl. Surf. Sci.* 1983. V. 16. № 1–2. P. 268.
32. *Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M. et al.* // *Proc. IEEE 14th Int. Conf. Vacuum Electron (IVEC'13).* Paris. 21–23 May 2013. N.Y.: IEEE, 2013. P. 9.
33. *Елинсон М.И., Васильев Г.Ф.* Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматлит, 1958.
34. *Бондаренко Б.В.* // *РЭ.* 1983. Т. 27. № 12. С. 2305.
35. *Бобков Ф.Ф., Давыдов Е.В., Зайцев С.В. и др.* // *ЖТФ.* 2001. Т. 71. № 6. С. 95.
36. *Баскин Л.М., Ананьев А.А., Борисов Д.А.* // *РЭ.* 1983. № 2. С. 2462.
37. *Galdetskiy A.V.* // *Proc. Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC'12).* Monterey. CA. 24–26 April. 2012. N.Y.: IEEE, 2012. P. 145.
38. *Benedik A.I., Ryskin N.M.* // *Proc. IEEE Int. Vacuum Electron. Conf. (IVEC'2015).* Beijing. China. 27–29 April. N.Y.: IEEE, 2015.
39. *Бондаренко Б.В.* // *Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ.* 1980. № 9. С. 3.
40. *Guerrera S.A., Akinwande A.I.* // *IEEE Electron Dev. Lett.* 2016. V. 37. № 1. P. 96.
41. *Дармаев Д.А., Комаров Д.А., Масленников С.П., Морев С.П.* // *РЭ.* 2015. Т. 60. № 9. С. 1.
42. *Соминский Г.Г., Тумарева Т.А.* // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2009. Т. 17. № 3. С. 17.
43. *Рахимов А.Т.* // *Успехи физ. наук.* 2000. Т. 170. № 9. С. 996.
44. *Яфаров Р.К.* // *ЖТФ.* 2006. Т. 76. № 1. С. 42.
45. *Cole M.T., Mille W.I., Li C.* // *Techn. Digest. 27th Int. Vac. Nanoelectron. Conf.* 6–10 July. 2014. Engelberg. Switzerland. N.-Y.: IEEE, 2014. P. 228.
46. *Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Y., Gulyaev Y.V., Sinityn N.I.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 1996. V. 14. № 3. P. 2080.
47. *Liao Q., Zhang Y., Xia L. et al.* // *J. Phys.* 2007. V. 40. P. 6626.
48. *Cui Y., Zhang X., Lei W. et al.* // *Proc. IEEE Int. Vacuum Electron Conf. (IVMC'12).* Monterey. CA. 24–26 April 2012. N.Y.: IEEE, 2012. P. 561.
49. *Zhao G., Zhang J., Zhang Q., et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 193113.
50. *Gao F., Xiao M., Zhang X.* // *Proc. IEEE Int. Vacuum Electron Conf. (IVMC'12).* Monterey. CA. 24–26 April 2012. N.Y.: IEEE, 2012. P. 95.

51. *Di Y., Zhang X., Xiao M. et al.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Electron Conf. (IVMC'12). Monterey, CA. 24–26 April 2012. N.Y.: IEEE, 2012. P. 311.
52. *Lee H.R., Kang J.S., Park K.C.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Electron Conf. (IVMC'16). Monterey, CA. 16–21 April 2016. N.Y.: IEEE, 2016. P. 17.
53. *Andre F., Ponard P., Rozier Y.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Electron Conf. (IVEC'10). Monterey, CA. 18–20 May 2010. N.Y.: IEEE, 2010. P. 83.
54. *Wei W., Zheng. Y., Yuan X. et al.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Electron Conf. (IVMC'15). Beijing, China. 27–29 April 2015. N.Y.: IEEE, 2015. P. 511.
55. *Zeng Y., Chen Z., Xian Z. et al.* // Proc. Int. Vacuum Sources Conf. (IVESC'14). St. Petersburg, Russia. 30 June–04 July 2014. N.Y.: IEEE, 2014. P. 301.
56. *Sun Y., Yun K.N., Lee S.H., Lee C.J.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Sources Conf. (IVESC'14). Seoul, Korea. 18–20 October 2014. N.Y.: IEEE, 2014. P. 21.
57. *Lim Y.D., Avramchick A., Grapov D. et al.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Electron Conf. (IVMC'16). Monterey, CA. 16–21 April 2016. N.Y.: IEEE, 2016. P. 59.
58. *Gangloff L., Xavier S., Bourat C. et al.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Electron Conf. (IVEC'12). Monterey, CA. 24–26 April 2012. N.Y.: IEEE, 2012. P. 437.
59. *Kato S., Chouhan V., Noguchi T., Tsujinna S.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Nanoelectronics Conf. (IVNC'14). Engelberg, Switzerland. 6–10 July 2014. N.-Y.: IEEE, 2014. P. 132.
60. *Li X., Vai G., Kon J.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Sources Conf. (IVESC'16). Seoul, Korea. 18–20 October 2016. N.-Y.: IEEE, 2016. P. 257.
61. *Андреев К.В., Григорьев Ю.А., Милютин Д.Д. и др.* // Матер.13-й зимней школы-семинара по СВЧ-электронике и радиофизике. Саратов. 31 января–5 февраля 2006. Саратов: Изд. ГосУНЦ “Колледж”, 2006. С. 64.
62. *Sominski G.G., Taradaev E.P., Tumareva T.A. et al.* // Proc. IVESC-ICEE-2014. St. Petersburg, Russia. June 30–July 04. 2014. P. 261.
63. *Фиалков А.С.* Углеродные материалы. М.: Энергия, 1979.
64. *Sohda Y., Tanenbaum D.M., Turner S.W., Craighead H.G.* // J. Vac. Sci. Technol. 1997. V. 15. P. 343.
65. *Shesterkin V.I., Grigoriev Y.A.* // Tech. Dig. 8th Int. Vacuum Microelectron. Conf. (IVMC'95). Madison, USA. 30 July–3 Aug. 1995. P. 513.
66. *Григорьев Ю.А., Васильковский С.В., Шестеркин В.И., Ярцева З.А.* Способ изготовления топологии преимущественно многоострийного катода // Пат. РФ № 1738013. Оpubл. 12.02.1993.
67. *Grigoriev Y.A., Semenov V.C., Shesterkin V.I., Yartseva Z.A.* // Proc. IEEE Int. Vacuum Microelectron. Conf. 1991. (IVMC-91). Nagahama, Japan. 22–24 Aug. 1991. P. 194.
68. *Плешкова Л.С., Шестеркин В.И.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 11. С. 141.
69. *Шестеркин В.И.* // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. 2013. № 4. С. 52.
70. *Бурцев А.А., Григорьев Ю.А., Денисов Д.С.* // Электрон. техн. Сер. СВЧ-техника. 2013. № 4. С. 183.
71. *Shesterkin V.I., Grigoriev Y.A., Pimenov V.G.* // Tech. Dig. 41th Int. Field Emission Symp. (IFES'94). Rouen. 11–15 July 1994. P. 271.
72. *Grigoriev Y.A., Semenov V.C., Shesterkin V.I.* // Tech. Dig. Int. Field Emiss. Symp. (IFEC'91). Vienna. 5–9 Aug. 1991. P. 162.
73. *Григорьев Ю.А., Шестеркин В.И.* // Тез. докл. XXII конф. по эмиссионной электронике. Москва, 25–27 янв. 1994. М.: МИФИ, 1994. С. 58.
74. *Grigoriev Y.A., Shesterkin V.I.* // Tech. Dig. 40th Int. Field Emission Symp. (IFES'93). Nagoya, Japan. 2–3 Aug. 1993. P. 138.
75. *Shesterkin V.I., Grigoriev Y.A.* // Tech. Dig. 10th Int. Vacuum Microelectron. Conf. (IVMC-97). Kyongju, Korea. 17–21 Aug. 1997. P. 739.
76. *Шестеркин В.И.* // Тр. Всерос. науч. конф. “Проблемы СВЧ-электроники”. Москва. 24–25 октября 2013. С. 135.
77. *Бушувев Н.А., Шестеркин В.И., Григорьев Ю.А.* // Электрон. техн. Сер. 1. СВЧ-техника. 2013. № 4. С. 175.
78. *Шестеркин В.И.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 8. С. 788.
79. *Grigoriev Y.A., Petrosyan A.I., Penzyakov V.V. et al.* // Tech. Dig. Int. Vac. Microelectron. Conf. (IVMC'96). St. Petersburg, Russia. 7–12 July 1996. N.Y.: IEEE, 1996. P. 522.
80. *Бенедик А.И., Крачковская Т.М., Шестеркин В.И.* // ЖТФ. 2015. Т. 60. № 10. С. 122.
81. *Лобанов В.М., Юмагузин Ю.М.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 9. С. 108.
82. *Шестеркин В.И., Глухова О.Е., Иванов Д.В., Колесникова А.С.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 8. С. 782.
83. *Grigoriev Y.A., Kostina G.T., Pehen G.A.* // Tech. Dig. 11th Int. Vac. Microelectron. Conf. (IVMC'98). Asheville, NC. 19–23 Aug. 1998. N.Y.: IEEE, P. 824.
84. *Gulyaev Y.V., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V. et al.* // Tech. Dig. 9th Int. Vac. Microelectron. Conf. (IVMC-96). St. Petersburg. 7–12 July 1996. N.Y.: IEEE, 1996. P. 519.
85. *Vasily I. Shesterkin* // Proc. Conf. 11th Int. Vac. Electron. Sources Conf. (IVESC'16). Seoul, Korea. 22–23 September 2016. N.Y.: IEEE, 2016. P. 119.
86. *Шестеркин В.И., Соколова Т.Н., Морев С.П. и др.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 9. С. 896.
87. *Bessonov D.A., Sokolova T.N., Shesterkin V.I.* // J. Phys.: Conf. Ser., 2016. V. 741. P. 1.
88. *Чеботаревский Ю.В., Сурменко Е.Л., Попов И.А. и др.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 11. С. 72.
89. *Pleshkova L.S., Shesterkin V.I.* // Techn. Phys. 2016. V. 61. № 11. P. 1747.
90. *Шестеркин В.И., Шалаев П.Д., Бессонов Д.А. и др.* // Матем. научно-техн. конф. “СВЧ электроника-2016”. Фрязино, 18–19 мая 2016. С. 32.
91. *Darmaev A.N., Morev S.P., Muraviev E.K., Shesterkin V.I.* // Proc. IEEE. 11th Int. Vac. Electron. Sources Conf. (IVESC'16). Seoul, Korea. 22–23 September. N.Y.: IEEE, 2016. P. 125.
92. *Шалаев П.Д., Шестеркин В.И., Сурменко Е.Л. и др.* Способ изготовления многоострийного автоэмиссионного катода из углеродного материала

- на криволинейной поверхности // Пат. РФ № 2576395. Оpubл. 10.03.2016. Б.И. 2016. № 7.
93. Шестеркин В.И., Бессонов Д.А., Ерзов С.В. и др. // Электрон. техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. № 1. С. 84.
 94. Сазонов В.П. Приоритеты России в вакуумной СВЧ-электронике в XX столетии. М.: Медпрактика-М, 2012.
 95. Grigoriev Y.A., Rechen G.A., Semenov V.C., Shesterkin V.I. // Tech. Dig. 6th Int. Vac. Microelectron. Conf. (IVMC'93). Newport. USA. 12–15 July. 1993. P. 156.
 96. Grigoriev Y.A., Shesterkin V.I. // Tech. Dig. 7th Int. Vac. Microelectron. Conf. (IVMC'94). Grenoble. France. 4–7 July 1994. P. 273.
 97. Shesterkin V.I., Grigoriev Y.A. // Tech. Dig. 8th Int. Vac. Microelectron. Conf. (IVMC'95). Portland. USA. 30 July–3 Aug. 1995. P. 513.
 98. Шестеркин В.И., Дармаев А.Н., Комаров Д.А. и др. // Матер. XVIII координ. науч.-техн. семинара по СВЧ-технике. Н. Новгород. 4–6 сентября 2013. С. 39.
 99. Шестеркин В.И. Катодно-сеточный узел с углеродным автоэмиссионным катодом // Пат. РФ № 2586119. Оpubл. 13 мая 2016.
 100. Шестеркин В.И. Способ изготовления катодно-сеточного узла с углеродным автоэмиссионным катодом // Пат. РФ № 2589722. Оpubл. 10 июня 2016.
 101. Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Морев С.П. и др. // РЭ. 2014. Т. 59. № 8. С. 774.
 102. Шестеркин В.И. // Тез. докл. Междун. научн. техн. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016)”. Саратов. 22–23 сентября 2016. С. 161.
 103. Shesterkin V.I., Grigoriev Yu.A. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron. Source Conf. (IVESC-2014). 30 июля–4 августа 2014. St. Petersburg. Russia. N.Y.: IEEE, 2014. P. 250.
 104. Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Морев С.П. и др. // Тез. докл. Междун. науч. техн. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014)”. Саратов. 25–26 сентября. 2014. С. 295.
 105. Бушуев Н.А., Глухова О.Е., Григорьев Ю.А. и др. // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 2. С. 134.
 106. Шестеркин В.И. // Тез. докл. Межд. науч. техн. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016)”. Саратов. 22–23 сентября. 2016. С. 117.
 107. Дармаев А.Н., Морев С.П., Муравьев Э.К., Шестеркин В.И. // Тез. докл. Междун. науч. техн. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016)”. Саратов. 22–23 сентября. 2016. С. 181.
 108. Shesterkin V.I. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Source Conf. (IVESC'16). Seoul. Korea. 18–20 October. 2016. N.Y.: IEEE, 2016. P. 119.
 109. Darmaev A.N., Morev S.P., Muraviev E.K., Shesterkin V.I. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Source Conf. (IVESC'16). Seoul. Korea. 18–20 October. 2016. N.Y.: IEEE, 2016. P. 125.
 110. Darmaev A.N., Komarov D.A., Morev S.P. et al. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Conf. (IVEC'17). London. 24–26 April. 2017. N.Y.: IEEE, 2017.
 111. Ulisse G., Ciceroni C., Berunetti F., Di A. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Conf. (IVEC'13). Paris. 21–23 May. 2013. N.Y.: IEEE, 2013.
 112. Wei W., Zheng Y., Yuan X. et al. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Conf. (IVEC'15). Beijing. China. 27–29 April. 2015. N.Y.: IEEE, 2015. P. 5.
 113. Andre F., Ponard P., Rozier Y. et al. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Conf. (IVEC'10). Monterey. CA. 18–20 May 2010. N.Y.: IEEE, 2010. P. 83.
 114. Flowery O., Kim J., Lee N. // Proc. IEEE Int. Vac. Nanoelectron. Conf. (IVNC'14). Engelberg. Switzerland. 6–10 July 2014. N.Y.: IEEE, 2014. P. 42.
 115. Kim H.J., Seo W.B., Choi J.J. et al. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Conf. (IVEC'06). Monterey. CA. 25–27 Apr. 2006. N.Y.: IEEE, 2006. P. 479.
 116. Kim H.J., Choi J.J., Han J.-H. et al. // IEEE Trans. 2006. V. ED-53. № 11. P. 2674.
 117. Whaley D.R., Gannon B.M., Smith C.R. et al. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC'00). Monterey. CA. 22–24 Apr. 2000. N.Y.: IEEE, 2000.
 118. Whaley D.R., Gannon B.M., Spindt C.A. et al. // IEEE Trans. 2002. V. ED-30. № 3. P. 998.
 119. Li X., Bai G., Ding M. et al. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Conf. (IVEC'06). Monterey. CA. 25–27 Apr. 2006. N.Y.: IEEE, 2006. P. 507.
 120. Li X., Bai G., Cai S. et al. // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Conf. (IVEC'07). Kitakyushu. 15–17 May 2007. N.Y.: IEEE, 2007. P. 335.