

К 85-ЛЕТИЮ
Н.И. СИНИЦЫНА

УДК 621.385.6

УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ УЗЛАХ
ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ И КЛИСТРОНОВ (ОБЗОР)

© 2022 г. В. И. Шестеркин^а, Т. М. Крачковская^{а, б}, П. Д. Шалаев^а, Л. Т. Баймагамбетова^а,
С. Д. Журавлев^а, Д. И. Кириченко^а, Р. Ю. Богачев^{а, б}

^а Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз» (АО «НПП «Алмаз»),
ул. им. Панфилова И.В., 1, Саратов, 410033 Российская Федерация

^б Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
ул. Политехническая, 77, Саратов, 410054 Российская Федерация

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

Поступила в редакцию 15.04.2022 г.

После доработки 15.04.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Представлены результаты исследований, проведенных в АО «НПП «Алмаз» за последние 10 лет по применению и перспективам использования углеродных материалов в теплонагруженных узлах ламп бегущей волны и клистронов.

DOI: 10.31857/S0033849422100102

ВВЕДЕНИЕ

Углерод – типичный неметалл, образует множество аллотропных модификаций с различной кристаллической структурой, которая определяет многообразие его физических и химических свойств. Пиролитический графит (ПГ) и углеродные нанотрубки (УНТ) имеют ярко выраженную анизотропию механических, тепловых, электрических свойств. Прочность пиролитического графита возрастает при увеличении температуры вплоть до 3000°C и при температурах выше 2500°C превышает прочность всех известных материалов [1]. Коэффициент линейного термического расширения вдоль плоскости осаждения на порядок выше, чем в перпендикулярном направлении. Теплопроводность ПГ в направлении плоскости осаждения примерно на два порядка выше, чем в перпендикулярном направлении, и превышает теплопроводность меди [2]. Стеклоуглерод, как и пиролитический графит, непроницаем для жидкостей и газов, но в отличие от пиролитического графита изотропен по физическим и механическим характеристикам. Он остается в твердом состоянии и сохраняет свои свойства вплоть до температуры сублимации 3700°C [3].

Промышленно выпускаемые графиты марки МПГ-6, -7, -8 имеют структуру с открытой и канальной пористостью, которая составляет 12...15%. Различные марки промышленно выпускаемых графитов имеют незначительную анизотропию свойств. Для искусственных графитов характерна высокая работа выхода электронов, 4.6...4.7 эВ. Работа выхода УНТ изменяется в широких преде-

лах от 1...4.7 эВ [4]. Работа выхода графена зависит от легирующего материала и может составлять 2.77 эВ, для структур графен–барий и бислойный графен–барий 1.88 эВ [5], для нанопористого углерода ее значение может составлять сотые доли электронвольт [6], что делает подобные структуры привлекательными с точки зрения эмиссионной электроники. Для всех модификаций углерода характерна химическая инертность. Они не образуют устойчивых химических связей с расплавами большинства металлов.

Искусственные графиты нашли широкое применение в различных отраслях науки и техники благодаря набору уникальных свойств: высокой степени чистоты (количество примесей менее 1%), высокой механической прочности, термической и эрозионной стойкости, высокой теплопроводности и электропроводности. Технические и эксплуатационные характеристики искусственных графитов сохраняются при температурах до 2000°C даже в агрессивных средах. Искусственные графиты, за исключением стеклоуглерода, легко поддаются механической обработке, что позволяет изготавливать из них фасонные детали. Перечисленные выше характеристики углеродных материалов, такие как высокие теплопроводность и электропроводность, высокая температура плавления в вакууме, легкость механической обработки и коммерческая доступность, делают их привлекательными для использования в теплонагруженных узлах электровакуумных приборов в том числе СВЧ-диапазона [7]. Прежде всего это конструкционные элементы электронных пушек: сеточные электроды, фокусирующий электрод и анод, в

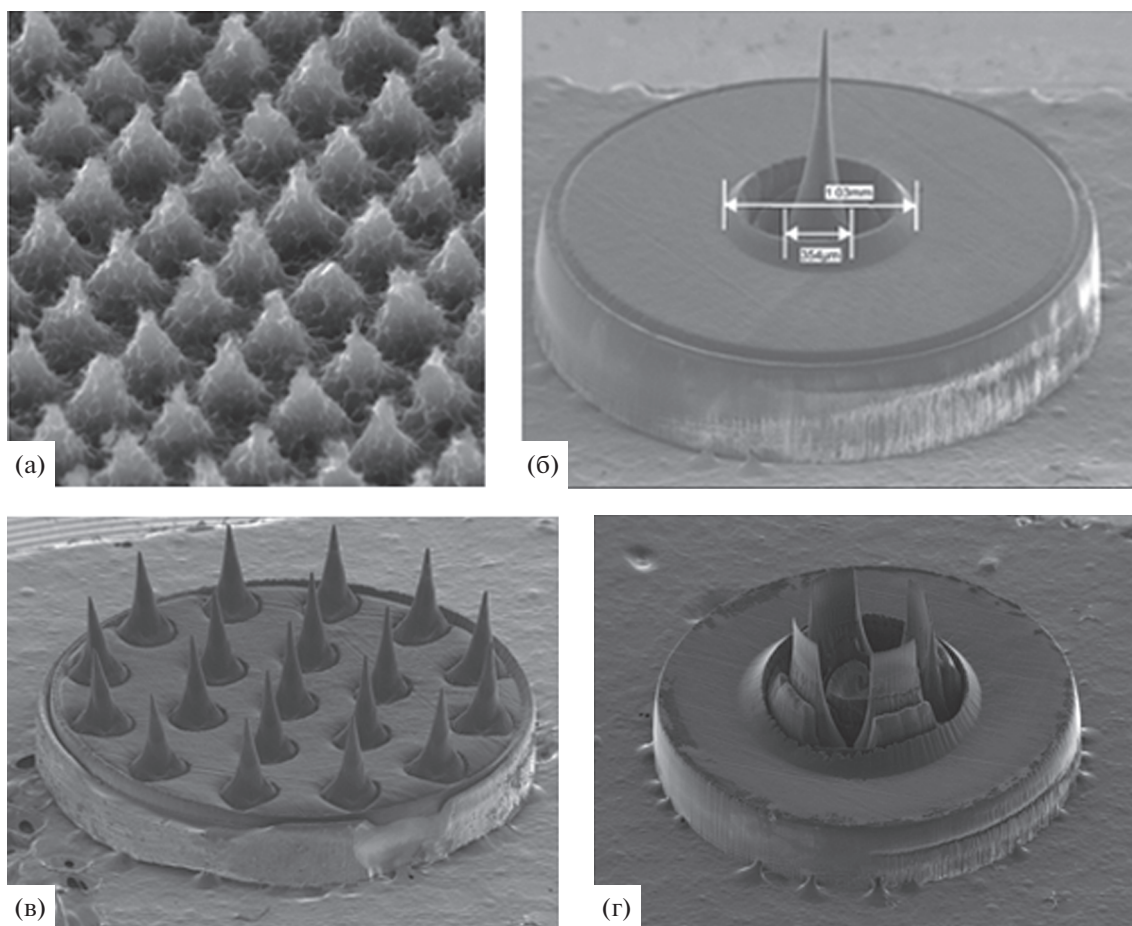


Рис. 1. Автоэмиссионные катоды из стеклоглерода СУ-2000: а – матрица острий, изготовленных термохимическим травлением; б – единичное острие; в – катод с 19-ю остриями, г – катод лезвийного типа.

коллекторах электронов это токоприемные элементы – ступени коллекторов. Однако промышленного использования перечисленные элементы конструкции электровакуумных приборов из углеродных материалов до настоящего времени не нашли. Это связано со сложностью их дегазирования, обусловленной пористой структурой. Химическая инертность затрудняет формирование на поверхностях графитовых деталей металлizaционных покрытий под пайку и выбор подходящего припоя для получения прочных неразъемных соединений графитовых деталей с керамикой и металлами [8].

В данной работе представлены результаты исследований, проведенных за последние 10 лет в НПП “Алмаз” по использованию различных модификаций углерода в качестве материала для автоэмиссионных катодов (АЭК), присадок для снижения работы выхода и скорости испарения активного вещества в металлопористых катодах (МПК), для изготовления сеточных электродов и ступеней коллекторов мощных ламп бегущей волны (ЛБВ) и клистронов.

1. АВТОЭМИССИОННЫЕ КАТОДЫ ИЗ СТЕКЛОУГЛЕРОДА

Структура стеклоглерода СУ-2000 состоит из полых разномасштабных сфероидов неправильной формы размером от 0.5 до 2.5 мкм, разделенных перегородками толщиной до 1 мкм. В свою очередь, перегородки состоят из сфероидов меньшего масштаба размером до 50 нм, разделенные перегородками толщиной около 5 нм [9]. Стеклоуглерод не поддается механической обработке режущими инструментами. Матричные АЭК с эмиттерами в форме прямого усеченного конуса с плотностью упаковки $1 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ изготавливали методом термохимического травления пленкой никеля в среде водорода при температуре 1100°C (рис. 1а) [10]. Матрицы автоэммиттеров острейного и лезвийного типов с большим аспектным отношением (до 1000 единиц) были сформированы методом лазерного фрезерования (рис. 1б–1г) [11].

Результаты экспериментального исследования ВАХ электронных пушек (ЭП) с автоэмиссионным катодом игольчатой формы с радиусом

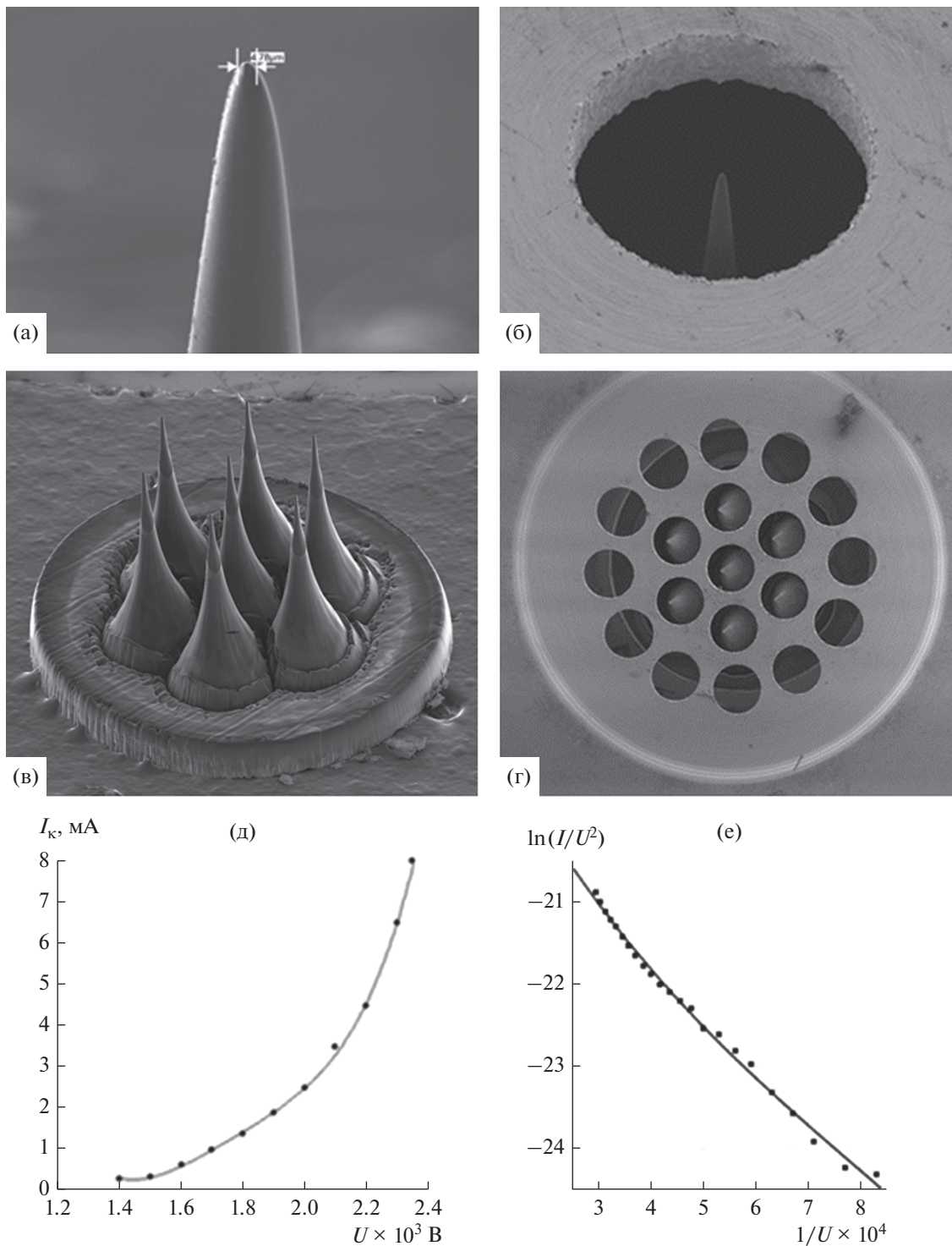


Рис. 2. Конструкция автоэмиссионной ячейки и ее ВАХ: а – единичное острие; б – автоэмиссионная ячейка с единичным острием; в – автоэмиссионный катод с семью остриями; г – катодно-сеточный узел с семью ячейками; вольт-амперные характеристики ячейки с единичным острием: д – импульсный режим, е – ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма.

кривизны вершины 5 мкм в непрерывном и импульсном режимах представлены на рис. 2 [12].

Величина тока с единичного острия составила 8 мА. Плотность автоэмиссионного тока, усред-

ненная по площади полусферы вершины, составляла $\sim 5 \times 10^3$ и $\sim 3.6 \times 10^4$ А/см² для игл с радиусом кривизны вершины 5 и 2.5 мкм соответственно [13]. На рис. 3 приведены фотографии вершины

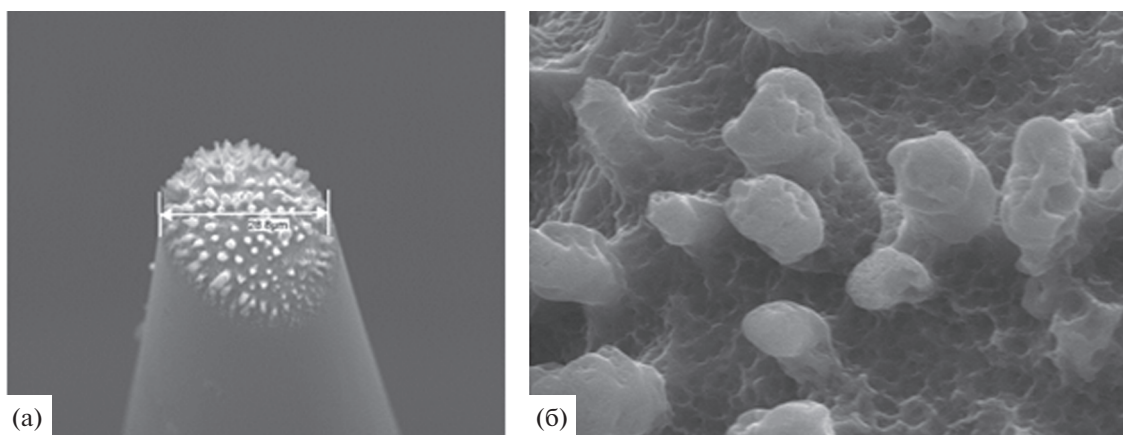


Рис. 3. Поверхность вершины острия после микропробоев: а – увеличение 1200; б – увеличение 11000.

острия после работы в непрерывном режиме в составе ЛБВ X-диапазона при вакууме не хуже 2×10^{-7} Торр в течение ~ 30 ч. При токе более 8 мА регистрировались микропробой между вершиной острия и сеткой, приводящие к снижению эмиссии катода. После каждого микропробоя первоначальный ток 8 мА достигался при более высоких значениях напряжения на сетке вследствие разрушения вершины острия.

Разрушение вершины острия являлось результатом воздействия микропробоев и бомбардировки потоком ионов из пространства взаимодействия ЛБВ и коллектора, траектории движения которых заканчивались на вершине острия. Сформированные выступы (рис. 3б), вероятно, состоят из карбидов примесей, содержащихся в стеклоуглероде, которые более устойчивы к воздействию ионов.

Из анализа результатов проведенных исследований работы автоэмиссионной ячейки с единичным острием в центре отверстия сеточного электрода можно сделать следующие выводы.

1. Представленная конструкция триодной электронной пушки, работающая на участке вольт-амперной характеристики с большой крутизной, имеет непродолжительный срок эксплуатации и может быть использована в короткоживущих приборах специального назначения.

2. Для снижения оседания эмиссионного тока на сетку, снижения вероятности микропробоев и увеличения длительности работы автоэмиссионного катода без разрушения вершины острий следует располагать по крайней мере не ниже плоскости сетки, обращенной к аноду пушки.

3. Векторы напряженности электрического поля в каждой точке внутри отверстия сетки и вблизи его направляют ионы в центр ячейки, где расположена вершина острия. В связи с этим для защиты острий от ионной бомбардировки и увеличения продолжительности их работы автоэммиттеры следует разме-

щать на периферии отверстия сеточного электрода. Так, длительность работы автоэмиссионной ячейки с матрицей острий, изготовленных термохимическим травлением (рис. 1а) составила ~ 2000 ч.

4. Электронная пушка должна иметь второй анод, выполняющий роль ловушки для ионов, движущихся из пространства взаимодействия и коллектора по оси прибора в центр катода.

2. МЕТАЛЛОПОРИСТЫЕ КАТОДЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ НАНОУГЛЕРОДНЫМИ КЛАСТЕРАМИ

Для повышения эмиссионных свойств МПК было исследовано применение нанокластеров углерода – астраленов и углерона в составе его вольфрамовой матрицы и активного вещества соответственно. Астралены – полиэдральные углеродные наночастицы фуллероидного типа торoidalной формы с межслоевым расстоянием 0.34...0.36 нм и средним размером 15...100 нм, а углерон – сульфаддукт нанокластеров углерода с размером частиц 10...100 нм, имеющий графеноподобную структуру.

В работе [6] было отмечено, что малые концентрации (0.5 мас. %) астраленов при равномерном распределении их в вольфрамовой матрице осмированного МПК увеличивают эмиссионную способность за счет снижения работы выхода электронов, а присадка 0.2% углерона в составе активного вещества – алюмината бария-кальция снижает его скорость испарения с поверхности МПК. На рис. 4 представлены результаты измерений эмиссионных характеристик катодов, полученных в процессе ускоренных испытаний на долговечность двух образцов ЛБВ космического назначения (далее – ЛБВ1, ЛБВ2) непрерывного действия с МПК, модифицированным нанокластером углерода, с пленкой Os–Ir–Al на эмитирующей поверхности. Исследуемые образцы ЛБВ отличались от серий-

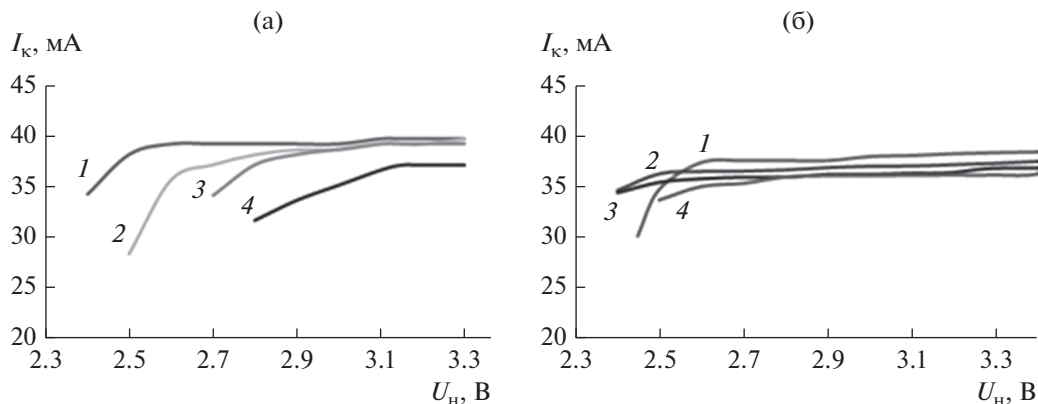


Рис. 4. Эмиссионные характеристики ЛБВ1 (а) и ЛБВ2 (б) при различной наработке: а) 0 (1), $1,024 \times 10^6$ (2), $2,048 \times 10^6$ (3) и $3,072 \times 10^6$ ч (4); б) 0 (1), $0,864 \times 10^6$ (2), $1,144 \times 10^6$ (3) и $1,426 \times 10^6$ ч (4).

ных только конструкцией и технологией изготовления эмиттера катода. Испытания были проведены при повышенной температуре катода. Плотность тока эмиссии катода при его температуре в номинальном рабочем режиме и при повышенной температуре в процессе испытаний равнялась $0,645 \text{ A/cm}^2$, что соответствовало режимам работы серийных образцов ЛБВ. При испытаниях учитывалось, что соответствие электрических параметров ЛБВ критериям ее годности обеспечивается при снижении тока катода не более чем на 10%.

После $3,072 \times 10^6$ ч наработки, соответствующих паспортному режиму работы катода при напряжении накала 3.1 В (напряжению накала 3.1 В соответствует рабочая температура катода 978°C), параметры катода в ЛБВ1 еще удовлетворяют критерию годности – ток катода при паспортном напряжении накала снизился меньше чем на 5%. Но разность между напряжением накала, соответствующим точке перехода работы катода из режима ограничения пространственным зарядом в режим ограничения по току, и паспортным напряжением накала 3.1 В (ΔU_n) уменьшилась до 0.05 В. Поэтому наработку $3,072 \times 10^6$ ч можно считать эмиссионной долговечностью этого образца катода при напряжении накала 3.1 В.

По окончании испытаний был исследован химический состав эмитирующей поверхности отработавшего катода из ЛБВ1 и для сравнения поверхность аналогичного катода без наработки (табл. 1).

Причиной изменения процентного содержания компонентов на эмитирующей поверхности

МПК являются процессы их химического взаимодействия, диффузии и испарения. Учитывая время испытаний катода, можно сделать вывод: процесс деградации его поверхности происходил достаточно медленно, что обеспечило увеличение эмиссионной долговечности катода в составе ЛБВ до $\sim 3 \times 10^6$ ч.

Наработка ЛБВ2 в настоящее время составляет $1,426 \times 10^6$ ч, испытания продолжают. На рис. 4б видно, что в течение $0,864 \times 10^6$ ч наработки эмиссионная характеристика катода улучшается – ΔU_n увеличилась на 0.1 В относительно паспортного напряжения 3.1 В (напряжение накала 3.1 В соответствует рабочей температуре катода 983°C). Такие изменения эмиссионных характеристик МПК, используемых в серийных образцах ЛБВ и их аналогах, также наблюдаются, но в течение более короткого времени – $0,15 \times 10^6 \dots 0,25 \times 10^6$ ч.

При наработке ЛБВ2 $1,426 \times 10^6$ ч катод сохраняет свои эмиссионные свойства, при этом изменение величины тока катода при рабочем напряжении накала 3.1 В не превышает 5%, а ΔU_n уменьшилось всего на 0.15 В (от 0.6 до 0.45 В). Из этих данных следует, что за $0,562 \times 10^6$ ч наработки ΔU_n сократилась на 25% (см. рис. 4б, кривые 2, 4) и катод может соответствовать критерию годности еще в течение $1,686 \times 10^6$ ч наработки, а суммарная наработка может составить не менее $\sim 3 \times 10^6$ ч.

Проведенные исследования долговечности МПК, модифицированных астраленами и углеродом, в составе приборов показывают рекордную

Таблица 1. Химический состав поверхностей катодов (вес. %)

МПК	Al	W	Os	Ir	Итого
Без наработки	0.56	2.61	73.88	22.94	100.00
После испытаний	0.93	43.94	42.40	12.72	100.00

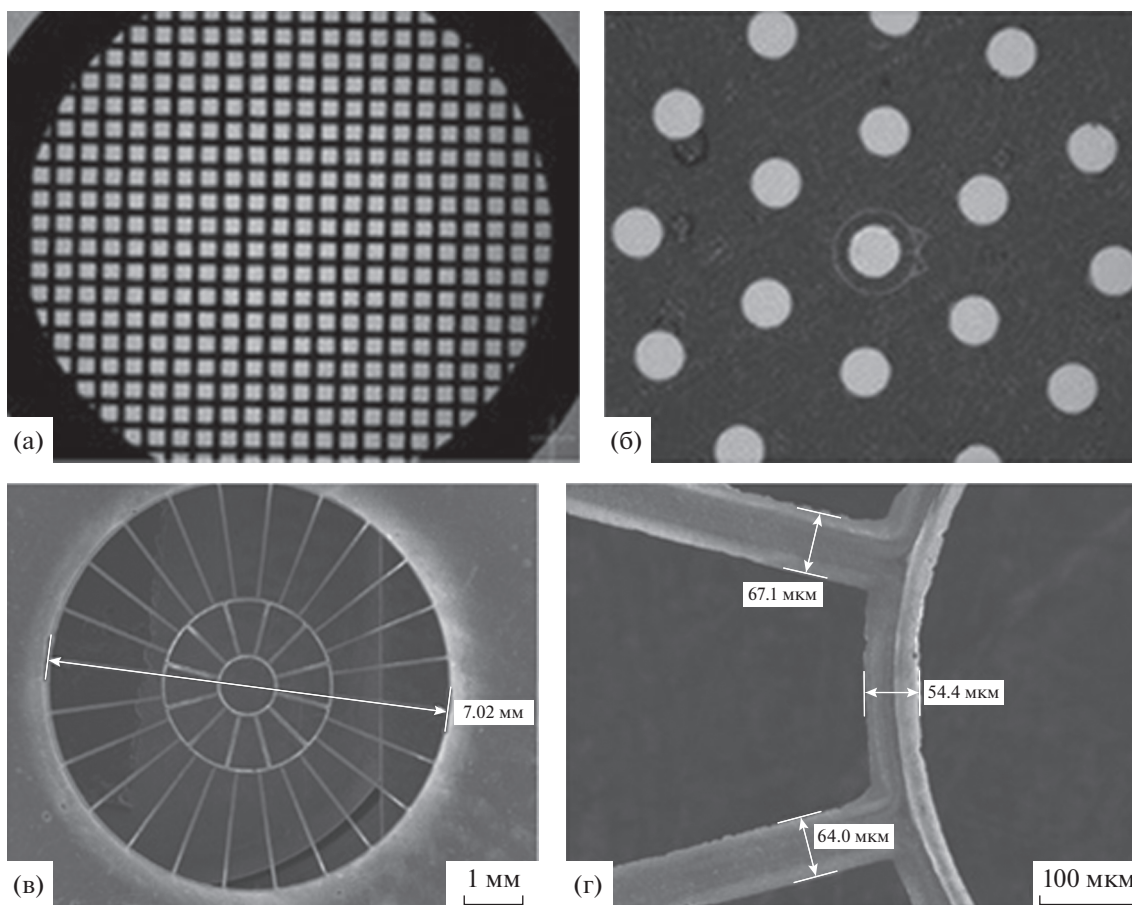


Рис. 5. Сеточные структуры: а – планарная сетка с квадратными ячейками 175×175 мкм и шагом 225 мкм; б – с круглыми отверстиями диаметром 0.5 мм; в – общий вид и г – участок примыкания радиальных перемычек к кольцевой перемычке: сетка с радиально-кольцевыми перемычками шириной ~ 65 мкм и радиусом кривизны поверхности 8.2 мм.

наработку. Причинами полученных результатов могут служить пониженная скорость испарения активного вещества с добавкой углерона и сниженная диффузия вольфрама в осмиевую пленку в МПК с астраленами в вольфрамовой матрице [14].

Результаты выполненных исследований МПК с наноуглеродными кластерами – астраленами в составе его вольфрамовой матрицы и углероном в составе активного вещества – показали, что эмиссионная долговечность МПК может быть увеличена до $\sim 3 \times 10^6$ ч при рабочей температуре катода до 980°C .

3. СЕТОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА

Традиционно в качестве материала сеточных структур в катодно-сеточных узлах мощных ЛБВ и клистронов используется гафний. Для него характерны недостаточно высокая температура плавления в сравнении с углеродными материалами (2233 и 4000°C) и работа выхода электронов

3.53 и 4.7 эВ соответственно. Температура начала рекристаллизации у гафния составляет $\sim 760^\circ\text{C}$ и соответствует температуре сеточных электродов в мощных импульсных ЛБВ в сантиметровом диапазоне длин волн. Химическая инертность углеродных материалов способствует снижению адсорбции химических элементов. В этой связи представляется желательным и перспективным использование в качестве материала сеточных структур пиролитического графита (изотропного и анизотропного) с целью снижения адсорбции активного вещества МПК [15].

Анизотропный пиролитический графит (АПГ) является высокотемпературным, анизотропным материалом, легко обрабатывается методом лазерного фрезерования. В процессе пиролиза можно формировать трехмерные детали из АПГ любой сложности. Большая работа выхода электронов существенно уменьшает величину паразитной термоэлектронной эмиссии с сеток. На рис. 5 представлены сеточные структуры с различными формами и топологией отверстий в планарном (а, б) и сфери-

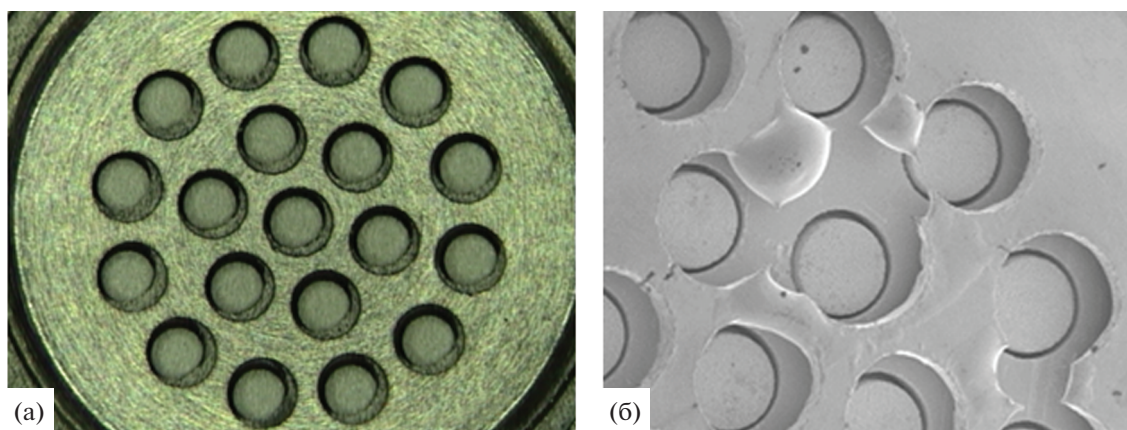


Рис. 6. Катодно-сеточный узел с сетками из АПГ (а) и из графитя (б) после испытаний.

ческом исполнении (в, г) методом лазерного микрофрезерования.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при температуре катода 1050°C предельное, не приводящее к паразитной термоэлектронной эмиссии значение удельной средней мощности, рассеиваемой на сетке из АПГ достигало $\sim 70 \text{ Вт/см}^2$, что до ~ 20 раз больше, чем для сеток из молибдена, и в ~ 10 раз больше, чем для сеток из графитя [16]. Экспериментально подтверждена эффективность применения теневой сеточной структуры из АПГ в 19-лучевом малогабаритном 400-ваттном клистроне Ку-диапазона. Сеточная структура планарного типа была прикреплена к сеткодержателю методом механического прижима. Клистрон устойчиво работал без появления термоэлектронной эмиссии с сетки и без пробоев между сетками в течение не менее 40 мин при температуре осмированного МПК 1240°C при скважности 3. Дальнейшие испытания были прекращены после уменьшения эмиссионного тока катода на 25% по причине выработки его гарантийного ресурса. Клистрон аналогичной конструкции с теневой сеткой из графитя при скважности 3 проработал 17 с и вышел из строя после пробоя между теневой и управляющей сеткой [17]. На рис. 6 представлены фотографии катодно-сеточного узла (КСУ) с сетками из АПГ и графитя после завершения испытаний. Управляющая сетка из графитя расплавилась (рис. 6б).

4. КОЛЛЕКТОРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВЫСОКОПЛОТНОГО ГРАФИТА

Когда все физические, конструктивные и технологические возможности повышения КПД ЛБВ и коллектора практически исчерпаны, пожалуй, единственной возможностью его увеличения остается снижение обратного потока электронов из коллектора в пространство взаимодействия при-

бора за счет использования для изготовления токоприемных элементов материалов с низким значением коэффициента вторичной электронной эмиссией (КВЭЭ). Одним из таких материалов является высокоплотный искусственный графит марки МПГ7. Величина КВЭЭ графита МПГ7 составляет $0.6...0.7$, что в три раза меньше, чем у меди. Коэффициенты термического линейного расширения графита МПГ 7 и керамики ВК 94-2 в диапазоне температур $20...500^{\circ}\text{C}$ близки и составляют 6.91×10^{-6} и $7.0 \times 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ соответственно. Для уменьшения газоотделения из открытых пор поверхность деталей уплотнялась пиролитическим углеродом (рис. 7б).

Перед нанесением металлизационного покрытия поверхности графитовых деталей подвергались текстурированию двумя способами: обработкой в концентрированной серной кислоте и термохимическому травлению пленкой никеля в среде водорода при температуре 1100°C в течение 7 мин. В качестве материала металлизационного покрытия в виде тонких пленок были использованы молибден и никель. Формирование пленки молибдена толщиной $1.8...2.0 \text{ мкм}$ осуществлялось методом ионно-плазменного нанесения. Пленку никеля толщиной $5...6 \text{ мкм}$ наносили методом гальванического осаждения. Критерием выбора способов текстурирования и металлизации являлась прочность неразъемного соединения торцевых спаев стержней диаметром 10.5 мм и длиной 49 мм из графита и керамики ВК 94-2 на разрывной машине. Пайку осуществляли припоем ПЗлМ37.5В. Было изготовлено по три стержня из графитов марки МПГ7 и МИГ2. При испытании произошло разрушение графитовых стержней при усилии $0.24...0.35 \text{ кН}$ ($24...37 \text{ кг}$) (рис. 8).

Разработанная технология была использована для создания графито-керамических узлов ступенчатой коллектора электронов для ЛБВ спутниковой связи с пятиступенчатым коллектором электро-

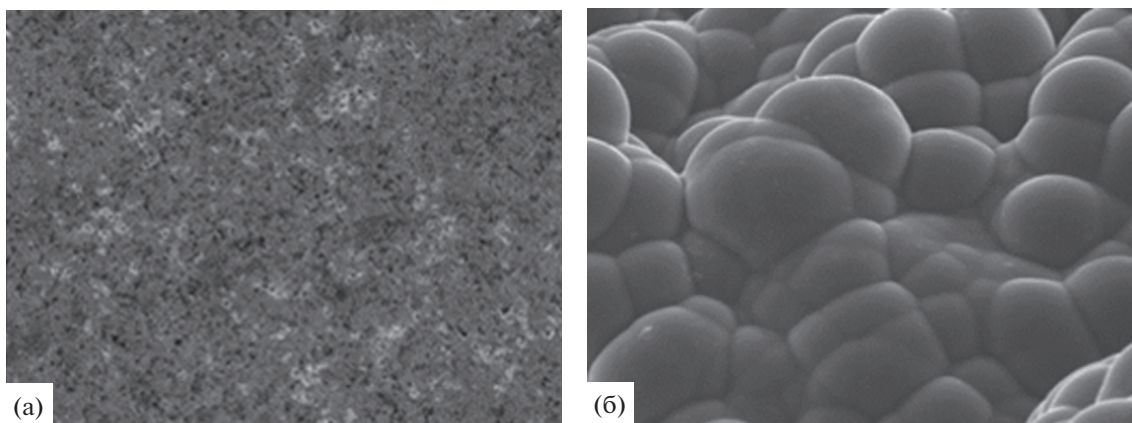


Рис. 7. Фотография участка поверхности графитовой детали: а – до уплотнения; б – после уплотнения.

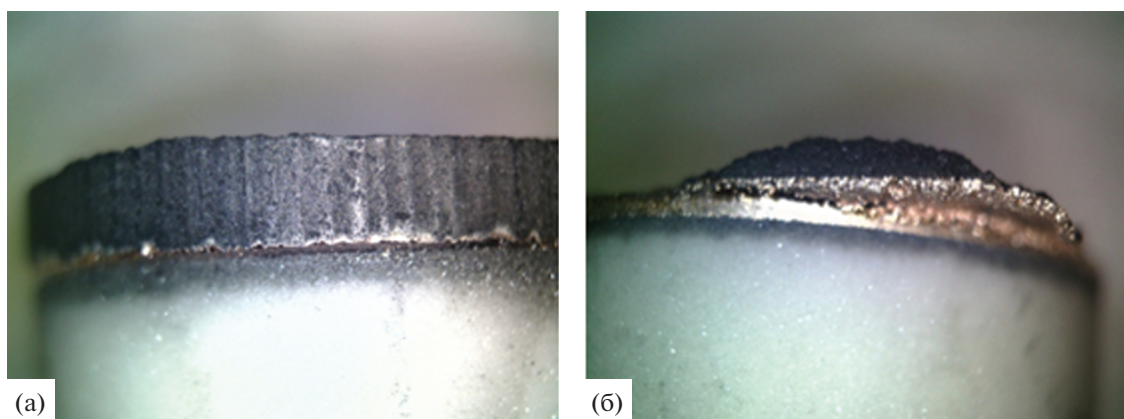


Рис. 8. Торцевые спаи стержня из керамики ВК 94-2 со стержнем из МПГ7 (а) и со стержнем из МИГ2 (б) (металлизация графитовых стержней пленкой из молибдена).

нов. Ступени коллектора с диаметром посадочного места под пайку 22.6 мм были изготовлены из высокоплотного графита марки МПГ7. Керамические кольца изготовлены из керамики ВК 94-2. Металлизация под пайку выполнена из пленки молибдена толщиной 1.8...2.0 мкм.

Спаянные графито-керамические узлы коллектора электронов были подвергнуты испытаниям на термоудары в количестве 30 раз в среде азота при температуре 700°C со скоростью изменения температуры 80°C/мин на установке термодублирования. Внешний вид узлов после испытаний не изменился (рис. 9), трещины и сколы на поверхности и кромках деталей отсутствовали, что свидетельствовало о прочности неразъемного соединения деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследований крупногабаритных автоэмиссионных ячеек с вакуумным

зазором катод–сетка с автоэмиссионным катодом из стеклогуглерода СУ 2000 с большим аспектным отношением и радиусом кривизны вершины в единицы микрометров. В отличие от катодов Спиндта для их изготовления не требуется сложное и дорогостоящее технологическое оборудование. По соотношению эмиссионного тока к площади, занимаемой данной ячейкой, их характеристики сопоставимы с ячейками Спиндта.

Приведены результаты исследований долговечности МПК, модифицированных астраленами и углероном, в составе ЛБВ непрерывного действия космического назначения. Показано, что за счет пониженной скорости испарения активного вещества с добавкой углерона и снижения диффузии вольфрама в осмиевую пленку МПК с астраленами в вольфрамовой матрице эмиссионная долговечность МПК может быть увеличена более чем до 1×10^6 ч. Так, при рабочей температуре катодов 980°C, их эмиссионная долговечность достигает 3×10^6 ч.

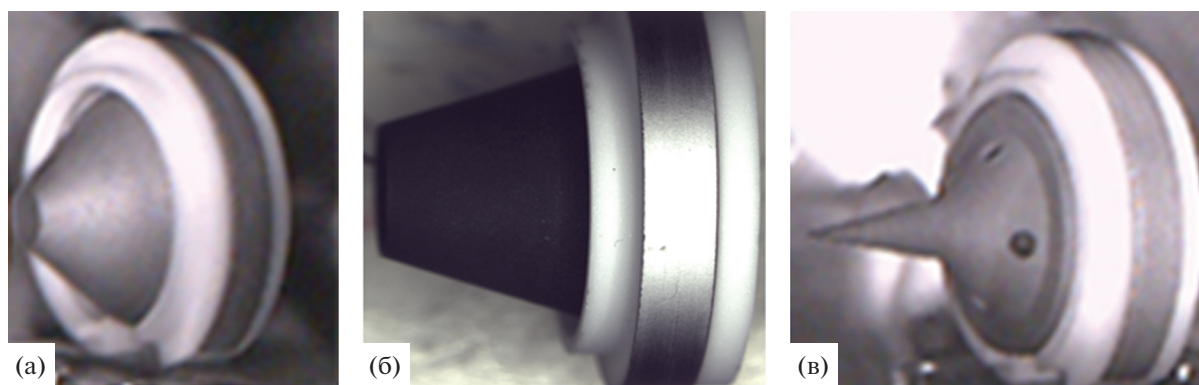


Рис. 9. Первая (а), четвертая (б) и пятая (в) ступени коллектора.

Использование сеточных структур из анизотропного пиролитического графита в малогабаритном 400-ваттном клистроне Ку-диапазона позволило обеспечить его устойчивую работу при скважности 3 в течение ~40 мин. Испытания прибора были завершены по причине выработки ресурса металлопористого катода, работающего при температуре 1200°C с плотностью тока более 40 А/см². Продолжительность работы аналогичных приборов с сетками из гафния составляла около 1 мин, после чего происходил пробой между катодом и сеткой и ее перегорание.

Продемонстрирована возможность неразъемного соединения ступеней коллектора из графита марки МПГ7 с керамикой ВК 94-2 методом пайки припоем ПЗлМ37.5В. Механическая прочность металлизационного покрытия из молибдена с графитом была достигнута за счет текстурирования поверхности графитовой детали травлением в серной кислоте и термохимическому травлению пленкой никеля в среде водорода.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фиалков А.С. Углеродные материалы. М.: Энергия, 1979.
2. Чеканов В.Д., Фиалков А.С. // Успехи химии. 1971. Т. 40. № 5. С. 777.
3. Фиалков А.С., Бавер А.И., Сидоров Н.М. и др. // Успехи химии. 1965. Т. 34. № 1. С. 132.
4. Елецкий А.В. // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180. № 9. С. 897.
5. Крачковская Т.М., Мельников Л.А., Глухова О.Е. и др. // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 13. С. 51. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.13.49593.18315>
6. Крачковская Т.М., Мельников Л.А. // Электрон. техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2019. № 3. С. 20.
7. Бабкова Н.И., Баймагамбетова Л.Т., Богачев Р.Ю. и др. // Материалы XXI координационного науч.-техн. семинара по СВЧ технике, 60 лет АО «НПП «Салют». 2021. п. Хахалы Нижегород. обл., 7–9 сентября 2021. С. 7.
8. Сотникова Е.М., Радзимовская Н.М. // Обзоры по эл. технике. Электрон. техника. 1984. Сер.7. № 7. С. 62.
9. Плешкова Л.С., Шестеркин В.И. // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 11. С. 141.
10. Григорьев Ю.А., Васильковский С.В., Шестеркин В.И., Ярцева З.А. Способ изготовления топологии преимущественно многоострийного катода. А.с. СССР № 1738013. Оpubл. Б.И. от 12.02.1993.
11. Шестеркин В.И., Шалаев П.Д., Бессонов Д.А. и др. Способ изготовления автоэмиссионного катода из углеродного материала // Пат. РФ № 2658304. Оpubл. офиц. бюл. «Изобретения. Полезные модели» № 17 от 20.06.2018.
12. Шестеркин В.И. // РЭ. 2020. Т. 65. № 1. С. 1.
13. Шестеркин В.И., Соколова Т.Н., Морев С.П. и др. // РЭ. 2016. Т. 61. № 9. С. 896.
14. Arin M.P., Krachkovskaya T.M., Shalaev P.D. // Proc. Conf. APEDE 2020, Saratov, 24–25 Sept. 2020. N.Y.: IEEE, 2020. P. 71. <https://doi.org/10.1109/APEDE48864.2020.9255558>
15. Григорьев Ю.А., Правдин Б.С., Шестеркин В.И. // Обзоры по эл. технике. Электрон. техника. Электроника СВЧ. 1987. № 7. Сер. 1. С. 71.
16. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 9. С. 1464.
17. Журавлев С.Д., Кириченко Д.И., Манжосин М.А. и др. // Электрон. техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2020. № 4. С. 60.