

К 85-ЛЕТИЮ
Н.И. СИНИЦЫНА

УДК 621.385.6

КРУПНОСТРУКТУРНЫЕ АВТОЭМИССИОННЫЕ ЯЧЕЙКИ
И ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
НА ИХ ОСНОВЕ: РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

© 2022 г. С. П. Морев^а, А. Н. Дармаев^б, К. В. Кузьмич^с, Э. К. Муравьев^с,
В. М. Саблин^с, Д. А. Бессонов^д

^а Научно-производственное предприятие “Исток” им. А.И. Шокина,
ул. Вокзальная, 2а, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

^б Научно-технический центр Россети ФСК ЕЭС,
Каширское шоссе, 22, к.3, Москва, 115201 Российская Федерация

^с Научно-производственное предприятие “Торий”,
ул. Обручева, 52, Москва, 117393 Российская Федерация

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

*E-mail: spmor@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.04.2022 г.

После доработки 25.04.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований автоэмиссионных ячеек с аспектным отношением в несколько сотен единиц, полученных на основе технологии фрезерования лазерным излучением. В качестве материала автоэмиссионных эмиттеров использован гафний, молибден, стеклоуглерод и вольфрам. Показана возможность использования автоэмиссионными электронными ячейками в электронно-оптических системах для электровакуумных приборов, включая приборы СВЧ О-типа с протяженным электронным потоком.

DOI: 10.31857/S0033849422100096

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря возможности получения стабильной автоэлектронной эмиссии катодов при давлении остаточных газов не хуже 10^{-6} мм рт. ст. игольчатые, или лезвийные автоэмиттеры из тугоплавких металлов (вольфрам, молибден), а также из углеродных материалов (стеклоуглерод или алмазоподобные пленки) продолжают оставаться перспективными материалами для изготовления катодов различных электровакуумных устройств [1].

В ряде работ (см., например, [2–5]) представлены результаты исследований возможности применения в качестве источников автоэлектронной эмиссии игольчатых эмиттеров из стеклоуглерода СУ-2000.

Так, в работе [2] на основе описанного в [6] способа изготовления катодной матрицы игольчатого типа из стеклоуглерода СУ-2000, были представлены результаты испытаний работы автоэмиссионного катода из стеклоуглерода СУ-2000 в лампе бегущей волны (ЛБВ).

В работе [3] описаны результаты численного моделирования и экспериментального исследования формирования электронного потока ячей-

ками с многоострийными катодными матрицами, предназначенными для использования в некоторых конструкциях электронных пушек.

В работе [4] в двумерном приближении, были рассмотрены результаты численного моделирования процесса формирования и последующей транспортировки электронного потока в магнитном поле электронно-оптических систем (ЭОС) с лезвийными автоэмиттерами.

В работе [5] представлены результаты численного расчета и экспериментальных исследований ячейки с игольчатым эмиттером с большим аспектным соотношением из стеклоуглерода СУ-2000, аналогичной по структуре ячейке Спиндта [7]. Перспективность применения ячеек с большим аспектным отношением эмиттеров связана с возможностью снижения требования к допускам на изготовление ячеек в целом и, тем самым, возможностью использования технологий, характерных для электровакуумных приборов, без применения технологий полупроводниковой электроники.

В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований крупноструктурных автоэмиссионных ячеек, с устойчивой эмиссией электронных потоков с токами 0.2...4 мА при вакууме 5.0×10^{-7} ... 6.0×10^{-8} Торр

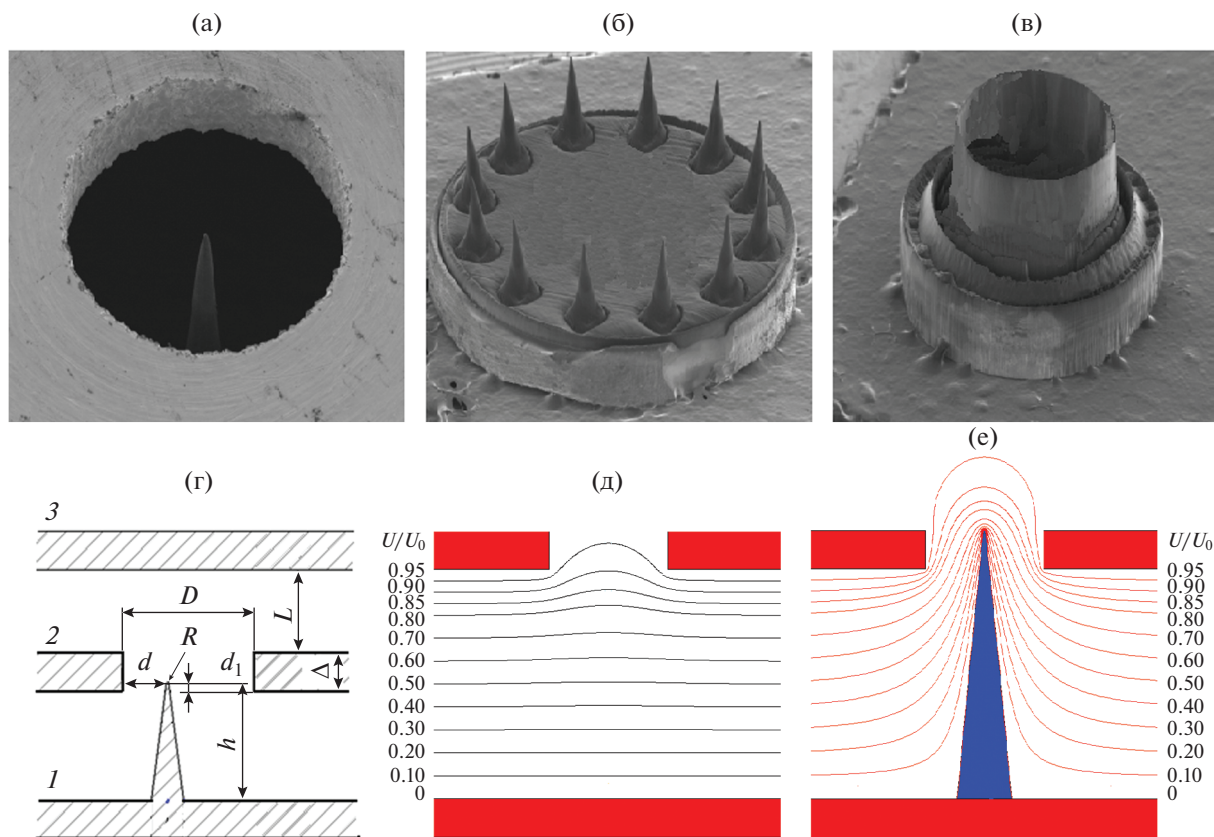


Рис. 1. Автоэмиссионные ячейки различного вида: одиночный эмиттер (а), групповое расположение эмиттеров (б), кольцевое лезвие (в); их схематическое представление (г), распределение потенциала U/U_0 в ячейке без эмиттера (д) и с эмиттером (е) для одиночного эмиттера.

в режиме работы от источника постоянного напряжения в течение нескольких часов, а также возможности использования этих ячеек в ЭОС электровакуумных приборов различного применения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве перспективных конструкций были рассмотрены два варианта пушек с автоэлектронными структурами, формирующих интенсивные электронные потоки для электровакуумных приборов [3–5]. К первому варианту (аналог ячейки Спиндта [7]) были отнесены катодные структуры, в которых элементарная ячейка состояла из аксиально-симметричного игольчатого автоэмиттера с большим аспектным отношением¹ и соосного с ним электрода с отверстием (рис. 1а).

Ко второму варианту (аналог ячейки Григорьева–Шестеркина [6]) были отнесены структуры, в которых центры игольчатых автоэмиттеров (рис. 1б) расположены эквидистантно на окруж-

ности, соосной с отверстием в крупноструктурной сетке².

В работе [5] при относительно невысоком значении напряжения ($U = 2350$ В) на вытягивающем токе электроде для таких структур в импульсном режиме удалось получить ток с одного эмиттера, равный 8 мА.

При моделировании формирования потока электронными пушками с рассматриваемыми автоэмиссионными ячейками, как и в [8], необходимо учитывать двухмасштабность³ области формирования потоков в таких пушках. При рассмотрении параметров электронного потока, формируемого подобными ячейками, помимо получения максимальной величины эмиссионного тока, требуемого диаметра электронного потока, распределения преимущественных углов электронных траекторий

² В пределе такое расположение приводит к образованию кольцевого лезвия (рис. 1в).

³ Под двухмасштабностью области электронной пушки понимается наличие в пушке двух подобластей: в первой подобласти происходит значительная пространственная декомпрессия микропучков, эмитируемых с острий ячеек, а во второй – за счет распределения потенциала в пушке происходит относительно небольшая компрессия потока в целом.

¹ Следует отметить, что само понятие аспектного отношения для игольчатых автоэмиттеров было введено для эмиттера, расположенного на плоскости при отсутствии электрода, выполняющего функцию анода.

Таблица 1. Основные размеры автоэмиссионных ячеек № 1–3

Размеры, мкм	№ 1	№ 2	№ 3
D_1	480	480	480
d	50	130	110
d_1	40	40	–200
L	200	200	200
Δ	140	120	120
h	430	1070	1300
R	5.0	3.5	2.0

следует также учитывать эмиттанс электронного потока, величина которого зависит и от взаиморасположения электродов в пушке в целом. За счет оптимизации положения электродов в электронной пушке необходимо получить такое распределение потенциала, которое обеспечивало бы требуемые характеристики сформированного потока при относительно небольшой величине фазового объема пучка.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ АВТОЭМИССИОННЫХ ЯЧЕЕК И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Численное моделирование автоэмиссионных ячеек

Были рассмотрены автоэмиссионные ячейки (см. рис. 1г), основные размеры которых представлены в табл. 1.

Отношение высоты эмиттера к радиусу кривизны его вершины h/R составило 86, 305 и 650 для эмиттеров 1–3 соответственно.

Для получения большей величины электрического поля на поверхности эмиттера, вершины эмиттеров ячеек были погружены в отверстие сетки ($d_1 = 40$ мкм).

Типичное распределение потенциала в ячейке без эмиттера и с эмиттером, расположенным по центру ячейки при $d_1 = \Delta$, представлено на рис. 1д–1е, а изменение величины электрического поля на вершине эмиттера при $d_1 = \Delta$ в зависимости от отношения D/R и h/R – на рис. 2а, 2б.

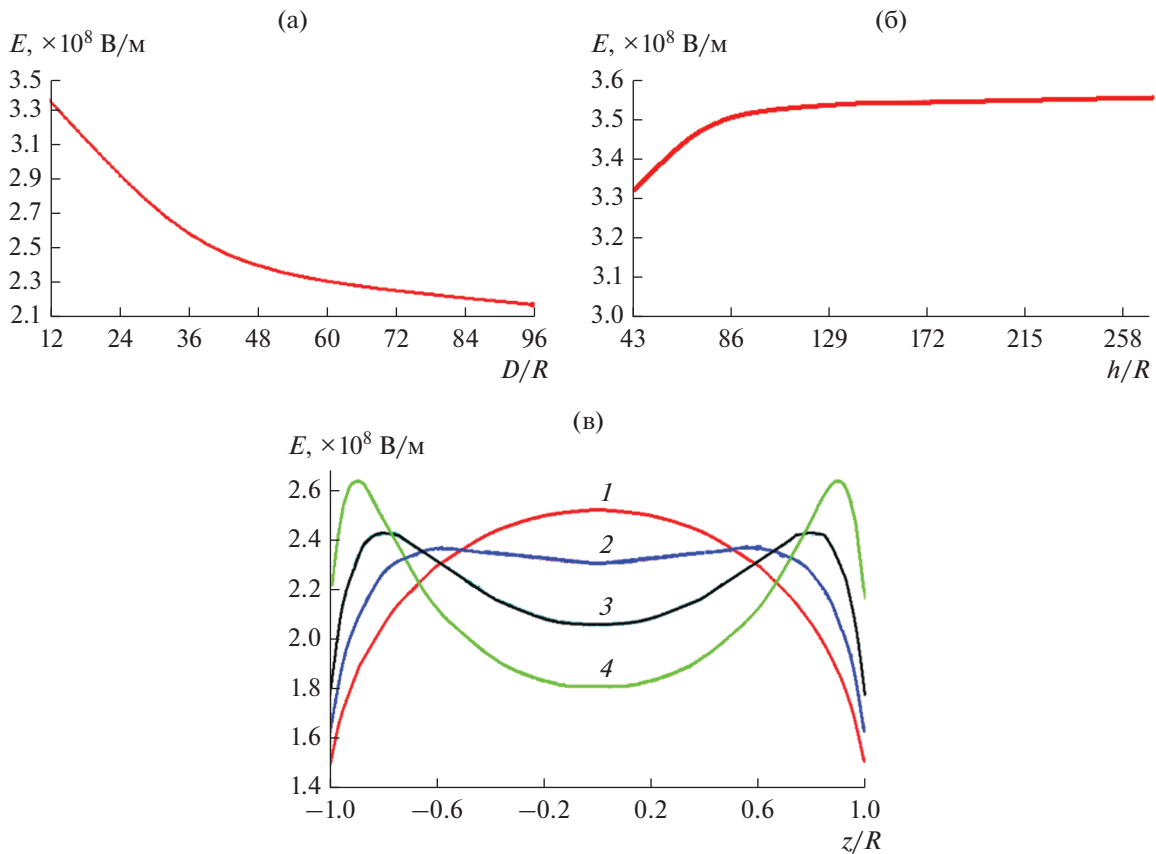


Рис. 2. Зависимость величины электрического поля E от величины D/R (а) при постоянном h и от величины h/R (б) при постоянном D для одиночного эмиттера, а также зависимости напряженности поля на острие от кривизны острия (в): 1 – острие в виде полусферы $R = 5$ мкм, 2–4 – острие в виде половины кругового эллипсоида вращения с полуосями $a_y = 4$ (2), 3 (3), 2 мкм (4) и $a_x = R$.

Поскольку распределение напряженности электрического поля зависит от величины радиуса кривизны вершины эмиттера, то за счет изменения этой величины можно существенным образом менять распределение плотности тока на поверхности эмиттера (см. рис. 2в).

Смещение вершины иглы от центра отверстия к его краю позволило сделать автоэмиссионную ячейку более низковольтной, чем при расположении иглы по центру отверстия, однако при этом чрезмерное заглубление вершины эмиттера привело к существенному оседанию пучка на сетку (рис. 3а). Анализ результатов расчета ячейки № 1 (рис. 3а)⁴ показал, что при подаче потенциала на сетку, равного $U = 2350$ В, на ней локально оседало 42% эмитированного тока, что соответствовало выделяемой мощности около 8 Вт. Площадь оседания составляла около 2.8% от площади боковой поверхности отверстия в сетке, таким образом, плотность мощности оседания составила 130 кВт/см².

В табл. 2 представлена расчетная зависимость величины тока с острия эмиттера ячейки № 1 от величины его радиального смещения в ячейке в направлении от края отверстия к его центру при неизменном напряжении на аноде, равном $U = 2350$ В, и величине заглубления острия в отверстие, равной $d_1 = 40$ мкм (рис. 3б, 3г).

В табл. 3 представлена аналогичная зависимость величины тока с острия эмиттера той же ячейки при размещении эмиттера по оси отверстия ($d = 240$ мкм) от величины d_1 (рис. 3б, 3в).

Следует отметить, что при расположении эмиттера 1 по оси отверстия и $d_1 = 40$ мкм (см. рис. 3) для восстановления величины напряженности электрического поля⁵ на вершине эмиттера (соответственно, для восстановления величины тока до прежнего значения тока в ячейке), достаточно увеличить напряжение на сетке с 2350 до 3000 В.

При размещении эмиттера ячейки № 1 по центру отверстия, а его вершины на уровне верхнего края отверстия, для восстановления прежней величины тока достаточно напряжения на сетке, равного 2850 В. Зависимость величины тока эмиттера ячейки № 1 от величины диаметра отверстия в сетке при таком расположении вершины эмиттера приведена в табл. 4.

Для ячейки № 2 при $U = 2350$ В, при том же заглублении вершины эмиттера и его размещении на расстоянии $d = 130$ мкм от края отверстия зна-

⁴ Результаты экспериментального исследования этой ячейки при работе с источником импульсного напряжения приведены в [5].

⁵ Асимметричность относительно центра острия в зависимости 3 (см. рис. 3) связана с несимметричным расположением эмиттера относительно оси ячейки.

Таблица 2. Зависимость тока от горизонтального положения эмиттера в отверстии ячейки № 1

d , мкм	50	100	150	200	240
I , мА	7.91	0.69	0.2	0.11	0.09

Таблица 3. Зависимость тока от вертикального положения эмиттера в отверстии ячейки № 1

d_1 , мкм	0	35	70	105	140
I , мА	0.052	0.082	0,14	0.20	0.24

Таблица 4. Зависимость тока от величины диаметра отверстия ячейки

D_1 , мкм	480	450	400	350	300	250
I , мА	9.4	12.0	17.6	23.0	33.5	49.0

чение тока получилось больше за счет большего аспектного отношения.

Размещение вершины эмиттера ячейки № 3 ниже отверстия в сетке, несмотря на меньший радиус кривизны вершины эмиттера, привело к существенному падению тока при напряжении 2350 В и оседанию части тока на сетку.

Из анализа результатов расчетов (см. рис. 1) следует, что для ячеек, в которых электрод, вытягивающий ток, имеет отверстие, изменение величины электрического поля на вершине эмиттера в гораздо большей степени зависит от аспектного отношения D/R , нежели от аспектного отношения h/R .⁶ При величинах $D/R > 100$ или $h/R > 100$ изменения величины электрического поля на вершине эмиттера становятся незначительными и их дальнейшее увеличение нецелесообразно⁷.

2.2. Формирование потока электронной пушкой

Основные причины, затрудняющие формирование пучка электронной пушкой, связаны с большой расходимостью потока вблизи эмиттера (рис. 4а). Как отмечалось еще в работе [11] углы наклона электронных траекторий вблизи поверхности автоэмиттера могут достигать 60°...80°. Попытки “повернуть” электронные траектории, стартующие с периферии автоэмиттера, для уменьшения углов наклона к оси ЭОС приводят к пересечению этих траекторий с оставшейся частью расходяще-

⁶ Именно поэтому декларируемые рекордные значения величин тока с острий на расположенный вблизи электрод при отсутствии в нем отверстий не подтверждаются при наличии отверстий.

⁷ Однако в случаях, при которых важны малые значения емкости ячейки (например, [9]), увеличение аспектного отношения h/R остается полезным

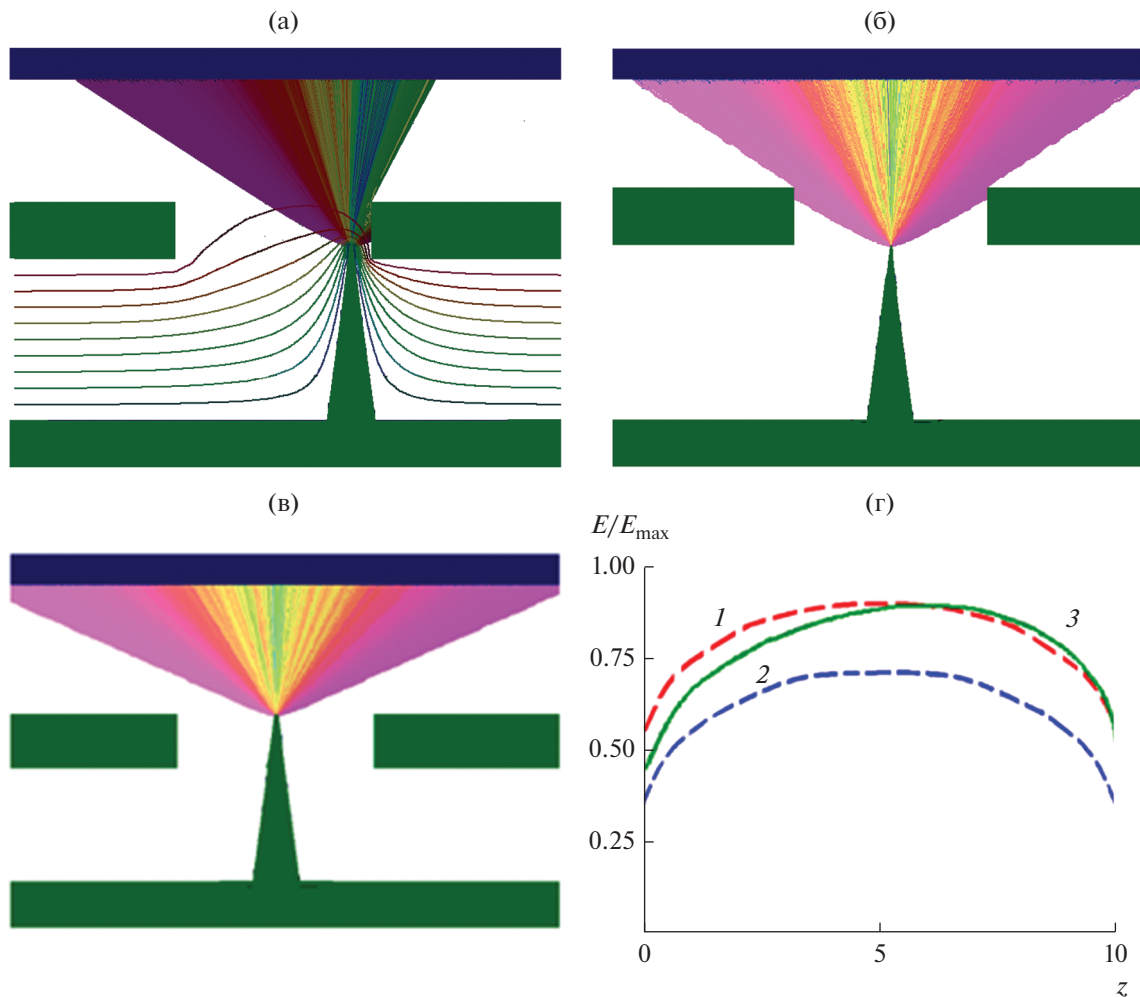


Рис. 3. Ход траекторий (а–в) и распределение электрического поля на вершине эмиттера (г) в ячейке № 1: а) $d = 50$ мкм, $d_1 = 40$ мкм; б) $d = 240$ мкм, $d_1 = 0$ мкм; в) $d = 240$ мкм, $d_1 = 140$ мкм (см. рис. 1г); г) $d = 240$ мкм, $d_1 = 140$ мкм (кривые 1 и 2), 3 – $d = 50$ мкм, $d_1 = 40$ мкм (кривая 3); $U = 3000$ (1), 2350 (2) и 2350 В (3).

гося потока и к образованию разброса электронов по углам наклона. При формировании сходящегося электронного потока на выходе из пушки получается поток с еще большим разбросом по углам наклона. Если же катод электронной пушки содержит несколько автоэмиссионных эмиттеров, то разброс по углам наклона возникает из-за пересечения траекторий, стартующих с разных эмиттеров. Тем не менее при определенном распределении потенциала вдоль оси электронной пушки (см. рис. 4а) может быть сформирован электронный поток, имеющий кроссовер в области анода (см. рис. 4б), причем так называемый ореол пучка (обозначен серым цветом) содержит не более 2...3% общего тока.

На этой основе могут быть построены электронные пушки для различных применений, например для рентгеновских трубок, электронно-лучевой сварки или для ЭОС приборов О-типа миллиметрового диапазона [12–14]. Для умень-

шения диаметра пятна на мишени при использовании автоэмиттеров для рентгеновских трубок или для электронно-лучевой сварки достаточно (как и при использовании обычных термокатодов) “отсечь” ореол пучка с помощью диафрагм. Аналогичные функции выполняют коллиматоры, размещаемые между электронной пушкой и замедляющей системой в обычных ЭОС с термокатадами ЛБВ миллиметрового диапазона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК АУТОЭМИССИОННЫХ ЯЧЕЕК И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Макет и схема установки

Были рассмотрены одиночные автоэмиссионные катодные ячейки с эмиттерами из различных материалов (табл. 5).

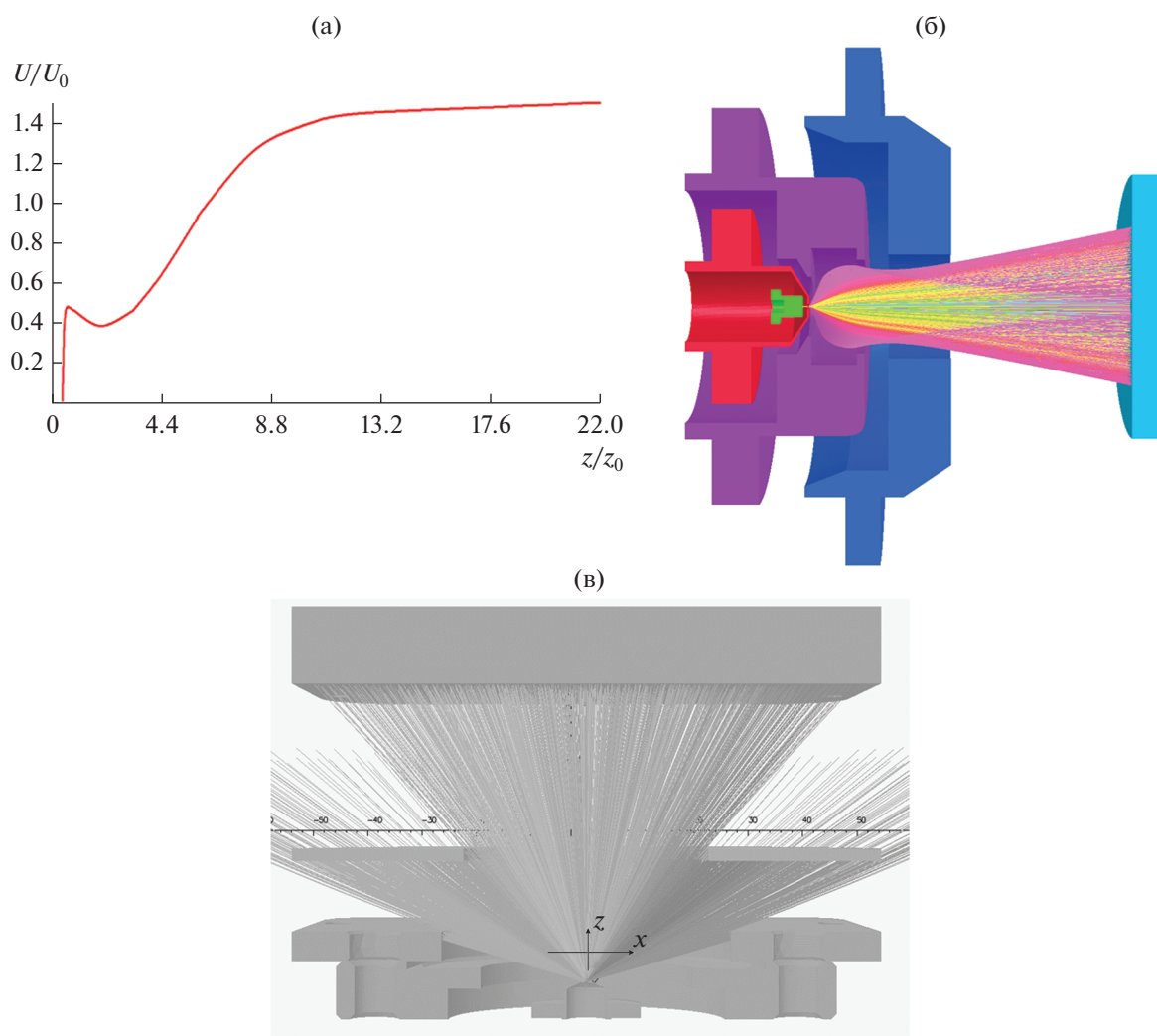


Рис. 4. Осевое распределение потенциала (а), конфигурация электродов и траектории пучка в области электронной пушки (б), траектории электронов в пушке с диафрагмой при $U_k = U_c = 5.75$ кВ, $U_d = 6.0$ кВ, ток катода 1.7 мА (в).

Экспериментально исследовался макет электронной пушки (см. рис. 5а), в котором могло быть размещено от одного до четырех эмиттеров. Диаметр отверстия сетки был равен $D = 490$ мкм, а толщина сетки 140 мкм. Эмиттеры были изготовлены методом лазерного фрезерования [5, 10] и установлены в экспериментальный макет без предварительной химической или плазменной очистки катода (некоторые эмиттеры подвергали ультразвуковой очистке). Макет использовался в режиме работы автоэмиссионной ячейки (катод,

сетка, коллектор) или в режиме электронной пушки при дополнительном размещении фокусирующего электрода и анода. В первом случае на управляющую сетку и коллектор пушки подавался одинаковый потенциал, вследствие чего электронный поток распространялся в эквипотенциальном пространстве. Во втором случае на дополнительные электроды подавались необходимые потенциалы. Токи на сетку и анод, а также ток катода регистрировали независимо. Для визуализации пучка в макете был установлен коллектор-

Таблица 5. Основные размеры экспериментальных ячеек с эмиттерами

Размеры	Гафний	Молибден	Вольфрам	Стекло–углерод
Диаметр отверстия в сетке, мкм	480	480	480	480
Высота иглы, мкм	720–850	435–850	690–1500	370–1450
Радиус кривизны вершины, мкм	3.5–21.0	3.5–21.0	3.5	2.0–11.0

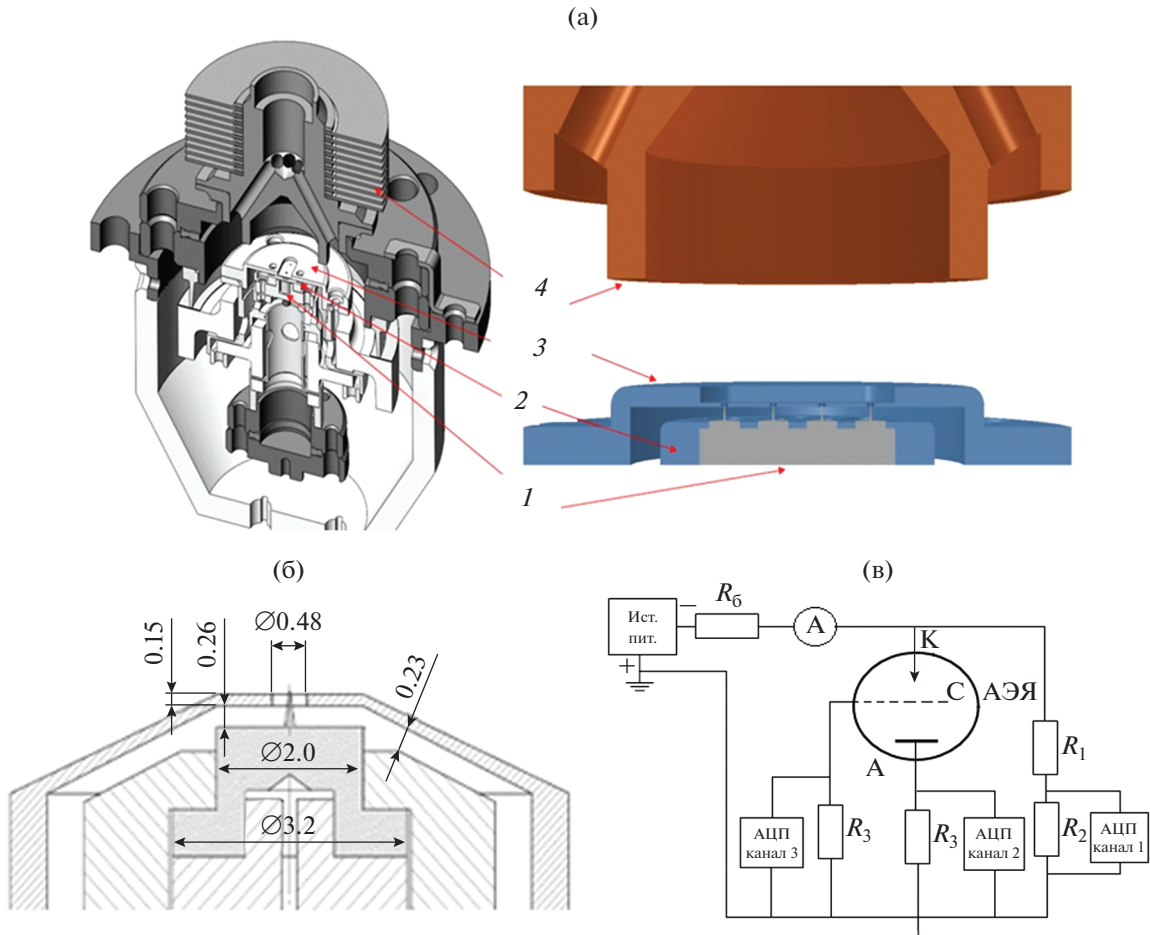


Рис. 5. Экспериментальный макет многолучевой электронной пушки (а, б) и схема измерений (в) $R_6 = 1.19 \text{ МОм}$, $R_1 = 11.4 \text{ МОм}$, $R_2 = 9.5 \text{ кОм}$, $R_3 = 300 \text{ Ом}$; 1 – катод, 2 – держатель, 3 – фокусирующий электрод, 4 – коллектор. Все размеры в миллиметрах.

мишень в виде пластины с нанесенными на нее люминофором и равноотстоящими (шаг 2.0 мм) рисками.

Схема измерений представлена на рис. 5в. Измерения зависимостей тока от времени при различных напряжениях на сетке проведены при давлении остаточных газов 5.8×10^{-7} Торр в режиме питания автоэмиссионной ячейки от источника постоянного напряжения и при непрерывном процессе откачки объема вакуумной камеры.

Таблица 6. Зависимость тока утечки от потенциала на сетке и аноде

U_a , кВ	I_c , мкА	I_k , мкА
6	1.5	1.5
8.5	5	3
12	10	3.5
14.5	15	4

Минимальный интервал записи экспериментальных измерений с каналов 1...3 аналогово-цифровой платы составлял 0.2 с. Перед испытаниями экспериментальный макет прошел проверку электрической прочности изоляции при напряжении до 14.5 кВ (табл. 6).

3.2. Автоэмиссионная ячейка из гафния

Была рассмотрена автоэмиссионная ячейка с одиночным острым эмиттером из гафния, высота иглы 1.028 мм, радиус кривизны острия 8.35 мкм (рис. 6а). Образец проходил ультразвуковую очистку в трихлорэтано.

Режим подачи напряжения между катодом и сеткой непрерывный. Давление в вакуумной камере 10^{-7} Торр.

Макет содержал катод, сетку и коллектор (фокусирующий электрод и анод с отверстием не устанавливали).

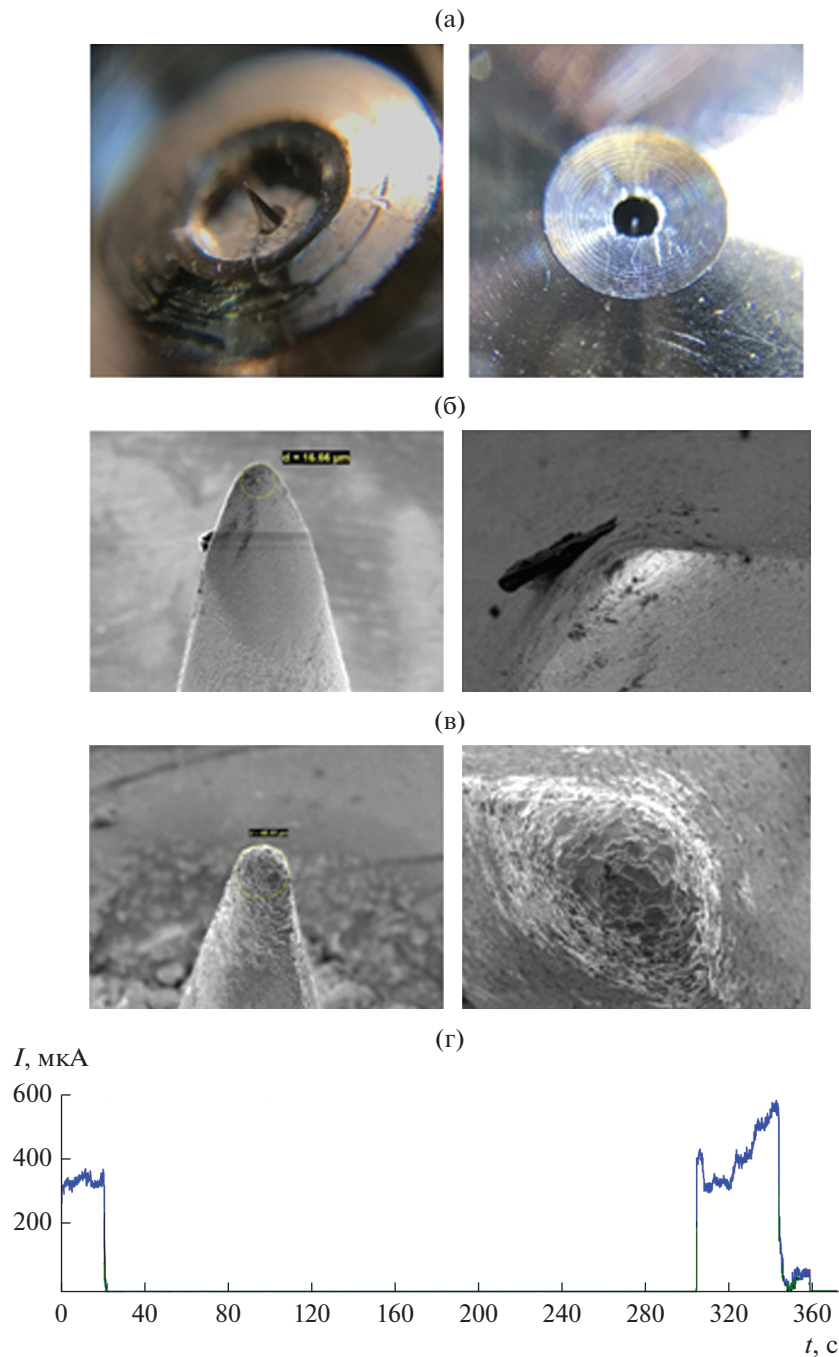


Рис. 6. Фото катодно-сеточного узла автоэмиссионной ячейки (а), вид эмиттера до испытаний (б) и после (в), зависимость тока от времени при напряжении на сетке $U = 5900$ В (один из этапов измерений).

Максимальное значение тока катода было достигнуто при начальных измерениях и составило 3.6 мА при напряжении катод–сетка 5300 В, при этом токооседание на сетку составляло 2% . Однако при дальнейших измерениях величина тока была нестабильной и происходила постепенная деградация эмиссии, поэтому испытания на долговечность не проводили.

Вид эмиттера до и после испытаний представлен на рис. бб, бв, а результаты измерений на одном из этапов испытаний на рис. бг.

Измерения размеров эмиттера из гафния после испытаний с помощью электронного микроскопа показали, что высота эмиттера уменьшилась на 120 мкм, а радиус кривизны острия увеличился до 24 мкм.

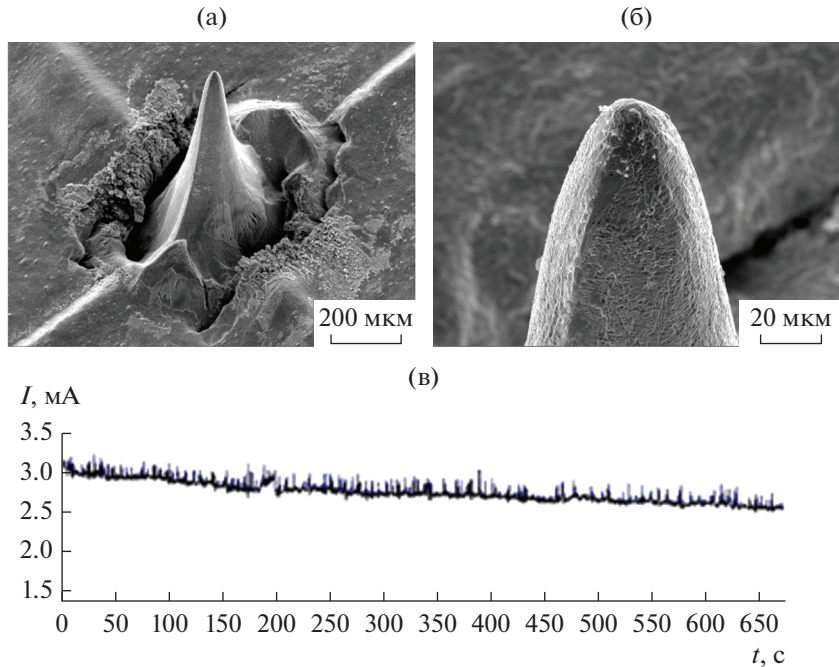


Рис. 7. Фото эмиттера из молибдена до испытаний (а, б) и зависимость тока от времени при $U = 5100$ В (в).

3.3. Автоэмиссионная ячейка из молибдена

Была рассмотрена автоэмиссионная ячейка с одиночным острым эмиттером из молибдена, высота иглы 0.847 мм, радиус кривизны острия 19 мкм (рис. 7а). Образец был очищен с помощью химического травления и отжига.

Режим подачи напряжения между катодом и сеткой непрерывный. Давление в вакуумной камере 2.8×10^{-8} Торр.

Макет содержал катод, сетку и коллектор (фокусирующий электрод и анод с отверстием не устанавливали).

Максимальное значение тока катода было достигнуто при начальных измерениях и составило 3.6 мА при напряжении катод–сетка 5300 В, при этом токооседание на сетку составляло 2%. Измерения проводили в течение 10 мин, падение величины тока за этот период времени составило 19%.

3.4. Автоэмиссионная ячейка из стеклоуглерода СУ-2000

Была рассмотрена автоэмиссионная ячейка с одиночным острым эмиттером из стеклоуглерода. Образец не проходил предварительную ультразвуковую очистку. Режим подачи напряжения между катодом и сеткой непрерывный. Давление в вакуумной камере составляло 10^{-7} Торр.

Макет содержал катод, сетку, коллектор (фокусирующий электрод и анод с отверстием не устанавливались) и диафрагму с отверстием диа-

метром 41.6 мм, которая расположена между коллектором и сеткой (22 мм от вершины острия) для оценки размера электронного потока. Для этой же цели служил и нанесенный на коллектор люминофор.

Достигнутое максимальное значение тока с острия катода составило 250...300 мкА для иглы высотой 1.3 мм, радиусом кривизны острия 3.0 мкм при подаче напряжения на сетку 2000...2100 В и при напряжении на сетке 3600 В для другой иглы. При этом токопрохождение через диафрагму составило $\sim 70\%$, а ток на сетку практически отсутствовал.

Зависимости тока от времени представлены на рис. 8а, 8б. Деграция тока катода составила 40% за 30 ч.

Результаты измерений эмиттеров из стеклоуглерода СУ-2000 в непрерывном режиме показали, что острия эмиттеров подвергались сильной эрозии (рис. 8в–8г), заметно менялась не только форма острий, но и высота эмиттеров (после пятичасовой работы высота эмиттера уменьшилась на 70 мкм).

3.5. Автоэмиссионная ячейка из вольфрама

Была рассмотрена автоэмиссионная ячейка с одиночным острым эмиттером из вольфрама, высота иглы 1.08 мм, радиус кривизны острия 3.3 мкм. Образец не проходил ультразвуковую очистку.

Макет содержал катод, сетку, коллектор (фокусирующий электрод и анод с отверстием не

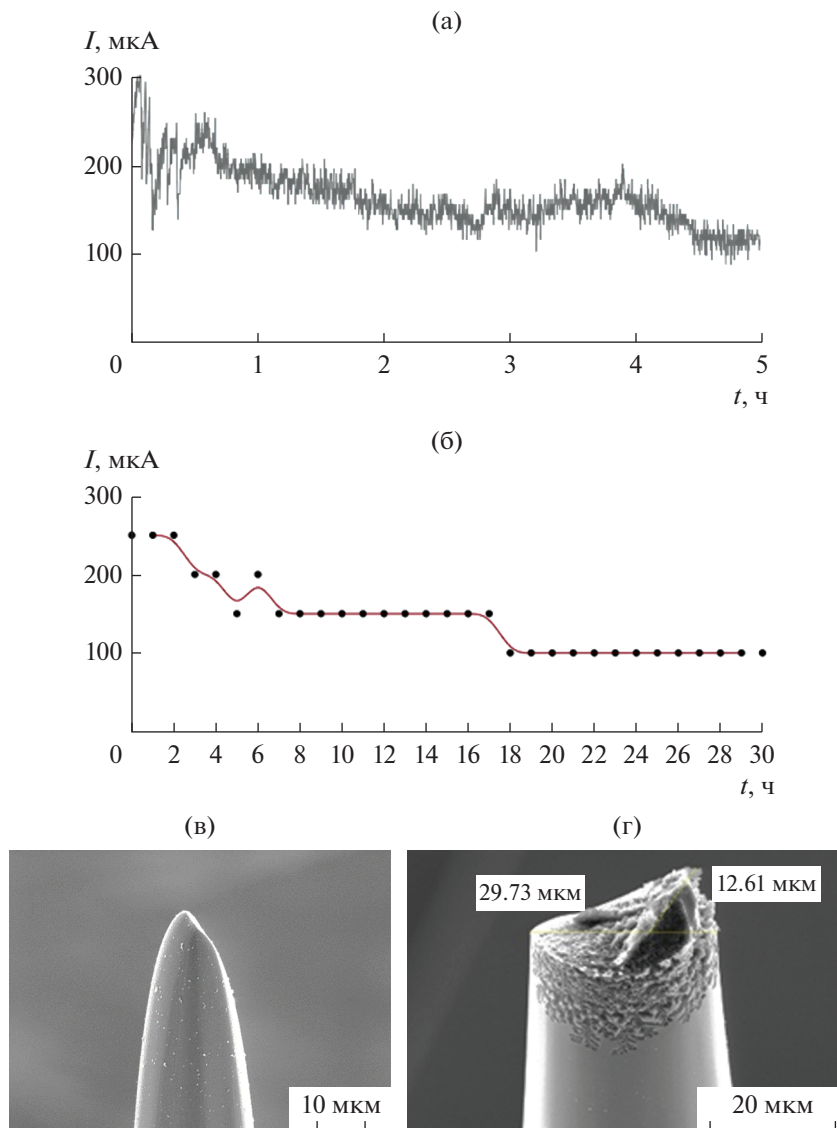


Рис. 8. Зависимость тока от времени (а, б) для эмиттеров из стеклоглиноуглерода СУ-2000 при $U = 2100$ (а), 3600 В (б) и вид эмиттера до (в) и после испытаний (г).

устанавливали). Режим подачи напряжения между катодом и сеткой непрерывный, давление в вакуумной камере составляло 2×10^{-7} Торр.

Максимальный ток катода составил 1.22 мА при напряжении катод–сетка 4637 В, токооседание на сетку составило 4% (53 мкА).

Были проведены испытания на долговечность в течение 12 ч при постоянном напряжении катода 4350 В (рис. 9).

Скорость деградации тока катода составила 250 мкА/ч в промежутке от 0 до 2 ч и 13 мкА/ч в промежутке от 2 до 12 ч.

Результаты измерений эмиттера из вольфрама, проведенные до и после испытаний в непрерывном режиме на протяжении семи часов, показыва-

ли, что эрозия острия эмиттеров незначительна, а высота эмиттера не изменилась (рис. 10).

Были проведены испытания автоэмиссионной ячейки при повышенных значениях напряжений на сетке. Так, для вольфрамового эмиттера высотой 1.44 мм и радиусом кривизны острия 4.7 мкм при напряжении катод–сетка 5000 В максимальное значение тока катода составило 5.4 мА (ток на сетку и анод с отверстием составил 5%). Однако в течение 2 мин ток катода уменьшился до 2.6 мА и испытания были прекращены.

Анализ временных зависимостей катодного тока показал, что при непрерывном режиме работы автоэмиссионных ячеек ток с эмиттера подвержен быстро меняющимся амплитудным изменениям, которые уменьшаются по мере общего спада тока

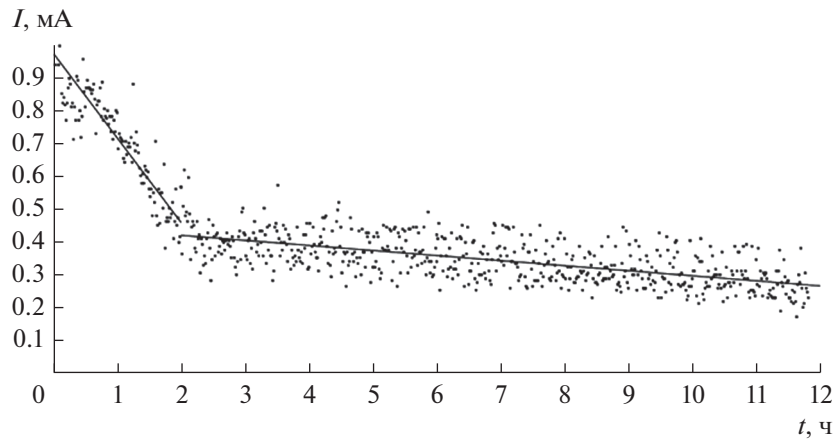


Рис. 9. Зависимость тока с острейного вольфрамового катода от времени.

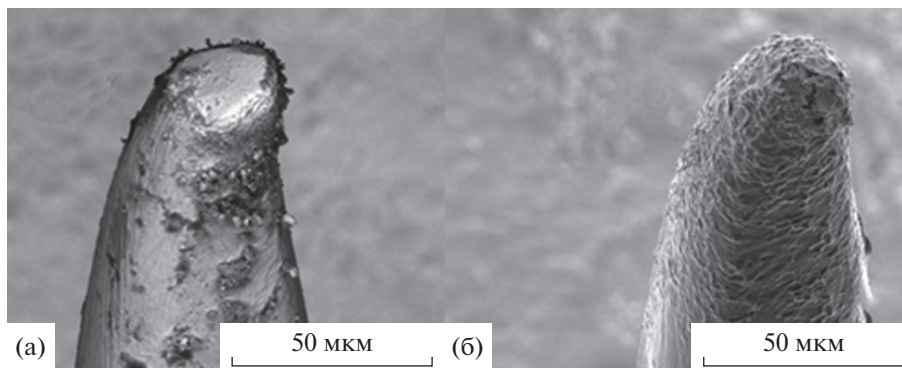


Рис. 10. Фото вершины острейного вольфрамового катода до (а) и после испытаний (б).

(рис. 11). Анализ “временной развертки” начального участка зависимости тока от времени (см. рис. 11б) показал, что амплитудные изменения обусловлены периодическими колебаниями с экспоненциальным фронтом нарастания величины тока и резким конечным падением в конце при постоянном напряжении на сетке, что косвенно свидетельствует о процессах тепломассопереноса на острие эмиттера и именно устранение этого фронта позволит увеличить длительность работы автоэмиссионной ячейки. Однако подтверждение этого требует проведения дополнительных экспериментов.

Были проведены испытания макета, в котором при подаче напряжения на сетку и коллектор (фокусирующий электрод и анод с отверстием не устанавливали) одновременно измеряли токи от двух и трех автоэмиссионных ячеек. Режим подачи напряжения между катодом и сеткой и коллектором — непрерывный, давление в вакуумной камере составляло 5×10^{-8} Торр.

При испытаниях на долговечность макета с двумя эмиттерами из вольфрама продолжитель-

ностью измерений 30 мин был достигнут максимальный ток катода 2.7 мА при напряжении катод–сетка 4500 В, при этом токооседание на сетку 17%. Дegrадация тока на этом интервале составила 20%.

При испытаниях макета с тремя эмиттерами из вольфрама продолжительность измерений⁸ составила 10 мин, а максимальное значение тока катода 4.27 мА при напряжении катод–сетка 4500 В, при этом токооседание на сетку составило 20%.

3.6. Автоэмиссионная ячейка в ЭОС с магнитным полем

Была рассмотрена автоэмиссионная ячейка с одиночным острейным вольфрамовым эмиттером, входящая в состав ЭОС с магнитным полем, создаваемом катушкой с током. Образец не проходил ультразвуковую очистку. Давление в вакуумной камере составляло 4×10^{-8} Торр.

⁸ Малая длительность испытаний обусловлена опасениями тепловой перегрузки макета при непрерывном режиме работы и отсутствием охлаждения.

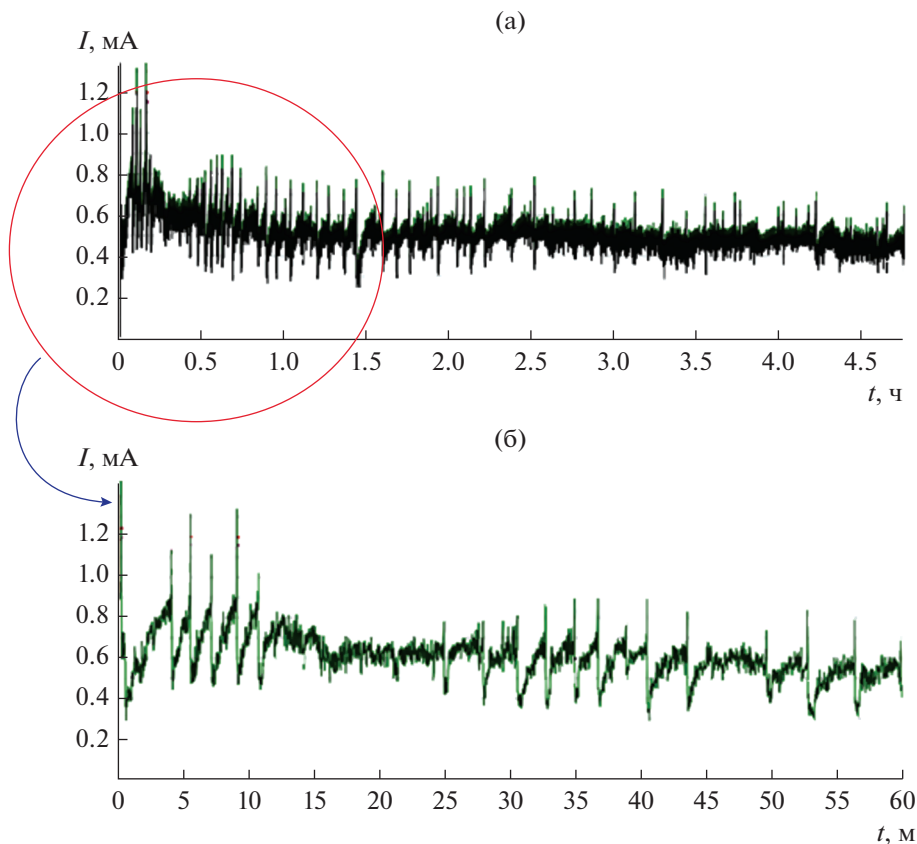


Рис. 11. Зависимости тока с острия вольфрамового катода от времени при пятичасовом испытании (а) и увеличенный фрагмент начального участка (б): высота острия 1.56 мм, радиус кривизны острия 12.3 мкм, напряжение на сетке $U = 5000$ В.

Макет ЭОС представлял собой электронную пушку, содержащую катод, сетку, фокусирующий электрод, анод с отверстием и токоприемник-коллектор с нанесенным люминофором. При напряжении катод-сетка 5324 В максимальное значение тока катода составляло 1.4 мА. Между электронной пушкой и коллектором была расположена катушка-соленоид протяженностью 26 мм и внутренним диаметром отверстия 32.5 мм. Ток катушки мог плавно изменяться от 0 до 5 А, при этом максимальное значение осевой компоненты индукции магнитного поля в центре катушки плавно изменялось от 0 до 0.06 Тл (рис. 12а). Расстояние от вершины эмиттера до плоскости коллектора составляло 50 мм.

Измерения диаметра пучка в зависимости от величины магнитного поля проводили при токе катода, равном 0.435 мА и напряжении катод-сетка 5200 В (токооседание на сетку составляло ~1%). Анализ результатов измерений показал, что при изменении величины магнитного поля диаметр пучка уменьшался от 40 мм (в отсутствие магнитного поля) до 16 мм (при амплитуде магнитного поля 0.024 Тл), что хорошо соответствовало расчетным значениям (см. рис. 12). При кратковре-

менном увеличении магнитного поля до 0.06 Тл диаметр пучка уменьшался до 8 мм, однако центральная часть пучка начинала выжигать люминофор и магнитное поле выключали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам испытаний автоэмиссионных ячеек можно сделать следующие выводы.

Наиболее предпочтительными оказались катоды из вольфрама.

Максимальные значения достигнутых величин токов на анод макета при значениях потенциалов на управляющей сетке и аноде, равных 5000 В, составили 5.4 мА в непрерывном режиме. Однако при рассмотренных геометрических размерах автоэмиссионных эмиттеров такие величины токов приводили к быстрой деградации тока катода.

При техническом вакууме 2×10^{-7} Торр и работе в непрерывном режиме макета однолучевой электронной пушки с вольфрамовым катодом игльчатого типа, формирующей электронный поток с током 0.35 мА и напряжением катод-сетка 4600 В, долговечность испытания составила более 10 ч

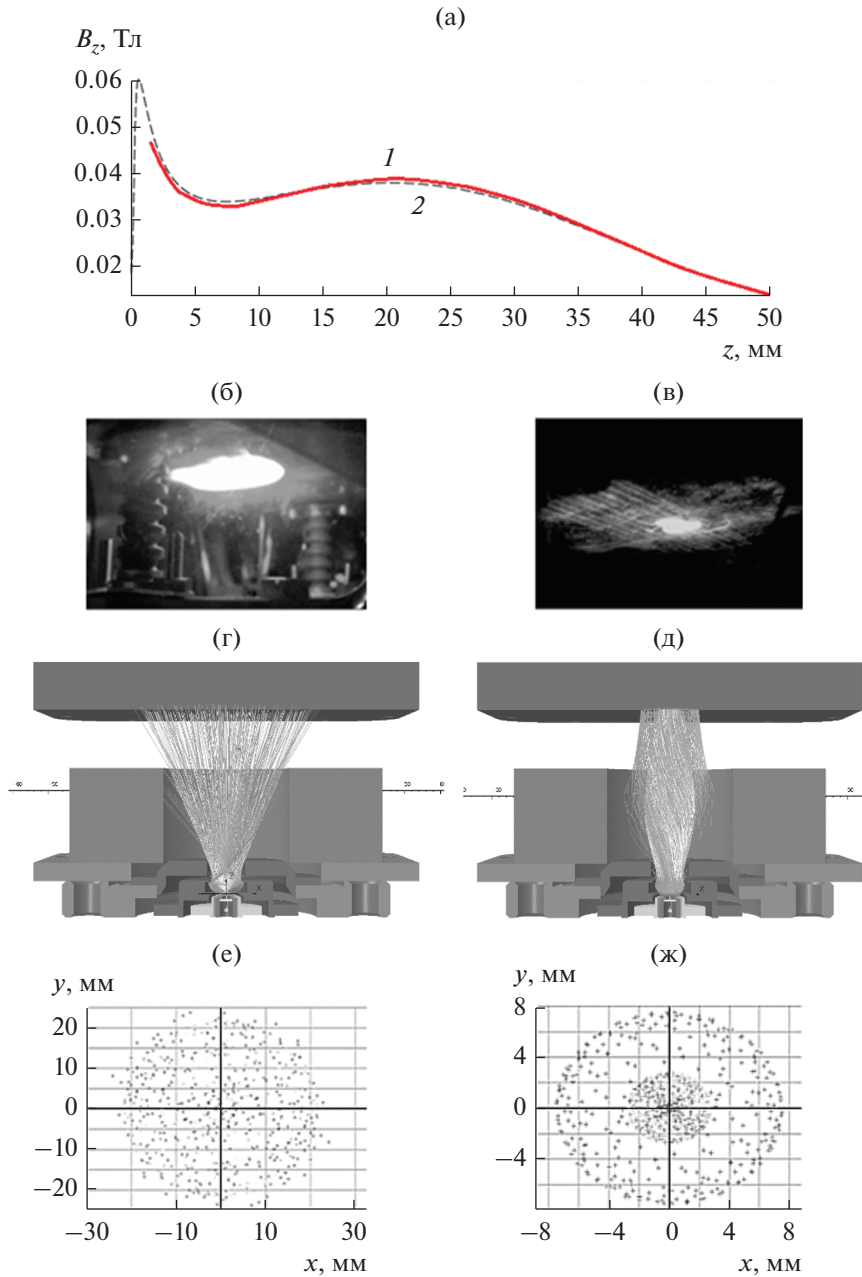


Рис. 12. Экспериментальные распределения (1) осевой компоненты индукции магнитного поля с учетом магнитопроводов при токе соленоида 3А (а), свечение люминофора от пучка на коллекторе в отсутствие магнитного поля (б) и с учетом магнитного поля при токе соленоида 2А (в) и расчетные распределения (2) траекторий в плоскости $x-z$ (г, д) и $x-y$ (е, ж).

при деградации тока катода, не превосходящей 10 мкА/ч.

При техническом вакууме 5×10^{-8} Торр и испытаниях в непрерывном режиме макета двухлучевой электронной пушки с вольфрамовыми автоэмиттерами, формирующей электронный поток с током 2.7 мА и напряжением катод–сетка 4500 В продолжительность испытания составила более 30 мин при деградации тока катода, не превосходящей

20%. При испытаниях макета с тремя эмиттерами из вольфрама продолжительность измерений составила 10 мин, а максимальное значение тока катода 4.27 мА при напряжении катод–сетка 4500 В.

Ожидаемая величина суммарного тока в автоэмиссионной ячейке, работающей в непрерывном режиме, с катодной матрицей, состоящей из семи острых катодов, может составить не ме-

нее 10 мА, а с катодной матрицей, состоящей из 19-ти острых катодов, не менее 25 мА.

Испытания ячейки с автоэмиттером игольчатого типа из стеклоуглерода в непрерывном режиме показали, что при полученных параметрах электронного потока острия эмиттеров подвергаются сильной эрозии, так что после пятичасовой работы заметно меняется не только форма острий, но и высота эмиттеров (уменьшение высоты эмиттера составило 70 мкм).

Испытания автоэмиссионной ячейки с катодом острийного типа из гафния в непрерывном режиме показали, что при полученных параметрах электронного потока острия эмиттеров также подвергаются сильной эрозии.

Проведенное моделирование электронного потока в магнитном поле и экспериментальные исследования в магнитном поле позволили оценить степень управляемости электронного потока и осуществить компрессию потока, сформированного с автоэмиттера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестеркин В.И. // РЭ. 2020. Т. 65. № 1. С. 3.
2. Григорьев Ю.А., Рехен Г.А., Семенов В.К., Шестеркин В.И. // РЭ. 1995. Т. 40. № 7. С. 1127.
3. Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Морев С.П. и др. // РЭ. 2014. Т. 59. № 8. С. 774.
4. Петросян А.И., Роговин В.И. // Прикладная физика. 2008. № 2. С. 86.
5. Шестеркин В.И., Соколова Т.Н., Морев С.П. и др. // РЭ. 2016. Т. 61. № 9. С. 896.
6. 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. 12.02.1993.
7. Spindt C.A. // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. № 6. P. 3504.
8. Морев С.П., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И. // РЭ. 2013. Т. 58. № 4. С. 399.
9. Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Масленников С.П., Морев С.П. // РЭ. 2015. Т. 60. № 9. С. 967.
10. Соколова Т.Н., Конюшин А.В., Сурменко Е.Л. и др. Способ изготовления автоэмиссионного катода. Пат. РФ № 2526240. Оpubл.: офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модель" № 23 от 20.08.2014.
11. Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В. Лекции по сверх-высокочастотной вакуумной микроэлектронике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж", 1996.
12. Morev S., Darmaev A., Komarov D. et al. // Proc. IVEC-2019. Busan. 28 Apr.–01 May. 2019. P. 321.
13. Morev S.P., Darmaev A.N., Muraviev E.K., Sablin V.M. // 7th ITG Int. Vacuum Electronics Workshop (IVEW) 2020 and 13th Int. Vacuum Electron Sources Conf. (IVeSC). May, 2020.
14. Дармаев А.Н., Морев С.П., Муравьев Э.К., Саблин В.М. // Сварочное производство. 2021. № 6. С. 20.