

## Токоперехватывающие сетки из анизотропного пиролиитического графита в электронных пушках с металлопористым катодом

© С.Д. Журавлев, В.И. Шестеркин

АО Научно-производственное предприятие „Алмаз“,  
410033 Саратов, Россия  
e-mail: zhuravlevsd@almaz-rpe.ru

Поступило в Редакцию 8 февраля 2019 г.  
В окончательной редакции 8 февраля 2019 г.  
Принято к публикации 26 февраля 2019 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований применения анизотропного пиролиитического графита (АПГ) в качестве сеточных структур в мощных СВЧ приборах с металлопористым катодом. Представлены эмиссионные характеристики молибдена, гафния и АПГ в диодах и электронных пушках в зависимости от мощности электронного потока, рассеиваемой на испытуемых образцах, и температуры катода. Показано, что сеточные структуры из АПГ способны рассеивать мощность электронного потока до 20 раз больше, чем сетки из молибдена, и до 9 раз больше, чем сетки из гафния, без появления паразитной термоэлектронной эмиссии.

**Ключевые слова:** термоэлектронная эмиссия, металлопористый катод, управляющие сетки, пиролиитический графит.

DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48075.45-19

### Введение

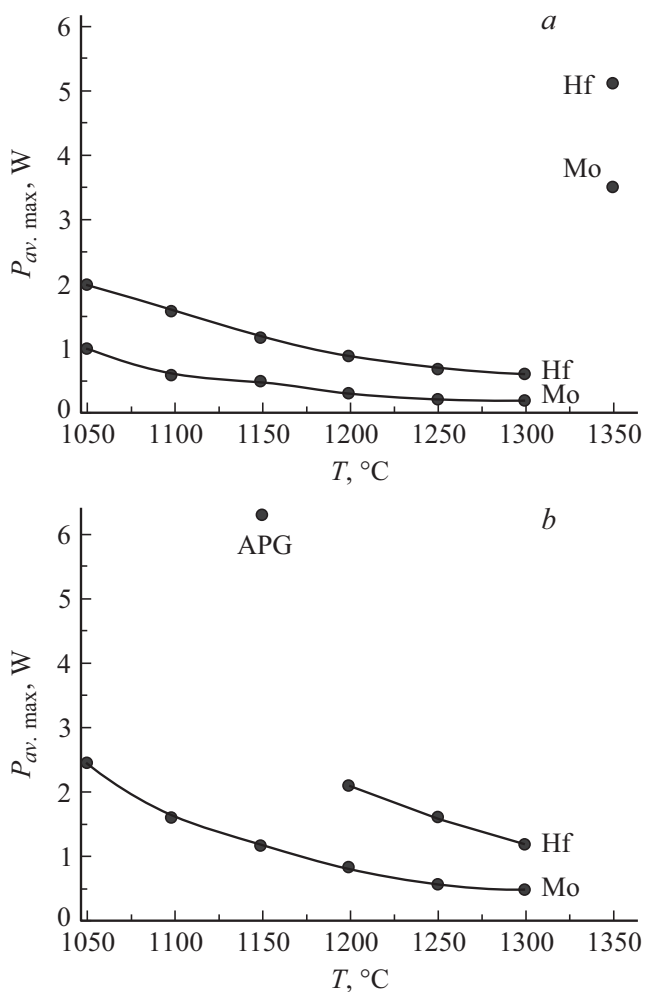
Сеточные структуры используются для низковольтного управления током электронного пучка в импульсных приборах СВЧ диапазона [1,2]. Главным требованием, предъявляемым к приборам данного класса, является отсутствие ВЧ сигнала в паузе между импульсами, который может быть вызван появлением паразитной термоэлектронной эмиссии с сетки в паузах между импульсами вследствие ее чрезмерного нагрева энергией перехваченного электронного потока [3]. В связи с этим к материалу сеточных структур предъявляются жесткие требования по антиэмиссионным свойствам, особенно при работе прибора в режиме малых скважностей (меньше 10). В настоящее время в качестве материала сеточных структур широко используется гафний, обладающий более высокими антиэмиссионными свойствами по сравнению с молибденом [4]. При сравнительно невысокой работе выхода электронов из гафния ( $\sim 3.5\text{ eV}$ ) главным его достоинством является слабая энергия химической связи с барьером, адсорбированным на поверхности сетки. Однако при использовании гафния в качестве материала сеток в мощных СВЧ приборах, работающих в режимах малых скважностей, и тем более в квазинепрерывном режиме, возникают проблемы с потерей сеткой управляющих свойств вследствие чрезмерно высоких токов паразитной термоэлектронной эмиссии. В этой связи выбор материала для сеточных структур остается актуальной задачей для разработчиков мощных СВЧ электровакуумных приборов. Недостатком гафния в качестве материала теневого сетки является его „охрупчивание“ при механическом контакте с поверхностью катода, что ограничивает долго-

вечность катодно-сеточного узла. Одним из перспективных материалов для изготовления сеточных структур является углерод в различных его модификациях. Так, например, сеточные структуры из углеродных волокон и пиролиитического графита используются в генераторных лампах с катодами из торированного вольфрама [5,6]. Литературные данные по использованию анизотропного пиролиитического графита в СВЧ приборах с металлопористым импрегнированным катодом в настоящее время отсутствуют.

Цель настоящей работы — экспериментальные исследования термоэмиссионных свойств сеточных структур из анизотропного пиролиитического графита в электронных пушках с металлопористым импрегнированным катодом и их сравнение с традиционными сеточными структурами из молибдена и гафния.

### Термоэмиссионные характеристики молибдена, гафния и АПГ в вакуумных диодах с металлопористым импрегнированным катодом

Сравнительные исследования термоэмиссионных свойств молибдена, гафния и АПГ проведены в диодах с металлопористым импрегнированным катодом диаметром 6.35 mm с плоской эмитирующей поверхностью и анодами из исследуемых материалов в форме дисков толщиной 0.2 mm и диаметром 12 mm, расположенных на расстоянии 0.15 mm от эмитирующей поверхности катодов. Исследуемые диоды размещались в вакуумной камере с непрерывной откачкой и испытывались при давлении остаточных газов не хуже  $2 \cdot 10^{-7}$  Торр. Измерения



**Рис. 1.** Зависимости предельной средней мощности электронного потока от температуры катода: *a* — непрерывный режим; *b* — импульсный режим:  $\tau = 40 \mu\text{s}$ ;  $Q = 250$ .

проводились в импульсном режиме с длительностью импульса  $\tau = 40 \mu\text{s}$  с максимальной скважностью до  $Q = 250$  и в режиме малых скважностей от  $Q = 10$  до скважности, близкой к единице, — квазинепрерывный режим. При испытаниях диодов в квазинепрерывном режиме в цепи анода были последовательно включены источник постоянного положительного относительно катода напряжения и модулятор отрицательных импульсов. С катода отбирался импульсный ток с длительностью импульса  $(T - \tau)$ , равной паузе между импульсами отрицательного напряжения с модулятора в цепи анода, где  $T$  — период следования импульсов,  $\tau$  — длительность импульса.

Достоверность результатов измерения эмиссионных характеристик материалов обеспечивалась идентичностью конструкций макетов диодов, одинаковой температурой катодов и незначительным отличием вольт-амперных характеристик исследуемых диодов, измеренных в непрерывном режиме при температурах катодов  $1130^\circ\text{C}$ .

В процессе измерений регистрировались ток катода и ток термоэлектронной эмиссии с анодов. В импульсном режиме токи регистрировались с помощью осциллографа по падению напряжения на измерительном сопротивлении  $R = 100 \Omega$ . Предельная средняя мощность электронного потока, рассеиваемая на анодах  $P_{av, \max}$  регистрировалась по уровню импульсного тока термоэлектронной эмиссии с анода  $\sim 1 \text{ mA}$  и рассчитывалась по формуле  $P_{av, \max} = I_a \times U_a$ , где  $I_a$  — средний ток анода с учетом скважности,  $U_a$  — разность потенциалов между катодом и анодом.

Предельные значения средней мощности, рассеиваемые на анодах диодов из молибдена, гафния и АПГ, исследовалась в непрерывном и импульсном режимах при различных температурах катодов (рис. 1).

Для сравнительного анализа термоэмиссионных свойств исследуемых материалов удобнее пользоваться удельной мощностью электронного потока, приводящей к появлению термоэлектронной эмиссии. В непрерывном режиме удельная средняя мощность, рассеиваемая на анодах из молибдена и гафния, при температуре катодов  $1050^\circ\text{C}$  составляла  $\sim 3$  и  $\sim 6.6 \text{ W/cm}^2$  соответственно (рис. 1, *a*). При температуре катода  $1140^\circ\text{C}$  значения предельной удельной мощности уменьшились до  $\sim 1.1$  и  $\sim 3.8 \text{ W/cm}^2$ . Для данной температуры катода в диоде с анодом из АПГ, даже при средней предельной мощности  $\sim 6.3 \text{ W}$  (рис. 1, *b*), что соответствовало удельной средней мощности  $\sim 20 \text{ W/cm}^2$ , ток термоэлектронной эмиссии не был зарегистрирован. Дальнейшее увеличение рассеиваемой на аноде из АПГ мощности электронного потока приводило к ухудшению вакуума и снижению эмиссии катода. После восстановления вакуума эмиссия катода полностью восстановилась.

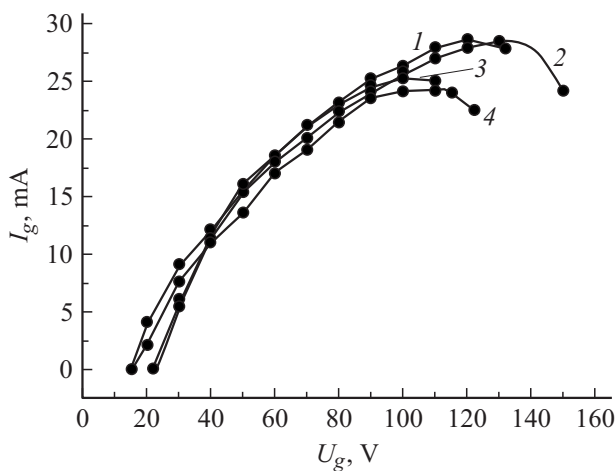
При температуре катода  $1350^\circ\text{C}$  рассеиваемые на анодах из молибдена и гафния удельные мощности электронного потока  $\sim 11$  и  $\sim 16.6 \text{ W/cm}^2$  соответственно (рис. 1, *a*) инициировали лавинообразный рост тока катода и тока термоэлектронной эмиссии с анодов. Данный процесс происходил при неизменном значении разности потенциалов в диодах и был вызван возрастающей со временем мощностью обмена энергиями электронных потоков с катода на анод и обратно (ток термоэлектронной эмиссии с анода), который приводил к возрастанию температур катода и анода. Этот неуправляемый процесс развивался скоротечно (в течение нескольких секунд) и завершался ухудшением вакуума и пробоем, если напряжение анода не уменьшалось до безопасного значения. Аналогичные процессы регистрировались в катодно-сеточном узле мощной импульсной ЛБВ и заканчивались разрушением перемычек теневой сетки.

## Термоэмиссионные процессы в электронной пушке с токоперехватывающей сеткой из АПГ и металлопористым импрегнированным катодом

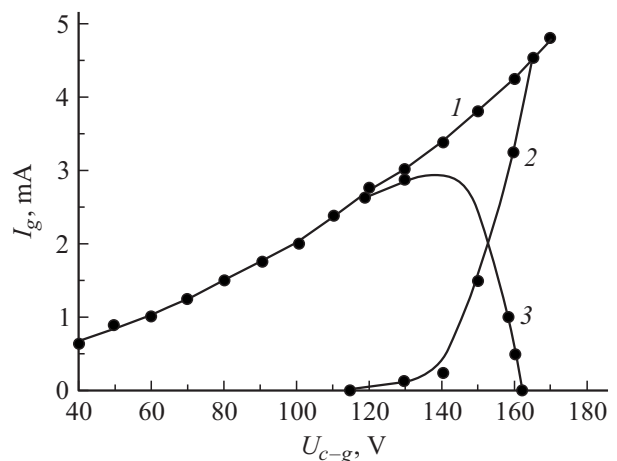
В электронной пушке был использован катод с плоской эмитирующей поверхностью диаметром 6,35 мм и планарной сеточной структурой из АПГ толщиной 120 мкм с квадратными ячейками. Сеточная структура была отделена от поверхности катода вакуумным зазором шириной 150 мкм. При ширине перемычек 80 мкм и шаге 170 мкм геометрическая прозрачность сетки составляла 46%. Отверстия в сеточной структуре были изготовлены методом лазерной абляции [7].

Эмиссионные характеристики сетки из АПГ измерялись при напряжении анода 12 кВ относительно катода в режимах с малой скважностью от  $Q = 10$  до  $Q \rightarrow 1$ . Защита источника питания в цепи сетки не позволяла увеличивать напряжение на сетке более 160 В. Плотность тока с катода не превышала 1,6 А/см<sup>2</sup>. При увеличении напряжения на управляющей сетке крутизна вольт-амперной характеристики уменьшалась вследствие возрастания тока термоэлектронной эмиссии с сетки, а затем изменяла знак (рис. 2). В точках перегиба вольт-амперных характеристик ток перехвата на сетку и ток термоэлектронной эмиссии с нее были равными по величине.

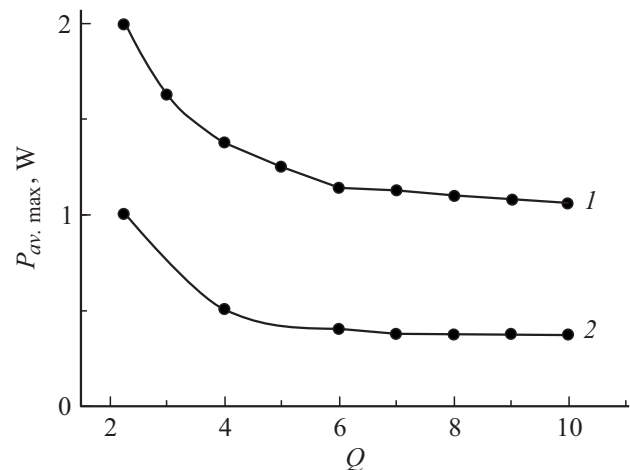
Значения предельной мощности токоперехвата на сетку, определенные по точкам перегиба кривых, существенно превышали значения, соответствующие появлению термоэлектронной эмиссии с сетки. В точках перегиба кривых величина тока термоэлектронной эмиссии с сетки сопоставима с током перехвата сеткой. Для регистрации начала термоэлектронной эмиссии с управляющей сетки в ее цепи была использована мостиковая схема с разнополярно включенными диодами,



**Рис. 2.** Зависимости полного среднего тока в цепи сетки от напряжения на сетке при температуре катода  $T_c = 1065^\circ\text{C}$ : 1 —  $Q = 10$ ; 2 —  $Q = 6$ ; 3 —  $Q = 4$ ; 4 —  $Q = 2.2$ .



**Рис. 3.** Зависимости токов в цепи сетки от разности потенциалов катод–сетка  $U_{c-g}$ : 1 — ток, перехваченный сеткой; 2 — ток термоэлектронной эмиссии с сетки; 3 — результирующий ток в цепи сетки.



**Рис. 4.** Зависимость предельной средней мощности перехвата сеткой от скважности: 1 — по точкам перегиба; 2 — по току термоэлектронной эмиссии 0,1 мА.

позволяющая разделять протекающие в цепи сетки токи и регистрировать ток, перехваченный сеткой по уровню тока термоэлектронной эмиссии с сетки 0,1 мА (рис. 3).

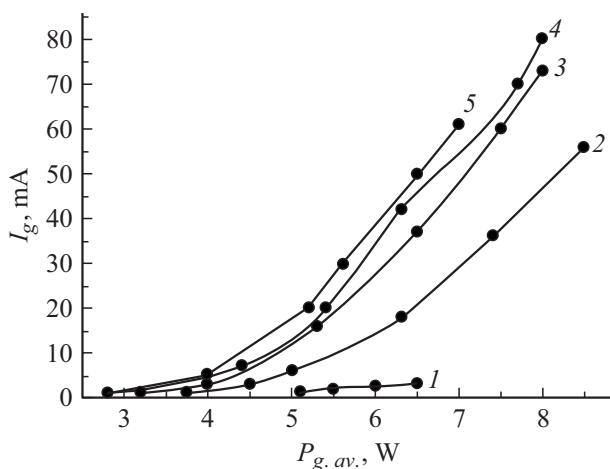
В импульсном режиме термоэмиссионный ток с сетки регистрировался в паузе между импульсами с помощью осциллографа на измерительном сопротивлении  $R = 100 \Omega$  в цепи сетки. Для определения предельной средней мощности токоперехвата на управляющую сетку фиксировалось напряжение на сетке относительно катода, соответствующее термоэмиссионному току сетки 0,1 мА, и ток, перехваченный ею при данном напряжении. Предельная средняя мощность токоперехвата сеткой, соответствующая началу термоэлектронной эмиссии, рассчитанная по точкам перегиба вольт-амперных характеристик (рис. 2), существенно превыша-

ла соответствующие значения, рассчитанные по уровню термоэмиссионного тока с сетки 0.1 мА (рис. 4).

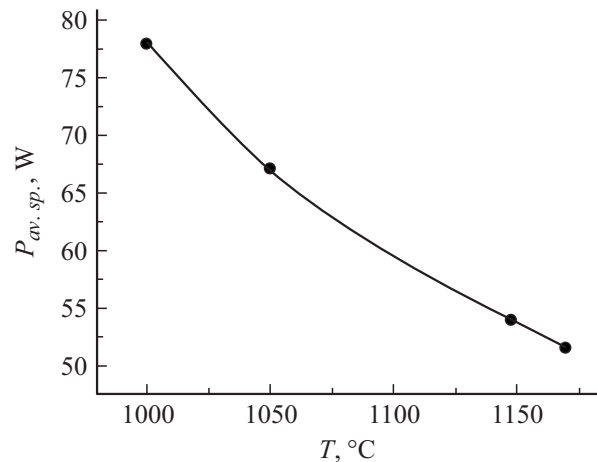
При скважностях  $Q \geq 6$  предельное значение средней мощности практически не изменялось. С увеличением скважности время, соответствующее паузе между соседними импульсами, все больше превосходило время остывания поверхности сетки. При этом ее средняя температура к началу следующего импульса определялась в основном мощностью излучения катода. При значениях скважности  $Q \leq 6$  время остывания сетки приближалось к длительности паузы между импульсами и все более превосходило ее при уменьшении скважности [8]. В этом случае средняя температура сетки возрастала с каждым последующим импульсом и для появления термоэлектронной эмиссии требовалось меньшая по величине средняя мощность, рассеиваемая на сетке. В этих режимах мы вправе были ожидать снижения предельной средней мощности, рассеиваемой на сетке, при уменьшении скважности, а не ее возрастание, зарегистрированное экспериментально (рис. 4 при  $Q \leq 4$ ). Объяснить полученную экспериментальную зависимость можно увеличением эффективной работы выхода поверхности сетки с ростом ее температуры за счет возрастающей десорбции бария. С приближением к непрерывному режиму термоэмиссионный ток определяется исключительно работой выхода непосредственно АПГ, которая составляет  $\sim 4.6$  eV. Предельная мощность токоперехвата при скважности, близкой к единице, сохранялась неизменной.

Данная гипотеза подтвердилась зависимостью тока термоэлектронной эмиссии с сетки из АПГ от средней мощности токоперехвата при различных температурах катода (рис. 5).

При увеличении температуры катода и фиксированной мощности оседания тока на управляющую сетку прирост термоэмиссионного тока замедлялся тем больше, чем



**Рис. 5.** Термоэмиссионный ток сетки из АПГ в зависимости от средней мощности токоперехвата при различной температуре катода,  $T$ : 1 — 1000, 2 — 1050, 3 — 1150, 4 — 1190, 5 — 1240°C.



**Рис. 6.** Зависимость удельной предельно допустимой средней мощности электронного потока на управляющей сетке от температуры катода.

выше температура катода. Величина термоэмиссионного тока определялась температурой сетки и эффективной работой выхода поверхности АПГ, которая возрастала по мере увеличения ее температуры и уменьшением количества адсорбированного на ней бария.

Более удобной величиной, характеризующей предельно допустимую мощность перехвата сеткой, является удельная мощность осаждаемого на сетку электронного потока (рис. 6).

При потенциале управляющей сетки, близком к естественному, электроны осаждались на обращенную к катоду поверхность перемычек сетки. При рабочей температуре металлопористого катода 1050°C и плотности отбираемого с катода тока 5 А/см<sup>2</sup> предельное значение удельной средней мощности для сеток из АПГ составляло  $\sim 67$  Вт/см<sup>2</sup>. Это примерно в 22 раза больше, чем для сеток из молибдена, и почти в 9 раз больше, чем для сеток из гафния.

## Заключение

Экспериментально продемонстрированы преимущества использования анизотропного пиролитического графита в качестве материала сеточных структур для управления током электронного пучка в мощных СВЧ электровакуумных приборах, особенно работающих при малых скважностях. Показано, что по своим антиэмиссионным свойствам и теплорассеивающей способности управляющие сетки из АПГ превосходят сетки из молибдена более чем в 20 раз и в примерно 9 раз превосходят сетки из гафния.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Григорьев Ю.А., Правдин Б.С., Шестеркин В.И. // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. М.: Изд-во ЦНИИ Электроника, 1987. Вып. 7. 71 с.
- [2] Лысова И.К., Кореишкова О.Н. // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. М.: ЦНИИ Электроника, 1976. Вып. 16. № 426. 27 с.
- [3] Шестеркин В.И. // Вопросы проектирования и технологии электровакуумных СВЧ приборов. 1981. Вып. 1. № 164. С. 28–29.
- [4] Бабанов А.Ж., Козлов В.И., Авдеев В.Е., Андреев А.А. // Электронная техника. Сер. Материалы. 1980. Вып. 8. С. 14–17.
- [5] Брусиловский Г.Л. // Электронная техника. Сер.-4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1988. Вып. 2. № 121. С. 3–6.
- [6] Вильдгрубе В.Г., Цертизский Б.Д., Шаронов В.Н. // Электронная техника. Сер. 4. Газоразрядные приборы. 1989. Вып. 2. № 125. С. 43–52.
- [7] Коношин А.В., Соколова Т.Н., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И. // Электронные приборы и устройства СВЧ: Тезисы докладов конференции. 2012. Саратов. С. 70–74.
- [8] Максимов В.Ф., Тиктин С.А. // Межвузовский научный сборник. Техническая электроника и электродинамика. 1976. Вып. 1. С. 52–54