

Термоэлектронная эмиссия с управляющих сеток из гафния и анизотропного пиролитического графита в КСУ мощной импульсной ЛБВ

Р.Ю. Богачев^{1,2}, С.Д. Журавлев¹, Т.М. Крачковская¹, Н.В. Ржевин^{1,2}, Д.А. Тихомиров^{1,2}, В.И. Шестеркин¹

¹АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

²Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: в работе проведен анализ морфологии и химического состава поверхностей сеточных структур из анизотропного пиролитического графита (АПГ) после длительной наработки катодно-сеточного узла (КСУ) в составе мощной импульсной ЛБВ. На обращенных в сторону катода поверхностях теневой и управляющей сеток обнаружена пленка из испарившихся с поверхности катода компонентов активного вещества, толщина которой увеличивалась от центра к периферии сетки. В КСУ с сетками из АПГ паразитный термоэмиссионный ток в цепи катод-управляющая сетка не превышал 100 мкА. Причиной низкой паразитной термоэлектронной эмиссии является низкая температура управляющей сетки из АПГ (менее 700 °С) вследствие высоких значений теплопроводности и коэффициента излучения.

Ключевые слова: катодно-сеточный узел, сеточные электроды, анизотропный пиролитический графит, термоэлектронная эмиссия.

1. Введение

В качестве материала сеточных электродов в КСУ клистронов и мощных импульсных ЛБВ промышленно применяется гафний благодаря его более высоким антиэмиссионным свойствам по сравнению с молибденом и платиной. Однако температура начала рекристаллизации гафния 950 – 1100 °С близка к рабочей температуре управляющей сетки в КСУ, что приводит к потере её формоустойчивости и механическому разрушению [1].

Адсорбированные на управляющую сетку Ва и ВаО с катода снижают работу выхода электронов её поверхности и увеличивают паразитный ток термоэлектронной эмиссии (ТЭЭ) выше допустимого значения, а сетка теряет свои управляющие током свойства [2].

Более высокими, по сравнению с гафнием, антиэмиссионными свойствами обладают сеточные структуры из углеродных материалов или традиционно используемых металлов (Нf, Мо и др.) с углеродными покрытиями [3 – 5]. Механизм подавления термоэлектронной эмиссии с сетки заключается в испарении бария при температуре сетки более 780 °С и диссоциации оксида бария на Ва-О. При этом углерод удаляется из пленки в результате реакции с кислородом до образования СО, ограничивая время жизни углеродной пленки [4].

В [6] в качестве материала для теневой сетки многолучевого клистрона применен анизотропный пиролитический графит с высокими антиэмиссионными свойствами при температурах 900÷1000 °С и не оказывающего отрицательного влияния на эмиссионные характеристики катода. В [7, 8] представлены результаты изготовления КСУ с сетками из АПГ с применением технологий лазерной абляции для крепления и прошивки двойных сеточных структур для мощной импульсной ЛБВ.

Цель работы заключается в анализе термоэмиссионных токов в КСУ с сетками из гафния и АПГ.

2. Экспериментальные результаты

В мощных импульсных ЛБВ с КСУ с сетками из гафния токи в цепи катод-управляющая сетка в процессе динамических испытаний при скважностях от 40 до 4 регистрировались паразитные токи термоэлектронной эмиссии (ТЭЭ) от сотен микроампер до единиц миллиампер. Допустимое значение тока ТЭЭ для данного прибора составляло 0,75 мА. Яркостная температура управляющей сетки из гафния составляла ~ 850 °С при температуре катода $1060 \div 1080$ °С. Плотность тока ТЭЭ с сетки с работой выхода чистого гафния 3,53 эВ, определённая по формуле Ричардсона - Дэшмана, составляет $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ А/см², а величина тока ТЭЭ пренебрежимо мала – 0,03 мкА. Регистрируемый в приборах ток ТЭЭ с управляющей сетки из гафния (при отсутствии омических утечек по разделяющему катод и сетку изолятору) до нескольких миллиампер может быть связан со снижением работы выхода электронов при адсорбции на сетку Ва и ВаО.

В свою очередь, на двух приборах с сетками из АПГ даже при повышенной до 1150 °С во время динамических испытаний температуре катода при скважностях 10 и 4 в течение 900 часов и 400 часов значения термоэмиссионного тока в цепи катод-управляющая сетка остались неизменным и составили 0,01 мА для первого и 0,05 мА для второго прибора.

На рисунке 1 представлена фотография обращенной в сторону катода поверхности управляющей сетки из АПГ после наработки 900 часов в ЛБВ при температуре катода 1150 °С.

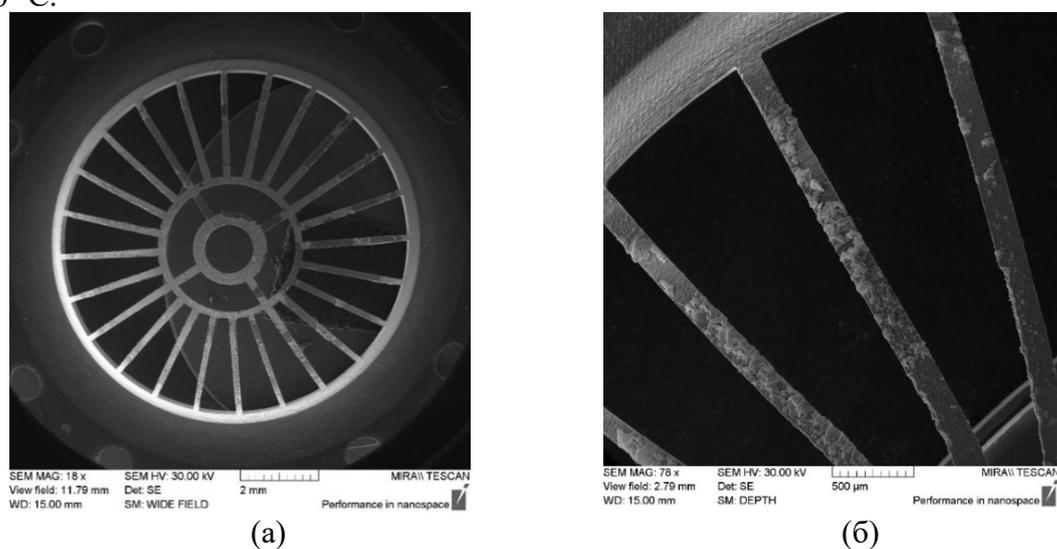


Рисунок 1. Поверхность управляющей сетки, обращенной к катоду (а) общий вид, (б) периферийная часть.

Поверхность перемычек сетки покрыта рыхлой пленкой адсорбированного активного вещества, испарившегося с поверхности МПК. Толщина пленки возрастает от центра сетки к её периферии. В некоторых местах под действием пондеромоторных сил электростатического поля она отделилась. Химический состав пленки, выполненный методом рентгеноструктурного анализа, в основном представлен Ва (до 60 % масс.) и О (до 40 % масс.).

На поверхности управляющей сетки из гафния со стороны катода после 35 часов динамических испытаний при температуре катода 1150 °С количество адсорбированных Ва и О нарастало от центральной части к периферии сетки до 9 %

масс. и 11 % масс. соответственно [9]. По радиусу сетки структура пленки изменялась от плотно упакованной в центральной части сетки до рыхлой за пределами перемычек. Измерениями с помощью пирометра установлено, что температура сетки от её центральной части к периферии снижалась от 860 °С до 760 °С, что могло быть причиной изменения структуры пленки. С помощью рентгеноструктурного анализа не представлялось возможным отличить Ва от ВаО вследствие близости пиков рентгеновского излучения. Судить о наличии ВаО можно было по регистрации пиков атомарного кислорода [2, 3].

На рисунке 2 представлена динамика развития термоэмиссионных токов (ТЭэ) во времени с управляющих сеток из гафния и АПГ в составе КСУ при рабочей (~1080 °С) и повышенной (~1150 °С) температурах катода.

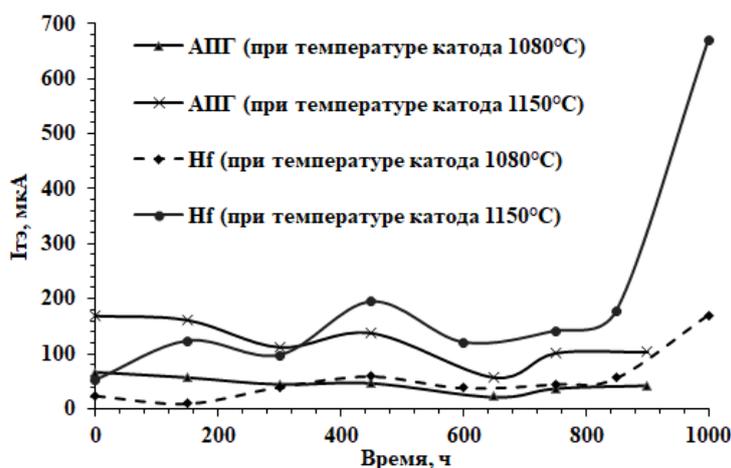


Рисунок 2. Динамика развития термоэмиссионного тока в КСУ с сетками из гафния и АПГ.

В течение 900 часов при температуре катода 1080 °С токи ТЭэ с сеток из Нf и АПГ близки и не превышали 50 мкА, что на 1,5 порядка меньше допустимого в приборе значения 0,75 мА. При повышенной температуре катода токи возросли примерно в два раза. Плотности тока термоэлектронной эмиссии с сеток из чистого Нf и АПГ (без напыления Ва и ВаО) при температуре 760 °С с работой выхода электронов для гафния 3,5 эВ и АПГ 4,7 эВ по Ричардсону-Дэшману составляли $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ и $\sim 1 \cdot 10^{-14}$ А/см² соответственно. Для температуры сеток 860 °С плотности тока составляли $4 \cdot 10^{-8}$ и $2 \cdot 10^{-13}$ А/см² соответственно. Ток ТЭэ с Нf и АПГ при рабочих температурах сеток пренебрежимо малы. Следовательно, работа выхода электронов поверхностей обеих сеток значительно снизилась в результате адсорбции Ва и ВаО. Оценка плотности тока по Ричардсону-Дэшману для работы выхода 2,5 эВ (соответствует работе выхода атомарного бария) дает значение плотности тока $3 \cdot 10^{-4}$ А/см², что соответствует току термоэлектронной эмиссии с управляющей сетки 0,2 мА. Примерно такой ток на рисунке 2 при температуре сетки из гафния 860 °С зарегистрирован после 1000 часов непрерывной работы катода при рабочей температуре. Резкое возрастание тока ТЭэ с сетки из Нf наблюдалось после 900 часов работы КСУ.

Из приведенных результатов следует, что ток ТЭэ с сетки определяется преимущественно адсорбированным атомарным барием. Молекулярно-динамическое моделирование [10] показало, что при температурах 800÷900 °С по мере осаждения атомарного бария на сетку из Нf, первые три слоя проникают в кристаллическую решетку Ва и увеличивают работу выхода поверхности до 4,2 эВ, после чего на поверхности Нf формируется кристаллическая решетка из Ва, в которую диффундируют атомы Нf до шестого слоя, увеличивая работу выхода до 4,9 эВ. По

мере увеличения количества слоев Ва работа выхода снижается и после 25-го слоя работа выхода стабилизируется на уровне работы выхода кристаллической решетки Ва $\sim 3,8$ эВ. Энергия связи Ва на кристаллической решетке бария ~ 1 эВ и температуры в $800\div 900$ °С недостаточно для десорбции бария.

В процессе динамических испытаний приборов с сетками из гафния ток ТЭЭ со временем возрастал. Снижение ТЭЭ достигалось в процессе принудительного нагрева управляющей сетки мощностью электронного пучка до 8 Вт в течение 45 минут. Температура сетки возрастала до 1200 °С в центральной части сетки и до 1140 °С на её периферии. Ток ТЭЭ после принудительного прогрева сетки снижался до десятков микроампер за счет увеличения работы выхода поверхности. Данный результат связан с удалением слоев Ва. Согласно указанным расчетам, работа выхода электронов пленки толщиной в 3 – 8 слоев бария возрастала до 3,8 – 4,9 эВ [10].

Влияние ВаО на ток ТЭЭ с сетки оценить не представлялось возможным вследствие большого разброса приводимых в литературе значений работы выхода от 1,0 эВ до 2,3 эВ и неопределенности его процентного содержания на сетке. Оценка ТЭЭ по формуле Ричардсона-Дэшмана для указанного диапазона работы выхода ВаО при рабочей температуре управляющей сетки приведена в таблице 1.

Таблица 1. Значения плотности тока ТЭЭ и тока сетки от работы выхода

ϕ , эВ	1,0	1,2	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2
J , А/см ²	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2$	13	1,4	0,5	0,06	$6,4 \cdot 10^{-3}$
I , А	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^2$	8,6	0,9	0,33	0,04	$4 \cdot 10^{-3}$

По результатам приведенных в таблице 1 значений тока и основываясь на результатах измеренных токов с сетки, можно сделать вывод, что работа выхода ВаО составляет 2,2 – 2,3 эВ. Учитывая, что процентное соотношение испарившегося Ва и ВаО составляет 90:9 [2] с большой долей вероятности можно считать, что основной вклад в ТЭЭ вносит именно Ва.

Измерить яркостную температуру управляющей сетки из АПГ при рабочей температуре катода с помощью яркостного пирометра Keller Mikro PV 11 с исчезающей нитью накала не удалось. Можно лишь сказать, что её температура ниже 700 °С вследствие высокой теплопроводности АПГ (на уровне теплопроводности меди и в 17 раз выше, чем у гафния) и большого коэффициента излучения 0,85. При такой температуре и работе выхода атомарного бария 2,5 эВ плотность тока ТЭЭ составляет ~ 10 мкА/см². Следовательно, низкое значение тока ТЭЭ с сетки из АПГ связано с её низкой рабочей температурой.

Низкая яркостная температура сетки ($T_{\text{ярк}}$) из АПГ по сравнению с сеткой из Hf подтверждена экспериментом по рассеиванию мощности электронного пучка (Р) на обеих сетках (рисунке 3).

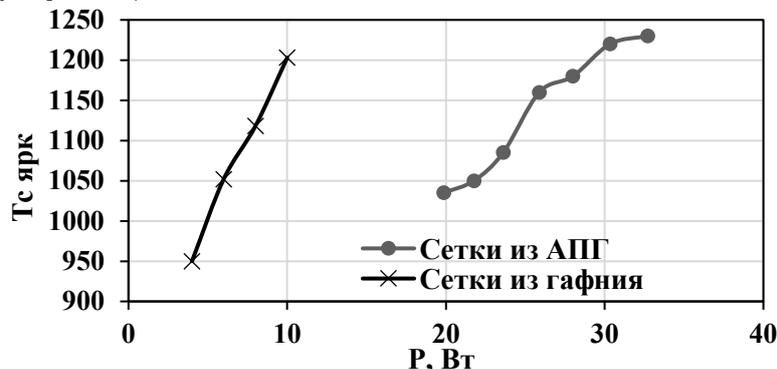


Рисунок 3. График зависимости температуры управляющей сетки из гафния и АПГ от мощности, выделяемой на сетке.

Для достижения температуры 1200 °С на сетке из АПГ необходимо рассеять мощность электронного пучка примерно в 3 раза больше, чем на сетке из гафния.

3. Заключение

Полученные результаты экспериментальных исследований показали перспективность применения сеточных структур из АПГ в КСУ для мощных импульсных ЛБВ. Ток термоэлектронной эмиссии с управляющей сетки из Hf связан с адсорбцией на её поверхность пленки из Ва - ВаО и высокой, но недостаточной для её десорбции, температурой. Низкие термоэмиссионные свойства управляющей сетки из АПГ с адсорбированной пленкой Ва - ВаО связаны с недостаточной для термоэлектронной эмиссии температурой вследствие высоких значений теплопроводности и коэффициента излучения.

Список литературы

1. I. P. Melnikova, A. V. Lyasnikova, S. V. Maltseva. A new anti-emission material for manufacturing of cathode-mesh electrodes/ Letters on materials. 2017. - V.7. - №3. - P. 218-221.
2. J. Jiang, B. Jiang, C. Ren, T. Feng, Xi Wang, X. Liu, and Sh. Zou. Anti-emission characteristics of the grid coated with hafnium film / J. Vac. Sci. Tech. A. 2005. - 23. - P. 506-512.
3. Jun Jiang, Bingyao Jiang, Congxin Ren, Fumin Zhang, Tao Feng, Xi Wang, Grid emission suppression characteristics of molybdenum grids coated with Hf and Pt films / Vacuum. 2006. -80.- P. 537-541.
4. X. Liu, C.Ren, B. Jiang, H. Zhu, Y. Liu, J. Wu. Electron emission suppression characteristics of molybdenum grids coated with carbon film by ion beam assisted deposition / J. Vac. Sci. Tech. A 2002. - 20 (6). - P. 1846-1849.
5. A. Shih, C.R.K. Marrian and G.A. Naas. Study of pyrolytic carbon films for non-emitting grid applications / Applied Surface Science. 1985. - V. 24. - P. 475-487.
6. В.И. Шестеркин, Т.М. Крачковская, П.Д. Шалаев, Л.Т. Баймагамбетова, С.Д. Журавлев, Д.И. Кириченко, Р.Ю. Богачев. Углеродные материалы в теплонагруженных узлах ЛБВ и клистронов / Радиотехника и электроника. 2022. – Т.67. – Вып.10. - С. 1-9.
7. Богачев Р.Ю., Дёмин В.В., Журавлев С.Д., Крачковская Т.М., Ржевин Н.В., Шестеркин В.И. Электронная пушка мощной импульсной ЛБВ с двойными сетками из анизотропного пиролитического графита // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. Санкт-Петербург. 27 - 31 мая 2024 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». с. 131-135.
8. Богачев Р.Ю. и др. Катодно-сеточные узлы для мощных импульсных ЭВП СВЧ с сетками из анизотропного пиролитического графита / Р.Ю. Богачев, Д.А. Бессонов, С.Д. Журавлев, Т.М. Крачковская, В.И. Шестеркин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. - 2024. - Вып. 3 (563) – С. 64-73.
9. Крачковская Т.М. и др. Физико-химический анализ миграции активного вещества металлопористого катода на электроды катодно-сеточного узла импульсной ЛБВ / Крачковская Т.М., Богачев Р.Ю., Емельянов А.С., Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. // Тезисы докладов юб. науч.-техн. конф. АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-электроника 2023», г. Фрязино, 25-26 мая 2023, с.65.
10. Глухова О.Е. и др. Влияние адсорбции бария на работу выхода гафниевых сеток катодно-сеточного узла / О.Е. Глухова, Д.А. Колосов, В.И. Шестеркин, Т.М. Крачковская, С.Д. Журавлев, Р.Ю. Богачев // ЖТФ. – 2024. - Т.94. - Вып. 10. - С. 1747-1755.