

# Электронная пушка мощной импульсной ЛБВ с двойными сетками из анизотропного пиролитического графита

Р.Ю. Богачев<sup>1,2</sup>, В.В. Дёмин<sup>1</sup>, С.Д. Журавлев<sup>1</sup>, Т.М. Крачковская<sup>1</sup>, Н.В. Ржевин<sup>1,3</sup>,  
В.И. Шестеркин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Алмаз»

<sup>2</sup>СГТУ им. Ю.А. Гагарина

<sup>3</sup>СГУ им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация.** Приведены результаты исследований токов в цепи управляющей сетки из гафния и анизотропного пиролитического графита (АПГ) в электронной пушке мощной импульсной ЛБВ. Показано, что замена сеточных структур из гафния на сетки из АПГ позволила устранить сеточные токи в цепи управляющей сетки в экстремальных режимах её работы при температуре катода до 1150°C и скважности 4, что позволит повысить надежность и долговечность работы мощных импульсных электровакуумных приборов.

**Ключевые слова:** сеточные структуры, гафний, анизотропный пиролитический графит, импульсные ЛБВ.

## 1. Введение

Расположенные вблизи эмитирующей поверхности термоэмиссионного катода сеточные структуры позволяют управлять током электронного пучка, а, следовательно, и мощностью выходного сигнала импульсной ЛБВ напряжением, не превышающим единиц процентов от напряжения анода [1]. Низкие значения напряжения отсечки (напряжение запирающего) и рабочего (напряжение превышения) на управляющей сетке обеспечивают формирование импульсов выходного сигнала с длительностями фронтов нарастания и спада до 100 нс.

Как правило, улучшение какого-либо эксплуатационного параметра в электровакуумном приборе (ЭВП) влечет за собой ухудшение другого параметра, либо появление нежелательных физических процессов. В электронной пушке (ЭП) ЛБВ наличие управляющей сетки, стоящей поперек электронного пучка, может привести к недопустимому по величине току в цепи сетки, состоящего из тока прямого перехвата электронов с катода и тока термоэлектронной эмиссии с сетки. Ток прямого перехвата можно практически полностью устранить экранировкой перемычек управляющей сетки перемычками теневой сетки, расположенной между катодом и управляющей сеткой.

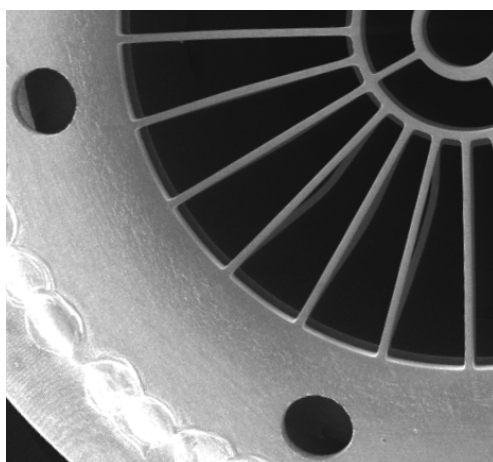
Паразитный термоэмиссионный ток с сетки может быть уменьшен выбором материала с большим значением работы выхода электронов и химической инертностью, т.е. способностью материала десорбировать атомы и молекулы активного вещества, испарившегося с поверхности МПК, и сохранять поверхность сетки чистой от адатомов с работой выхода непосредственно материала сеточного электрода.

Традиционно в ЭП мощных импульсных ЛБВ в качестве материала сеточных структур применяется листовая гафний, химическая инертность которого связана с наличием на его поверхности тонкой пассивной пленки из оксидов, которая при комнатной температуре препятствует взаимодействию с атмосферными газами. При нагревании выше 700 °C пленка разрушается, а его химическая активность возрастает, гафний быстро окисляется и, подобно цирконию, взаимодействует с азотом и

водородом [2].

По температуре плавления и работе выхода электронов - 3,53 эВ, гафний существенно уступает молибдену, работа выхода которого составляет 4,5 эВ. Однако, его выбор в качестве материала сеток обоснован тем, что в парах продуктов испарения МПК при температуре 800 °С ток термоэлектронной эмиссии с сеток из гафния примерно в 28 раз меньше, чем ток термоэлектронной эмиссии с сеток из молибдена [3].

Гафний тугоплавкий, пластичный материал с гексагональной кристаллической решеткой и металлическими связями атомов, которые обеспечивают значительные смещения атомов при деформации без разрушения связей. Высокая пластичность гафния позволяет легко формовать из пластин детали произвольной формы и размеров. Однако, малое значение модуля Юнга ( $1,4 \times 10^5$  МПа) и анизотропия коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) по различным направлениям листа, способствует деформации радиальных перемычек теневой сетки при их рабочей температуре до 880 °С (при температуре катода 1145 °С) (рисунок 1). Это приводит к нарушению геометрической экранировки перемычек управляющей сетки и возрастанию тока прямого перехвата. Деформации перемычек сеток способствует также рекристаллизация гафния, которая наступает при температуре ~760 °С. В процессе рекристаллизации происходит перестройка кристаллической решетки, уменьшение прочности и твердости, возрастанию пластичности [2], что дополнительно способствует деформации перемычек сеток.



**Рисунок 1.** Фотография сегмента КСУ.

Двойные сеточные структуры из гафния «прошиваются» в катододержателе с закрепленными чашками, электрически отделенными керамическим изолятором из керамики марки ВК94-2, методом электроискровой обработки в очищенном керосине одним электродом-инструментом. Продукты эрозии, взвешенные в керосине в процессе прошивки, могут достигать поверхности керамики, адсорбироваться на поверхности и в её порах и являться одной из причин омических утечек между катодом и управляющей сеткой в рабочем режиме прибора.

Исходя из вышесказанного, по ряду причин, таких как, качество исходного гафния, сложность технологии изготовления из него сеточных структур и экстремальные режимы работы сеточных электродов в процессе технологического цикла изготовления мощных ЛБВ, полностью устранить возникновение паразитной термоэмиссии с управляющей сетки не удастся. В этой связи, актуальной задачей является поиск альтернативного материала для изготовления сеточных электродов, обладающего высоким значением работы выхода, химической инертностью, стабильными механическими свойствами в условиях высоких температур и не

оказывающего отрицательного влияния на эмиссионные характеристики МПК.

В работе [4] в катодно-сеточном узле (КСУ) 400-ваттного клистрона в качестве материала теневой сетки предложен анизотропный пиролитический графит (АПГ), подтвердивший его высокие антиэмиссионные свойства по сравнению с гафнием. Поэтому целью работы является исследование характеристик ЭП мощной импульсной ЛБВ с двойными сеточными электродами, выполненными из АПГ.

## 2. Сеточные структуры из анизотропного пиролитического графита

Анизотропный пиролитический графит представляет собой беспористый, практически моноэлементный материал с содержанием углерода 99,99 %. Детали из АПГ получают методом пиролитического осаждения атомов углерода на разогретые до высокой температуры подложки (как правило из графита марки МПГ6) путем диссоциации углеродсодержащих газов (метан, гептан) при температуре 2000÷2500 °С. АПГ обладает ярко выраженной анизотропией основных тепловых и электрических свойств в направлении плоскости осаждения слоев и поперек к ним, а также по КТЛР и прочности. Так в плоскости осаждения слоев коэффициент теплопроводности превышает коэффициент теплопроводности меди, а в перпендикулярном направлении к слоям соответствует показателю лучших теплоизоляционных материалов. КТЛР в направлении слоев более, чем на порядок превосходит данный параметр поперек слоев. Прочность АПГ возрастает с увеличением температуры. При температуре 2500 °С она превышает прочность всех известных материалов. Температура сублимации близка к 3000 °С, работа выхода электронов составляет 4.6÷4.7 эВ [5].

Форма и размеры подложки для осаждения АПГ определяют форму и размеры получаемых деталей и не требуют дополнительной механической обработки. При формировании отверстий в деталях из АПГ, например, для прошивки заготовок (чашек) сеточных структур, традиционно применяемые для данных целей фотолитография и электроискровая обработка не пригодны.

Прочные межатомные связи в гексагональной кристаллической решетке в плоскости слоев определяют химическую инертность АПГ. Это затрудняет использование пайки для крепления деталей из АПГ с металлами из-за слабой адгезии металлизационных покрытий.

Вследствие отсутствия технологий прошивки и крепления сеточные структуры из АПГ до сегодняшнего времени не нашли своего применения в конструкциях КСУ промышленно выпускаемых приборов. В АО «НПП «Алмаз» данные технологии разработаны с применением лазерной абляции [6], созданы КСУ и электронные пушки с сетками из АПГ для мощных импульсных ЛБВ. Применение лазерной абляции при совместной прошивке двойных сеточных структур позволило избавиться от загрязнения поверхности разделяющего катода и управляющую сетку керамического изолятора, за счет исключения из технологического процесса погружения катододержателя с сетками в керосин, что позволило устранить омические утечки по керамике, не связанные с напылением с катода. Прошивка сеток методом лазерной абляции обеспечила формирование перемычек теневой сетки с шириной, обеспечивающей надежную экранировку перемычек управляющей сетки от прямого перехвата тока катода. Химическая инертность позволяет сохранять баланс адсорбции и десорбции активного вещества на поверхности сеток и обеспечить работу выхода электронов, присущую АПГ.

Таким образом, использование в качестве материала сеток АПГ позволяет рассчитывать на полное отсутствие или значительную минимизацию паразитных токов, протекающих в цепи управляющей сетки: тока утечки по керамике, тока прямого перехвата, тока термоэлектронной и автоэлектронной эмиссии с сеток.

### 3. Сравнение сеточных токов в электронных пушках с сетками из гафния и АПГ

Анализ токов в цепи управляющей сетки из гафния был проведен на ЭП в составе мощной импульсной ЛБВ. Параметры ЭП представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры электронный пушки

Диаметр цилиндрической части катода	10 мм
Ток катода	4 А
Рабочая температура катода	1055±1080°С
Напряжение запирающей сетки	-320 В
Напряжение превышения сетки	+750 В
Напряжение анода	21000 - 22000 В.
Минимальная скважность	4

Ввиду сложности и многообразия технологических операций при изготовлении ЛБВ не всегда представляется возможным обеспечить удовлетворяющие техническим условиям параметры, такие как, омические утечки по разделяющему катод и управляющую сетку изолятору в КСУ, и термоэмиссионный ток с управляющей сетки. Разброс омических утечек в отдельных ЛБВ составлял от 213 кОм до 40 МОм, а токи термоэлектронной эмиссии на некоторых приборах превышали допустимое значение 0.75 мА. Как правило, в процессе тренировки высоким напряжением промежутка управляющая сетка – катод при холодном катоде удавалось полностью ликвидировать омические утечки. В процессе предварительных динамических испытаний (ДИ), штатный цикл которых составляет 35 часов, на некоторых приборах сеточные токи развивались и превышали допустимые значения, разброс которых составил от сотен мкА до единиц мА.

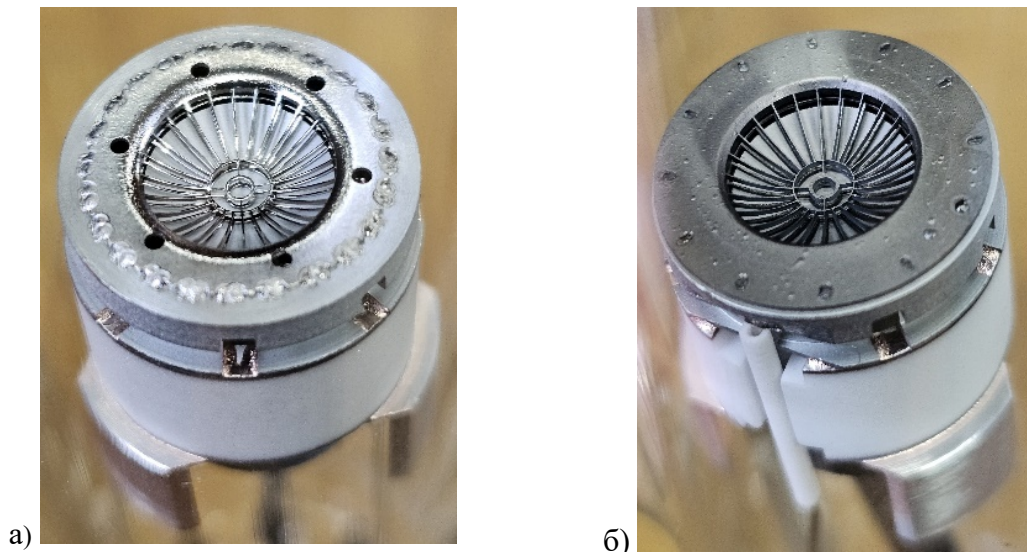
Соотношения ширины перемычек теневой и управляющих сеток, выбранные на этапе проектирования, обеспечивали отсутствие прямого перехвата тока электронного пучка перемычками управляющей сетки. Ток термоэлектронной эмиссии устранялся или уменьшался десорбцией активного вещества путем обработки перемычек управляющей сетки электронным пучком мощностью до 14 Вт. На некоторых приборах ток термоэлектронной эмиссии снова возвращался к прежним значениям в течение нескольких часов, вследствие непрекращающегося испарения активного вещества с поверхности катода и его адсорбции на перемычки управляющей сетки. В других приборах термоэмиссионный ток существенно уменьшался и не развивался в течение дополнительных ДИ. Анализ поверхности управляющих сеток на сканирующем электронном микроскопе подтвердил наличие напыления активного вещества на обращенной к катоду поверхности перемычек управляющей сетки. Толщина адсорбированной пленки возрастала от центра сетки к её периферии. За пределами перемычек толщина пленки имела максимальное значение, поскольку данная область находится за пределами воздействия электронного пучка в процессе очистки сетки.

Были изготовлены и исследованы 3 КСУ с сетками из АПГ (рисунок 2) и макет диода с анодом из АПГ.

В составе диода и КСУ было подтверждено отсутствие отравляющего воздействия на эмиссию МПК. Один и тот же катод был смонтирован сначала в диод с молибденовым анодом типовой конструкции, а потом с анодом из АПГ. Для обоих макетов была проведена оценка эмиссионной способности катода, путем снятия недокальных характеристик, которые совпали в рамках погрешности 3% и удовлетворяют параметрам серийной технологии.

Также один КСУ с сетками из АПГ был испытан в форсированном режиме непрерывного горения при температуре катода 1150 °С в течение 100 ч, ухудшения

эмиссионной способности не отмечено.



**Рисунок 2.** Общий вид КСУ с сетками: а) из гафния; б) из АПГ

Два КСУ в составе ЭП были испытаны в макетах мощной импульсной ЛБВ при скважностях от 100 до 4 в течение более 400 часов. В экстремальных режимах для сеток: при температуре катода 1150 °С и минимальной скважности 4, паразитные токи в цепи управляющей сетки за время исследований не зарегистрированы. Кроме того, макеты ЛБВ успешно прошли испытания на виброустойчивость по режимам для промышленно выпускаемых приборов.

Полученные результаты, подтверждает перспективность использования АПГ в качестве материала сеточных структур для мощных ЭВП СВЧ.

#### 4. Заключение

Сеточные структуры из АПГ, размещенные вблизи эмитирующей поверхности МПК, позволили разработать электронную пушку для мощной импульсной ЛБВ с близким к нулю паразитным током в цепи управляющей сетки, что повысит надежность и долговечность мощных импульсных электровакуумных приборов.

#### Список литературы

1. Григорьев Ю.А., Правдин Б.С., Шестеркин В.И. Электронно-оптические системы с сеточным управлением // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. Вып. 7(1246). М.: Изд-во ЦНИИ Электроника. 71 с.
2. Шахно И.В., Шевцова З.Н., Федоров П.Н., Коровин С.С. Химия и технология редких и рассеянных элементов // Учебное пособие для вузов. ч. II. Под. Ред. К.А. Большакова. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: «Высшая школа». 1976. 360 с
3. Бабанов Ж.Н., Козлов В.И., Авдеев В.Е., Андреев А.А. К вопросу о подавлении термоэлектронной эмиссии с сеток электровакуумных приборов // Электронная техника. Сер. Материалы. 1980. Вып. 8. С. 14 – 17.
4. Шестеркин В.И. и др. Углеродные материалы в теплонагруженных узлах ЛБВ и клистронов / В.И. Шестеркин, Т.М. Крачковская, П.Д. Шалаев, Л.Т. Баймагамбетова, С.Д. Журавлев, Д.И. Кириченко, Р.Ю. Богачев // Радиотехника и электроника №10-2022. С.1-9.
5. Фиалков А.С., Бавер А.И., Сидоров Н.М., Чайкун М.И., Рабинович С.М. ПИРОГРАФИТ получение, структура, свойства // Успехи химии. 1965. Т. XXXIV. Вып. 1. 153 с.
6. Богачев Р.Ю., Бессонов Д.А., Журавлев С.Д., Крачковская Т.М., Соколова Т.Н., Шестеркин В.И. Способ неразъемного соединения деталей из углеродосодержащих материалов с деталями из металлов методом лазерного заклёпывания. Заявка на изобретение № 2024105105 от 27.02.2024.