

На правах рукописи



Журавлев Сергей Дмитриевич

**КАТОДНО-СЕТОЧНЫЕ УЗЛЫ С СЕТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ИЗ
АНИЗОТРОПНОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА ДЛЯ МОЩНЫХ
ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Научный руководитель: *Шестеркин Василий Иванович*, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела 112 НПЦ «Электронные системы» АО «НПП «Алмаз»

Официальные оппоненты: *Масленников Сергей Павлович*, доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная ядерная физика» НИЯУ МИФИ, г. Москва

Ли Илларион Павлович кандидат технических наук, директор ТЦ «Базовые технологии ЭВП» АО «Плутон»

Ведущая организация: Саратовский филиал Института радиотехники и электроники (СФ ИРЭ) им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов

Защита состоится «27» апреля 2021 года в 11:30 на заседании диссертационного совета Д 212.211.03. в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на официальном сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.03 д.ф.-м.н., доцент



В.Г. Литвинов

Актуальность темы

Импульсные электровакуумные сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы, такие как лампы бегущей волны (ЛБВ) и клистроны, до настоящего времени являются перспективными и востребованными в радиоэлектронной аппаратуре для навигации, радиолокации, радиопротиводействия и наведения целей. Долговечность и надежность данных приборов в значительной степени определяются конструкцией катодно-сеточных узлов (КСУ) и материалом сеточных электродов. Управление током электронного пучка в приборах данного класса осуществляется потенциалом близко расположенной к эмитирующей поверхности катода сеточной структуры. В КСУ приборов сантиметрового диапазона длин волн с выходной средней мощностью более 50÷70 Вт применяют теньевую сетку, перемычки которой экранируют перемычки управляющей сетки от перехвата тока с катода, предотвращают ее нагрев до температуры, при которой появляется нежелательный ток термоэмиссионной эмиссии с сетки, либо происходит расплавление её перемычек. Для уменьшения паразитной термоэлектронной эмиссии и предотвращения расплавления сеток их изготавливают из тугоплавких материалов с высоким значением работы выхода электронов. Однако с течением времени на поверхности обеих сеток адсорбируется пленка активного вещества металлопористого катода – Ва и ВаО с низким значением работы выхода, что приводит к появлению паразитной термоэлектронной эмиссии при более низкой температуре сеток. В этой связи при выборе материала сеточных структур для приборов с выходной мощностью несколько киловатт предпочтение отдается не материалам с высокой температурой плавления и большим значением работы выхода, а химически инертным материалам, не образующих прочных химических связей с Ва и ВаО, например, гафнию (Hf). Однако, существенным недостатком гафния является снижение его механической прочности («охрупчивание») при контакте теньевой сетки с разогретой до температуры 1080°С ÷1200°С поверхностью импрегнированного катода¹, что может привести к ее разрушению при воздействии пондеромоторных и вибрационных нагрузках с большим ускорением. Для устранения этого недостатка теньевую сетку из гафния располагают на расстоянии 50÷70 мкм от поверхности катода, что приводит к увеличению разброса углов наклона траекторий электронов и снижению токопрохождения на коллектор. Кроме того, перемычки теньевой сетки уменьшают напряженность электрического поля, созданную потенциалом управляющей сетки, вблизи поверхности катода по периметру перемычек и уменьшают площадь эмитирующей поверхности катода². Для приборов с выходной мощностью в несколько киловатт даже незначительное локальное оседание тока на перемычки управляющей сетки приводит к их расплавлению. Прежде всего расплавляются перемычки теньевой сетки, которые имеют температуру, близкую к температуре катода. В связи с этим для изготовления сеточных структур необходимо использовать материалы, обладающие высокой температурой плавления, большой работой выхода и химической инертностью одновременно.

Таковыми свойствами обладают материалы на основе углерода в различных его модификациях: различные марки графитов, пиролитический графит (изотропный и анизотропный), углеродные волокна и т.д. Температура плавления данных материалов близка к 4400°С, а работа выхода электронов 4.6÷4.7 эВ. Пиролитический графит и

¹ Мельникова И.П., Муллин В.В., Усанов Д.А. Пути повышения долговечности и эмиссионной способности катодов и катодно-сеточных узлов в электровакуумных приборах СВЧ / И.П. Мельникова, В.В. Муллин, Д.А. Усанов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. – 202 с.

² Петросян А.И. Численное исследование процесса формирования электронного пучка в ячейках катодно-сеточного узла ЛБВ с токоперехватывающей или теньевой сеткой // Матер. Науч.-техн. конф. Электронные приборы и устройства СВЧ.: Изд-во Саратов. Ун-та. 2002. С. 3-13.

углеродные волокна используют в качестве материала для изготовления крупногабаритных сеток мощных триодов с торированным вольфрамовым катодом.

Степень разработанности

Большой вклад в исследование проблем создания КСУ с металлопористым катодом внесли советские, а затем и российские ученые: Григорьев Ю.А., Правдин Б.С., Муравьев А.А., Роговин В.И., Петросян А.И., Семенов С.О., Морев С.П., Желудков В.И., Бабанов Ж.Н., Козлов В.И., Поляков И.В. и многие другие.

К моменту постановки данной работы отсутствовала информация об использовании анизотропного пиролитического графита (АПГ) в качестве материала сеточных структур электровакуумных СВЧ приборов с металлопористым катодом.

Таким образом, исследование возможности применения в качестве материала сеточных структур АПГ, разработка технологии их изготовления, исследование термоэмиссионных свойств сеточных структур из АПГ при адсорбции на их поверхность продуктов испарения металлопористого катода, разработка способа высокоточного контроля тепловых уходов междуэлектродных расстояний в КСУ с металлопористым катодом в зависимости от его температуры, исследование закономерностей влияния перемычек теневой сетки на эффективную площадь катода являются **актуальной задачей**.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование возможности создания катодно-сеточных узлов с сеточными структурами из анизотропного пиролитического графита и на его основе повышение долговечности и надежности катодно-сеточных узлов мощных электровакуумных приборов СВЧ диапазона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

- Разработать технологию формирования заготовок сеток (чашек) из анизотропного пиролитического графита толщиной ~100 мкм и менее.
- Разработать технологию прецизионной прошивки сеточных структур из АПГ толщиной 60÷150 мкм с шириной перемычек не более 100 мкм с произвольной кривизной рабочей поверхности.
- Исследовать формоустойчивость сеточных структур с шириной перемычек 100 мкм и менее при воздействии вибрационных и ударных нагрузок с большим ускорением.
- Экспериментально исследовать термоэмиссионные свойства сеточных структур из АПГ, гафния и молибдена с адсорбированными на их поверхностях пленками активного вещества металлопористого катода в зависимости от температуры и мощности электронного потока, рассеиваемой на их поверхностях.
- Исследовать влияние толщины теневой сетки и ее расстояния от поверхности катода на эффективную площадь эмиссии катода, модуляционные характеристики катодно-сеточного узла и макропараметры электронного пучка в пространстве взаимодействия прибора.
- Разработать способ и технологию формирования пленочных антиэмиссионных покрытий из пиролитического углерода толщиной не более 10 мкм на поверхности металлопористого катода с произвольной кривизной.
- Разработать максимально сохраняющий эффективную площадь эмиссии катода способ изготовления КСУ с встроенными в катодную таблетку перемычками теневой сетки.

- Разработать неразрушающий способ регистрации междуэлектродных расстояний в КСУ и их изменение в процессе нагрева катода до рабочей температуры с точностью не менее ~ 0.5 мкм.

- Исследовать работу малогабаритного клистрона Ку диапазона с выходной импульсной мощностью до 400 Вт с теневой сеткой из АПГ при малых скважностях (до 3 единиц).

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Применение сеточной структуры из анизотропного пиролитического графита, размещенной вблизи эмитирующей поверхности металлопористого катода в электронных пушках ЛБВ и клистронов, обеспечивает ее работу без появления термоэлектронной эмиссии при значениях рассеиваемой на ней удельной мощности электронного потока до ~ 70 Вт/см², превышающей соответствующие значения для гафния до ~ 10 раз и для молибдена до ~ 20 раз.

2. Перемычки теневой сетки шириной более 100 мкм, расположенные вблизи эмитирующей поверхности катода на расстоянии до 100 мкм и находящиеся под потенциалом катода, уменьшают эффективную площадь эмиссии катода на величину $\sim 1/2 h \times L$, где: h – расстояние от поверхности катода до обращенной к аноду плоскости теневой сетки; L – периметр перемычек теневой сетки.

3. Изготовление катодно-сеточного узла с встроенной сеткой путем электроискрового фрезерования в катодной таблетке пазов перемычками устанавливаемой в КСУ теневой сетки увеличивает эмитирующую поверхность катода до ~ 10 % по сравнению технологией электроискровой прошивки сеток и пазов в катодной таблетке отдельно изготовленными инструментами.

4. Применение анизотропного пиролитического графита в качестве материала теневой сетки позволило увеличить время стабильной работы малогабаритного клистрона Ку диапазона с выходной импульсной мощностью до 400 Вт с длительностью импульса 2.5 мкс и скважностью 3 до 37 минут, что более чем на порядок превосходит время стабильной работы клистрона с сетками из гафния.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов:

Достоверность результатов обеспечивалась использованием аттестованного измерительного оборудования и методик измерения параметров приборов и отдельных его узлов. Измерения параметров 400 ваттного клистрона Ку диапазона были проведены на аттестованной на предприятии АО «НПП «Алмаз» установке. Достоверность результатов подтверждается также соответствием результатов экспериментальных исследований с результатами исследований, полученными другими авторами.

Научная новизна работы:

1. Впервые экспериментально исследованы термоэмиссионные свойства токоперехватывающей сетки из анизотропного пиролитического графита в электронной пушке импульсной ЛБВ в зависимости от температуры металлопористого катода и мощности электронного потока, рассеиваемой на ее поверхности. Определены предельные значения рассеиваемой на токоперехватывающих сетках из АПГ, молибдена и гафния мощности электронного потока, вызывающие появление термоэлектронной эмиссии. Экспериментально показано, что токоперехватывающие сетки из АПГ, расположенные вблизи поверхности металлопористого катода с температурой в диапазоне от 1050°C и до 1150°C способны без появления паразитной термоэлектронной эмиссии рассеивать

мощность электронного потока до 20 раз больше, чем сетки из молибдена и до 10 раз больше, чем сетки из гафния.

2. Экспериментально подтверждено отсутствие негативного влияния расположенной вблизи катода сетки из анизотропного пиролитического графита на эмиссионную способность металлопористого катода.

3. Предложен неразрушающий способ измерения междуэлектродных расстояний в КСУ мощной импульсной ЛБВ методом лазерной интерферометрии с точностью ~ 0.5 мкм.

4. Экспериментально исследовано влияние толщины теневой сетки и зазора между сеткой и катодом на эффективную площадь эмиссии металлопористого катода.

5. Предложен максимально сохраняющий эмитирующую поверхность катода способ изготовления КСУ с встроенной в таблетку катода перемычками теневой сетки (патент №2697190).

6. Разработан способ формирования антиэмиссионных покрытий пленочного типа из пиролитического углерода на поверхности металлопористого катода методом лазерного пиролиза с коэффициентом подавления эмиссии более 200 в течение не менее 150 часов при температуре 1240°C

7. Впервые проведено испытание малогабаритного клистрона Ку диапазона с выходной импульсной мощностью до 400 Вт с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита. Применение АПГ позволило обеспечить стабильную работу клистрона без появления паразитной термоэлектронной эмиссии с длительностью импульса 2.5 мкс и скважностью 3 в течение не менее 37 минут, что более чем на порядок превышает время безотказной работы аналогичного по конструкции клистрона с сетками из гафния.

Научно-практическая значимость работы:

Научно-практическая значимость работы заключается в получении не известных ранее экспериментальных результатов по антиэмиссионным свойствам сеточных структур из анизотропного пиролитического графита с адсорбированными на их поверхности продуктами испарения металлопористого катода. Установлено, что сеточные структуры из АПГ способны рассеивать мощность электронного потока до ~ 70 Вт/см², что более чем в ~ 20 раз превосходит аналогичное значение мощности электронного потока для сеток из молибдена и в ~ 10 раз для сеток из гафния. Полученные результаты позволили создать малогабаритный клистрон Ку диапазона с выходной импульсной мощностью до 400 Вт с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита, стабильно работавший при длительности импульса 2.5 мкс и при скважности 3 без появления паразитной термоэлектронной эмиссии с управляющей сетки. Время стабильной работы клистрона (37 минут) с сеткой из АПГ более чем на порядок превысило время стабильной работы (17 секунд) клистрона с сетками из гафния.

Апробация работы и публикации:

Результаты работы докладывались и обсуждались:

На научно-технических конференциях: с международным участием Saratov Fall Meeting. 2017 (г.Саратов, СГУ им. Н.Г.Чернышевского); на юбилейной научно-технической конференции «Электронные приборы и устройства СВЧ» 2017 г. (г.Саратов); на VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2018 г. (г.Санкт-Петербург), на VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2019 г. (г.Санкт-Петербург), на 8^{ой} международной конференции «Фотоника и информационная оптика» 2019 г. (НИЯУ

МИФИ г.Москва), на конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Саратов 2018г., 2020г.), на 14^{ой} международной конференции «Пленки и покрытия» 2019г. (г.Санкт-Петербург),

Публикации: По материалам диссертационной работы опубликовано 21 печатная работа, в том числе, 6 работ в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 4 работы, цитируемые в SCOPUS и Web of Science, получен 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора:

1. Автором предложены и научно обоснованы технические решения по созданию катодно-сеточных узлов с сеточными структурами из анизотропного пиролитического графита для мощных импульсных электровакуумных приборов.

2. Сформулированы цель и задачи по проведению экспериментальных и технологических исследований для реализации поставленной цели.

3. Проведены экспериментальные исследования термоэмиссионных свойств сеточных структур из анизотропного пиролитического графита с адсорбированными на его поверхности продуктами испарения металлопористого катода.

4. Разработаны способы изготовления «связанной» с поверхностью катода «сэндвич-сеткой» типа пирографит- нитрид бора- пирографит- нитрид бора (Патент №193175) и способ изготовления КСУ с встроенной в катодную таблетку перемычками теневой сеткой (Патент №2697190).

5. Разработаны конструкции катодно-сеточных узлов с сеточными структурами из анизотропного пиролитического графита для малогабаритного импульсного 400 ваттного клистрона Ku диапазона.

6. Автор принимал непосредственное участие в постановке и проведении экспериментальных исследований и обсуждении полученных результатов.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения четырех глав, заключения, списка использованных источников литературы и собственных работ автора. Материалы диссертации изложены на 124 страницах, содержат 59 рисунков, 4 таблицы и список цитированной литературы из 82 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, определены пути и способы их решения. Сформулированы научные положения и основные результаты, выносимые на защиту, представлены научная новизна и практическая значимость полученных в диссертации результатов, представлена апробация работы.

В **первой главе** представлен аналитический обзор публикаций по созданию конструкций и способов изготовления катодно-сеточных узлов с одинарными (токоперехватывающими) и двойными (с теневой) сетками для электровакуумных СВЧ приборов. Приведены их достоинства и недостатки. Проанализированы требования, предъявляемые к КСУ и сеточным структурам со стороны электровакуумных приборов: низковольтность управления током пучка, отсутствие термоэмиссионного тока с управляющей сетки, долговечность и надежность конструкции КСУ. Долговечность и надежность КСУ в значительной степени определяется способностью сеточных структур длительное время работать без появления паразитной термоэлектронной эмиссии при высокой температуре в условиях адсорбции активного вещества металлопористого катода на поверхности сеток. В этой связи материал сеточных структур должен иметь высокие значения температуры плавления и работы выхода электронов, обладать низкой энергией

химических связей с продуктами испарения катода – Ва и ВаО, что позволяет сохранять в течение длительного времени работу выхода электронов близкой к работе выхода материала сетки. Перечисленным выше требованиям удовлетворяют углеродные материалы, температура плавления которых близка к 4000°С, а работа выхода электронов составляет 4.6÷4.7 эВ. Таким образом, наиболее предпочтительным материалом для сеточных структур являются материалы из углерода, в частности, анизотропный пиролитический графит (АПГ), как одна из его модификаций. К моменту постановки данной работы отсутствовала информация о его использовании в качестве материала для изготовления сеточных структур в КСУ с металлопористым катодом для СВЧ приборов.

Вторая глава посвящена технологии формирования заготовок сеток из анизотропного пиролитического графита, их прошивке методом микроразмерного лазерного фрезерования, вопросам формоустойчивости сеточных структур при воздействии вибрационных и ударных механических нагрузках с большим ускорением, представлены результаты исследований термоэмиссионных свойств молибдена, гафния и АПГ в диодах с плоскими электродами, а также исследованию термоэмиссионных свойств сеточной структуры из АПГ в электронной пушке.

В *первом параграфе* приведены физико-химические свойства АПГ, которые послужили основанием для его выбора в качестве материала для изготовления сеточных структур для импульсных ЛБВ и клистронов. Представлена технология изготовления сеточных структур с произвольной кривизной поверхности с шириной перемычек менее 100 мкм методом микроразмерного лазерного фрезерования импульсами пикосекундной длительности с высокой плотностью энергии. Прошивка сеток осуществлялась на лазерной технологической установке с пикосекундной длительностью импульса. Длина волны лазерного излучения $\lambda = 1064$ нм, длительность цуга импульсов $\tau = 10$ мкс, количество импульсов в цуге 6÷8, энергия излучения 40 мкДж, что соответствует плотности мощности 5.1×10^{12} Вт/см². Время изготовления сеточной структуры с произвольной топологией размещения перемычек составляет не более 5 минут. На рисунке 1 приведены фотографии сеточных структур с различной формой и топологией размещения ячеек. Толщина сеток составляла ~ 60 мкм.

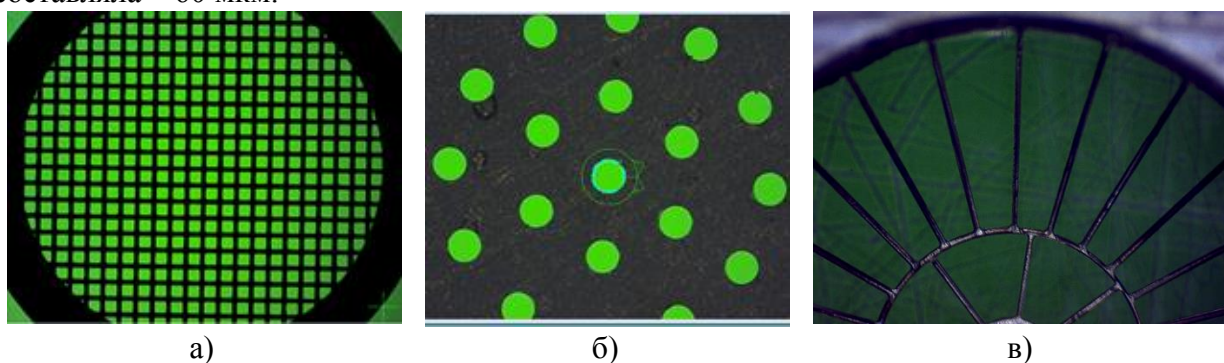


Рисунок 1. Сеточные структуры: а) планарная сетка с квадратными ячейками 175×175 мкм и шагом 225 мкм; б) с круглыми отверстиями диаметром 0.5 мм; в) сетка с радиально-кольцевыми перемычками шириной ~65 мкм и радиусом кривизны поверхности 8.2 мм.

Во *втором параграфе* представлены результаты исследований формоустойчивости сеточных структур радиально-кольцевого типа из анизотропного пиролитического графита толщиной 110 мкм и шириной перемычек менее 100 мкм при воздействии вибрационных и ударных нагрузок с ускорением до 20g. После испытаний, каких – либо дефектов или разрушений сеточных структур не обнаружено.

В *третьем параграфе* исследованы процессы адсорбции активного вещества с поверхности металлопористого катода, работающего при высоких значениях плотности тока, на расположенные вблизи его поверхности сеточные электроды.

В четвертом параграфе представлены конструкции макетов диодов с анодами из молибдена, гафния и АПГ. Приведены схемы измерений термоэмиссионных свойств исследуемых образцов в зависимости от рассеиваемой на них мощности электронного потока при различных температурах катодов в импульсном и квазинепрерывном режимах.

Представлены вольт-амперные характеристики диодов при температуре катодов до 1130°C. При средней мощности электронных пучков на анодах диодов 2.4 Вт (разность потенциалов в диодах, $U_{к-а} = 40В$) давление остаточных газов увеличилось до 5×10^{-6} Торр, а токи катодов уменьшились на 30%. После снятия токовой нагрузки на аноды диодов и восстановлении давления остаточных газов эмиссия катодов полностью восстановилась. Это позволяет сделать вывод о том, что, как и для анодов из молибдена и гафния, нагрев анода из АПГ энергией электронного потока не приводит к необратимым последствиям и деградации импрегнированного катода.

В пятом параграфе представлены результаты экспериментальных исследований термоэмиссионных характеристик материалов (молибден, гафний и АПГ) в диодах.

Исследуемые диоды испытывались при давлении остаточных газов не хуже $2 \cdot 10^{-7}$ Торр. Значения рассеиваемой на образцах средней удельной мощности электронного потока регистрировались при достижении тока термоэлектронной эмиссии ~ 1 мА. При температуре катода 1050°C предельные значения удельных мощностей для молибдена и гафния составляли ~ 3.1 Вт/см² и ~ 6.6 Вт/см² соответственно. При температуре катода 1140°C эти значения уменьшились до ~ 1.1 Вт/см² и ~ 3.8 Вт/см² соответственно (рис.2а).

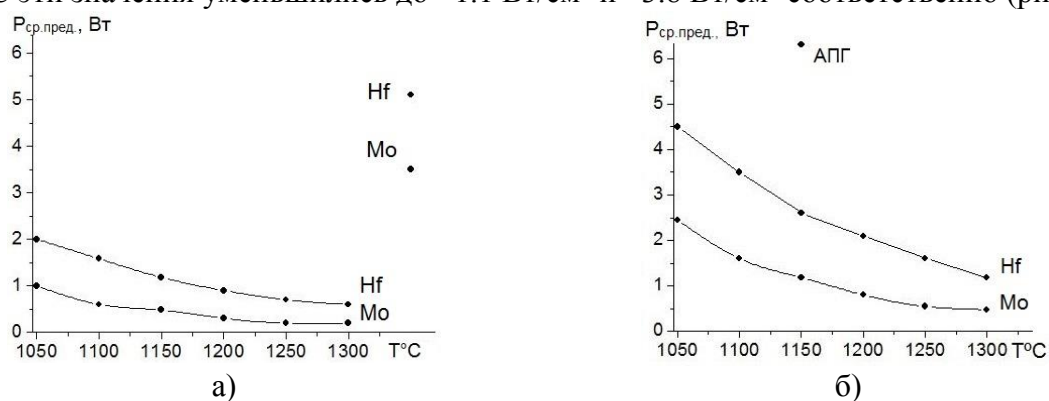


Рисунок 2. Зависимости средней предельной мощности для молибдена и гафния по уровню термоэмиссионного тока 1 мА в зависимости от температуры катода: а) - непрерывный режим; б) - импульсный режим: $\tau = 40$ мкс; $Q = 250$.

При температуре катода 1350°C и рассеиваемых удельных мощностях электронного потока 11 Вт/см² и 16.6 Вт/см² на анодах из молибдена и гафния (рис.2а точки справа вверху) наблюдался лавинообразный рост термоэмиссионного тока и тока катода вследствие возрастающей во времени температуры образцов и катода в процессе взаимного обмена тепловой энергией.

В диоде с АПГ даже при удельной мощности электронного потока ~ 20 Вт/см² термоэлектронная эмиссия отсутствовала (рис.2б).

В шестом параграфе изложены результаты экспериментальных исследований термоэмиссионных свойств сеточной структуры из АПГ в электронной пушке. Электронная пушка содержала токоперехватывающую сетку планарного типа из АПГ толщиной 120 мкм с квадратными ячейками 170×170 мкм² и шириной перемычек 80 мкм (рис.1а). Прозрачность сетки составляла 46%. Испытания проводились при напряжении анода 12 кВ и скважностях от 10 до ~ 1 (квазинепрерывный режим) при плотности тока катода не более 5 А/см². Токи на сетку и термоэлектронной эмиссии с неё регистрировались осциллографом С1-40 по падению напряжения на калиброванном сопротивлении 100 Ом в цепи сетки. Мощность токооседания на сетку регистрировалась при амплитуде тока термоэлектронной эмиссии с сетки ~ 0.1 мА (рисунок 3).

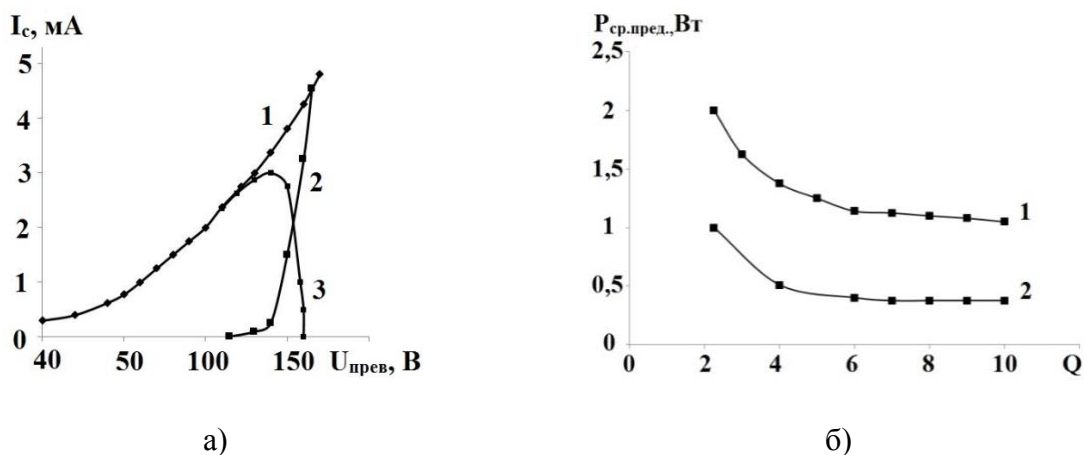


Рисунок 3. Зависимости модулей токов сетки от разности потенциалов катод-сетка (а), где: 1 – ток катода; 2 – модуль тока термоэлектронной эмиссии с сетки; 3 – суммарный ток в цепи сетки и зависимость предельной средней мощности перехвата сеткой от скважности (б): 1 – по среднему току сетки ~ 1 мА; 2 – по импульсному току ~ 0.1 мА.

При уменьшении скважности ≤ 4 , регистрировалось возрастание предельной средней мощности, вызванное увеличением эффективной работы выхода за счет десорбции бария с ростом её температуры. Данное предположение было подтверждено в экспериментах по исследованию зависимости термоэмиссионного тока с сетки от средней мощности токоперехвата при различных температурах катода (рисунок 4).

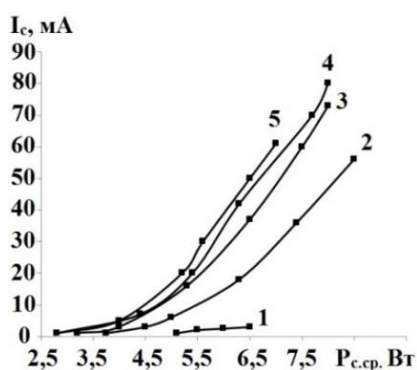


Рисунок 4. Термоэмиссионный ток сетки из АПГ в зависимости от средней мощности токоперехвата при температуре катода, Т: 1 – 1000, 2 – 1050, 3 – 1150, 4 – 1190, 5 – 1240°C.

Результатами проведенных экспериментальных исследований установлено, что при температуре катода 1050°C предельное значение удельной средней мощности, рассеиваемой на сетке из АПГ достигало ~ 70 Вт/см², что до ~ 20 раз больше, чем для сеток из молибдена и в ~ 10 раз больше, чем для сеток из гафния.

В **третьей главе** представлены результаты исследований изменения междуэлектродных расстояний в КСУ мощных импульсных ЛБВО и их влияния на модуляционные параметры КСУ, параметры электронного пучка в пространстве взаимодействия СВЧ прибора и эффективную площадь эмиссии металлопористого катода. Представлены конструкции КСУ, повышающие их надежность и долговечность. Предложены и запатентованы способы их изготовления.

В *первом параграфе* представлены физические принципы бесконтактного метода измерения междуэлектродных расстояний в КСУ методом лазерной интерферометрии.

Во *втором параграфе* представлена принципиальная схема установки для измерений междуэлектродных расстояний.

Метод измерений основан на измерении фаз лазерного излучения, отраженного от измеряемого объекта и удаленной от электродов реперной опоры. Разность фаз отраженных сигналов служила мерой длины для измерения расстояния между электродами. Погрешность измерения осевых перемещений не превышала 0.5 мкм.

В *третьем параграфе* изложены основные положения теории формирования измерительного сигнала интерферометра.

В *четвертом параграфе* представлены методика цифровой записи картин интерферограмм, их компьютерная обработка, определение направления и величин относительного смещения электродов друг относительно друга.

Пятый и шестой параграфы посвящены обработке методики измерений междуэлектродных зазоров между катодом, теновой и управляющей сетками, проведена оценка погрешностей измерений.

В *седьмом параграфе* приведены результаты измерений относительных смещений электродов в КСУ мощной импульсной ЛБВ.

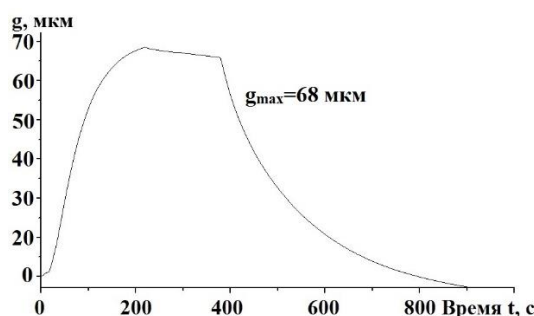
Исследуемый КСУ имел следующие параметры: диаметр катода 10 мм, радиус кривизны эмитирующей поверхности 8,2 мм, рабочая температура катода 1070°C, толщина теновой сетки 100 мкм, (при комнатной температуре катода) расстояние катод-теновая сетка 100 мкм, толщина управляющей сетки 300 мкм, расстояние между сетками 300 мкм. Смещения электродов максимальное Δg_{max} и стабилизированное Δg_{stab} относительно реперной точки, а также скорость смещения \bar{v} возрастали при увеличении температуры катода (таблица 1).

Таблица 1.

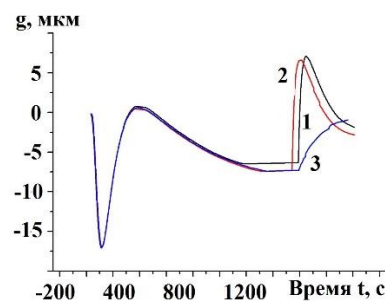
Значения максимальной Δg_{max} и стабилизированной Δg_{stab} величины относительного смещения катода и теновой сетки при различных температурах.

	$T^{\circ}C=1050$	$T^{\circ}C=1070$	$T^{\circ}C=1090$	$T^{\circ}C=1100$
Δg_{max} , мкм	65,0	73,3	76,6	83,0
Δg_{stab} , мкм	58,4	67,5	66,6	70,3
\bar{v} мкм/сек	0,7	0,7	1,0	1,2

При установившейся температуре 1070°C катод смещается на ~68 мкм в сторону теновой сетки (рисунок 5а), которая сместилась в противоположном направлении на ~6 мкм (рисунок 5б). Суммарное уменьшение расстояния катод – теновая сетка составило ~ 74 мкм, а расстояние катод – теновая сетка уменьшилось относительно начального («холодного» значения) до ~ 32 мкм.



а)



б)

Рисунок 5. Изменение расстояний в зависимости от времени: (а) – катод-фокусирующий электрод; (б) – теновая сетка - фокусирующий электрод;

Следует обратить внимание на инерционность изменения междуэлектродных расстояний в процессе нагрева. В переходной области процесса повышения температуры смещение электродов Δg_{\max} несколько превышало смещение в установившемся (стабилизированном) температурном режиме Δg_{stab} . Это может быть связано с более поздним во времени установлением стационарного температурного режима КСУ в целом.

В **четвертой главе** приведены результаты компьютерного анализа влияния тепловых смещений междуэлектродных расстояний катод – теневая сетка и теневая сетка – управляющая сетка на модуляционные параметры КСУ и на эффективную площадь эмиссии металлопористого катода мощной импульсной ЛБВО.

В *первом параграфе* приведены результаты численных расчетов влияния междуэлектродных зазоров в КСУ на ток катода и величину модулирующих напряжений (напряжения запирающего и рабочего напряжения управляющей сетки). При фиксированном напряжении превышения на управляющей сетке уменьшение тока катода при отодвижении теневой сетки от эмитирующей поверхности (рис.6а) связано как с уменьшением напряженности поля вблизи поверхности катода, так и с уменьшением эффективной площади эмиссии катода. Влияние расстояния катод-управляющая сетка на модулирующие напряжения, например, из-за тепловых смещений, измеренных в данном КСУ, представлены на рисунках 6б и 6в.

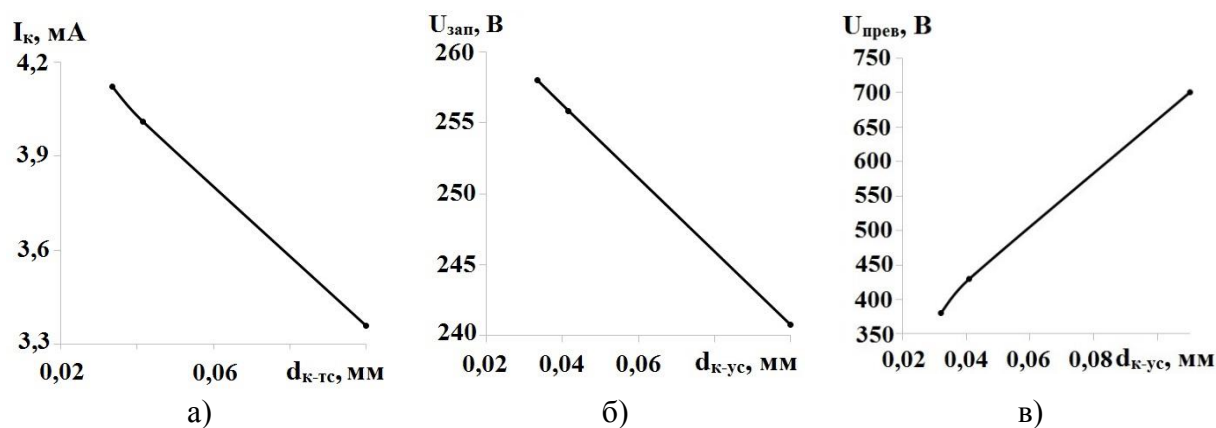


Рисунок 6. Зависимости тока катода от расстояния катод – теневая сетка (а) и напряжений запирающего и превышения от расстояния катод-управляющая сетка (б, в).

Напряжение запирающего рассчитывалось по уровню тока катода 0.01% от номинального значения.

Во *втором параграфе* приведены результаты численных расчетов влияния положения теневой сетки относительно эмитирующей поверхности катода на макропараметры электронного пучка: диаметр в области кроссовера, диаметр и амплитуда пульсаций огибающей электронного пучка в пролетном канале и токопрохождение на коллектор прибора. Увеличение зазора катод-теневая сетка приводит к увеличению поперечных скоростей электронов и, как следствие, к увеличению размеров электронного пучка в пролетном канале прибора.

В *третьем параграфе* представлены результаты экспериментальных исследований влияния толщины теневой сетки и расстояния катод-теневая сетка на эффективную площадь эмиссии металлопористого катода.

Расположенные над поверхностью катода перемычки теневой сетки уменьшают напряженность электростатического поля вблизи поверхности катода по периметру перемычек. Следствием полевой экранировки является уменьшение плотности тока катода по сравнению с его значением вдали от перемычки. Распределение плотности тока катода вблизи перемычки было экспериментально исследовано методом диафрагмы с малым

отверстием. В процессе эксперимента расстояние от поверхности катода до перемычки изменялось от 0 (касание катода и перемычки) до 70 мкм. Диафрагма с отверстием в центре диаметром ~ 10 мкм располагалась на расстоянии 0.7 мм от перемычки и перемещалась плоско-параллельно относительно поверхности катода по линии, перпендикулярной к перемычке (рис. 7а). Ток, прошедший через отверстие в диафрагме, попадал в коллектор и регистрировался милливольт-микроамперметром Ф116/2. Распределение плотности тока катода вблизи перемычки представлено на рисунке 7б. Расстояние от края перемычки отложены на оси абсцисс в относительных единицах $h = a + l$. Плотность тока изменялась от нулевого значения вблизи края перемычки до j_0 вдали от нее. С учетом погрешности измерений для любых значений h в диапазоне от 100 до 170 мкм ширина зоны нарастания плотности тока от 0 до j_0 составляла $\sim 2h$.

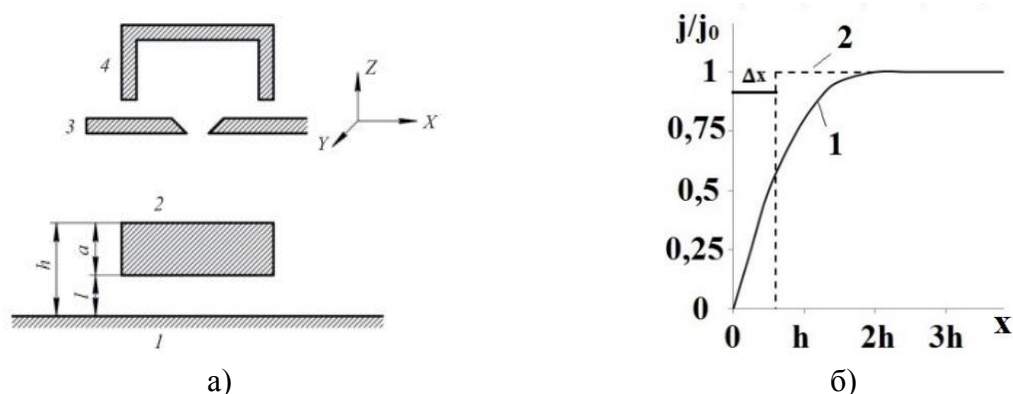


Рисунок 7. а) - Схема макета: 1 – катод; 2 – перемычка теневой сетки; 3 – диафрагма с малым отверстием; 4 – коллектор электронов. б) - Изменение плотности термоэмиссионного тока катода при удалении от края перемычки теневой сетки: 1- эксперимент; 2- аппроксимация ступенчатой функцией.

Для удобства анализа влияния полевой экранировки на эффективную площадь эмиссии катода кривая распределения плотности тока катода была аппроксимирована ступенчатой функцией с плотностью тока j_0 . Зона полной полевой экранировки с нулевой плотностью тока вдоль границы перемычки имеет ширину $\Delta x \approx h/2$, за пределами которой плотность тока катода $j = j_0$. Результаты измерений согласуются с результатами расчетов². Численный анализ влияния высоты перемычек теневой сетки на эффективную площадь эмиссии металлопористого катода был проведен для катодно-сеточного узла мощной импульсной ЛБВ (рисунок 8а, б).

Диаметр эмитирующей поверхность катода $D_k = 5.0$ мм, а радиус её кривизны $R_{кр} = 8.2$ мм. Сеточные структуры (теневая и управляющая сетки) имели 24 радиальные перемычки шириной 0.13 мм и располагались на периферии катода. Две кольцевые перемычки шириной 0.3 мм имели диаметры 3.8 мм и 1.72 мм соответственно.

Расчеты эффективной площади эмиссии $S_{эфф}$ были проведены для различных значений высоты h . Высота $h = 0.2$ мм соответствовала размерам, заложенным в чертежи на изготовление КСУ с толщиной теневой сетки 0.1 мм и зазором катод-сетка 0.1 мм. Эффективная площадь эмиссии катода $S_{эфф}$ определялась соотношениями:

$$S_{эфф} = S_k - S_{mc} - S_3 \quad 1) \quad (2)$$

$$S_3 \approx h/2 \cdot L$$

где: S_k – площадь эмитирующей поверхности катода; S_{mc} – площадь перемычек теневой сетки; S_3 – площадь зоны полевой экранировки по периметру перемычек; L – периметр перемычек теневой сетки.

Эффективная плотность тока, соответствующая рабочему току в приборе I_k определялась из соотношения:

(3)

$$J_{эфф} = I_k / S_{эфф}$$

На рисунке 8в приведены зависимости относительных значений эффективной площади эмиссии и плотности тока катода от полной высоты теневого сетки h .

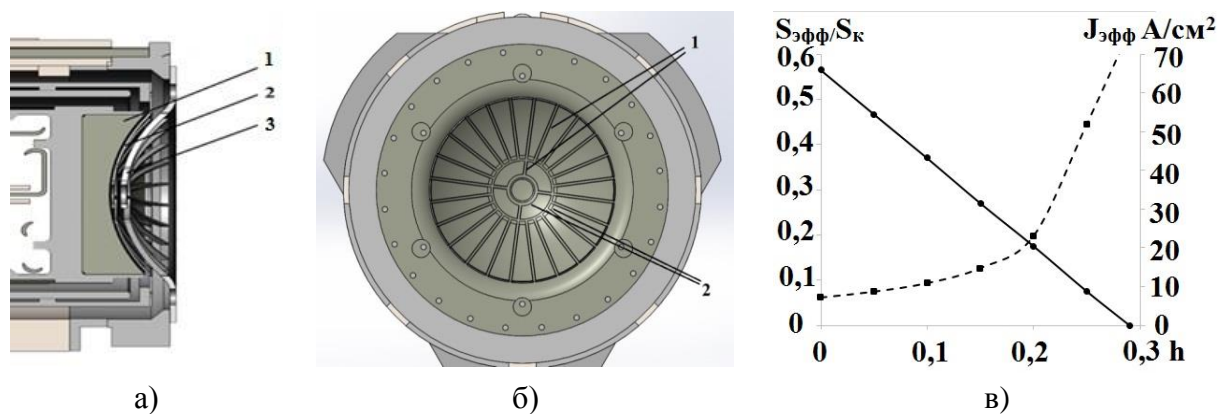


Рисунок 8. Схема КСУ: а) 1 - катод; 2 - теньевая сетка; 3 - управляющая сетка; б) состав сетки: 1 - радиальные переемычки; 2 - кольцевые переемычки; в) зависимости, эффективной площади катода $S_{эфф}$ (сплошная линия) и эффективной плотности тока катода $J_{эфф}$ (пунктир) от полной высоты переемычки h .

Так, для рассматриваемой конструкции КСУ площадь эмитирующей поверхности катода и площадь переемычек теневого сетки составляли $\sim 87.5 \text{ мм}^2$ и $\sim 31.0 \text{ мм}^2$ ($\sim 35\%$ от площади катода) соответственно. При рабочем токе КСУ $I_k = 4 \text{ А}$ плотность тока, отнесенная к поверхности катода S_k , составляла 4.6 А/см^2 . При том же токе катода уменьшение площади его эмитирующей поверхности за счет площади переемычек теневого сетки приведет к увеличению плотности тока до 7.1 А/см^2 . Для $h = 0.2 \text{ мм}$ (толщина теневого сетки 0.1 мм и зазор между ней и катодом 0.1 мм) площадь зоны полевой экранировки составила 39 мм^2 ($\sim 45\%$ от площади катода), что превышает площадь переемычек теневого сетки. Эффективная площадь эмиссии катода при этом составила $\sim 17.5 \text{ мм}^2$ ($\sim 20\%$ от площади катода). Для получения рабочего тока 4 А с оставшейся площади катода потребуется увеличить его плотность тока до $\sim 23 \text{ А/см}^2$. Эффективная плотность тока катода резко возрастает при $h > 0.15 \text{ мм}$ (рис. 9в) за счет смыкания областей экранировки между радиальными переемычками в области их перехода в кольцевую переемычку.

В четвертом параграфе представлены результаты исследований формирования на эмитирующей поверхности катода пленочных антиэмиссионных покрытий из пиролитического углерода методом лазерного пиролиза. Луч лазера перемещался по поверхности катода в присутствии углеродосодержащих газов (метан, гептан) в камере при давлении до $\sim 100 \text{ Па}$. Под действием высокой температуры на поверхности катода газ разлагался на углерод и водород. Атомы углерода, осаждаясь на разогретую энергией лазерного излучения поверхность катода, образовывали пленку пиролитического углерода. Толщина пленки пиролитического углерода составляла $\sim 10 \text{ мкм}$. Коэффициент подавления термоэлектронной эмиссии на поверхности металлопористого катода, покрытого пирографитовой пленкой, составлял ~ 200 относительных единиц и сохранялся при температуре катода 1240°C в течение 150 часов (рисунок 9).

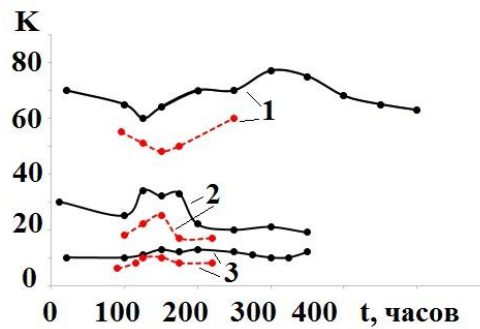


Рисунок 9. Зависимости коэффициентов подавления полос при различных значениях температуры катода в зависимости от времени: 1,2,3- номера антиэмиссионных полос, сформированных лазерным излучением различной мощности; сплошные линии соответствуют температуре катода 1140°C, прерывистые (красный цвет) температуре 1220°C.

Для температуры катода 1050°C сохранение коэффициента подавления эмиссии можно экстраполировать на время в течение ~2500 часов.

В *пятом параграфе* предложен способ формирования КСУ с встроенными в керн катода перемычками теневой сетки (патент № 2697193). В предлагаемом способе формирование пазов в керне осуществлялось перемычками уже изготовленной теневой сетки толщиной ~ 0.3 мм методом электроискрового фрезерования. Это позволило увеличить эффективную площадь эмиссии катода на ~ 10% по сравнению со способом независимого изготовления пазов и перемычек сетки.

В *шестом параграфе* предложена конструкции КСУ с размещенной на поверхности катода «связанной сеткой», состоящей из чередующихся слоев пирографит-нитрид бора – пирографит (патент № 193175).

В **пятой главе** представлена конструкция КСУ с теневой сеткой из АПГ для малогабаритного девятнадцати лучевого клистрона Ку диапазона с выходной импульсной мощностью до 400 Вт, приведены результаты экспериментальных исследований стабильности его работы при скажностях от 100 до 3 единиц.

В *первом параграфе* представлена конструкция 19-ти лучевого КСУ планарного типа (рисунок 10). Каждый из 19-ти парциальных пучков формировался мини пушкой с металлопористым осмированным катодом в форме цилиндра диаметром 0.42 мм и высотой 0.5 мм. Мини катоды были изготовлены в керне диаметром 3.1 мм методом электроискрового фрезерования. Фокусирующий электрод с 19-ю отверстиями закреплялся в КСУ таким образом, что каждый парциальный мини катод был заглублен на 20-30 мкм относительно его наружной плоскости, обращенной к аноду. Фокусирующий электрод выполнял функцию теневой сетки и защищал управляющую сетку от перехвата тока катода. Управляющая сетка с 19-ю отверстиями размещалась на расстоянии 0.3 мм от теневой сетки. Сетчатый анод располагался на расстоянии 0.5 мм от управляющей сетки соосно с отверстиями теневой сетки и мини катодами.

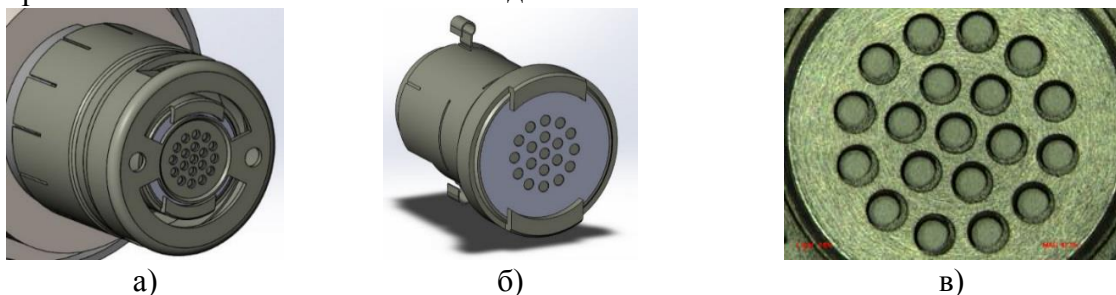


Рисунок 10. Конструкция КСУ 19-ти лучевого клистрона с теневой сеткой из АПГ: а) общий вид КСУ, б) катод с закрепленной теневой сеткой из АПГ, в) фотография КСУ, установленного в клистрон.

Во *втором параграфе* приведены результаты испытаний клистрона с сеточными структурами из гафния. При напряжении анода 3000 В, скважностях от 100 до 10 и паспортном значении напряжения подогревателя катода (4 В) рабочий ток прибора 800 мА и ток каждого парциального катода 42 мА с плотностью тока ~ 30 А/см² достигались при напряжении превышения на управляющей сетке +120 В относительно катода. Для разных приборов импульсный ток термоэлектронной эмиссии на управляющую сетку находился в пределах 15÷30 мА. Устойчивая работа клистрона при токе катода 800 мА регистрировалась при скважностях не менее 10. При уменьшении скважности до 3-х единиц ток катода снижался до 500 мА. Ток на управляющую сетку возрастал за счет увеличения термоэлектронной эмиссии с теневой сетки из гафния при уменьшении скважности. Дальнейшее уменьшение скважности приводило к пробоям между управляющей и теневой сетками, и разрушению перемычек теневой сетки или обеих сеток. В режиме работы со скважностью 3 отказы клистронов с сетками из гафния регистрировались в течение 1 ÷ 3 мин, а иногда и в течение нескольких секунд после включения клистрона.

Время наработки данного прибора при скважности 100, 20, 10 составило 60 минут (по 20 минут в каждом режиме), при скважности 3 около 17 секунд. С первых секунд работы клистрона со скважностью 3 наблюдалась нестабильность тока катода, который изменялся в пределах 450 до 680 мА. После 17 секунд работы со скважностью 3 произошло аварийное отключение клистрона с потерей его работоспособности. При анализе причины потери работоспособности было обнаружено разрушение сеток КСУ (рисунок 11).



Рисунок 11. Фотография катодно-сеточного узла с теневой и управляющей сеткой из гафния после пробоев.

В *третьем параграфе* приведены результаты испытаний в том же конструктивном исполнении клистрона с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита. Главным достоинством теневой сетки из АПГ являлось отсутствие термоэлектронной эмиссии с неё на управляющую сетку при всех режимах работы клистрона. Время наработки клистрона при испытаниях со скважностями 100, 20, 10 составило 60 минут, по 20 минут в каждом режиме, а со скважностью 3 составило 30 минут при температуре катода 1200°С и 7 минут при температуре катода 1250°С. Исследования были завершены после снижения тока катода во всех режимах на 25 % по сравнению с током в начале испытаний в результате выработки ресурса катода.

Пробои во время испытаний со скважностью 3 не обнаружены. После проведенных испытаний прибор был вскрыт. При осмотре установлено, что целостность и геометрия сеток не нарушена (рисунок 12).

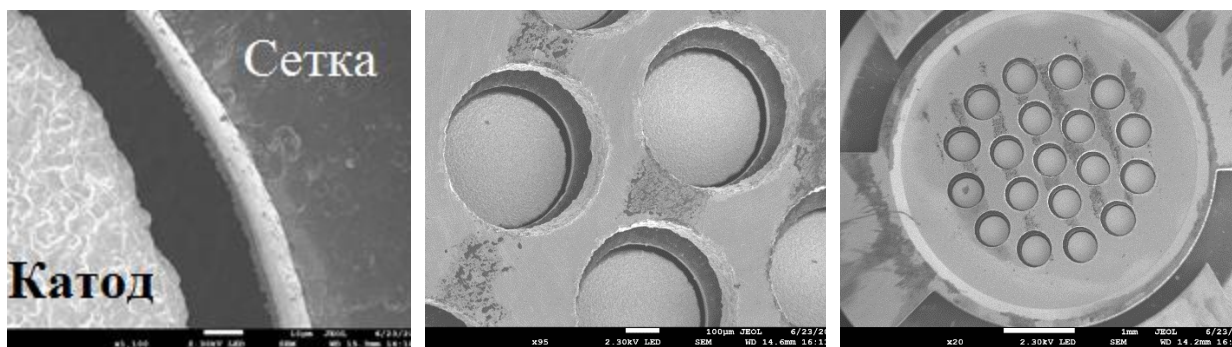


Рисунок 12. Фотография катодно-сеточного узла с теневой сеткой из АПГ после вскрытия прибора.

Экспериментально подтверждена перспективность применения анизотропного пиролитического графита в качестве сеточных электродов мощных импульсных электронных приборов, работающих при плотностях тока катода в десятки А/см² при малых скважностях.

В **Заключении** дана общая характеристика работы и сформулированы основные результаты:

Диссертационная работа содержит экспериментальные исследования и компьютерные расчеты, направленные на создание катодно-сеточных узлов мощных импульсных ЛБВ и клистронов с сеточным управлением электронным пучком. Обоснован и экспериментально подтвержден выбор анизотропного пиролитического графита в качестве материала сеточных структур, позволивших обеспечить устойчивое управление током без появления паразитной термоэлектронной эмиссии с сеток в паузе между импульсами при малых скважностях (менее 10) вплоть до квазинепрерывного режима (скважность 1,4). Основные результаты диссертационной работы можно разделить на два раздела.

В первом разделе обоснован выбор анизотропного пиролитического графита в качестве материала сеточных структур, исследованы термоэмиссионные свойства данного материала в КСУ с импрегнированным катодом, разработаны технологии формирования заготовок сеточных структур из АПГ, разработаны технологии изготовления сеточных структур методом лазерного фрезерования:

1. Разработана технология формирования заготовок из АПГ толщиной ~ 60 мкм для изготовления сеточных структур с произвольной, в том числе со сферической, рабочей поверхностью.

2. Разработана технология изготовления сеточных структур (из заготовок АПГ) радиально-кольцевого типа с шириной перемычек менее 100 мкм методом микроразмерного лазерного фрезерования ультракороткими импульсами длительностью $\tau = 10$ пс с плотностью мощности излучения $\sim 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см².

3. Экспериментально установлено, что сеточная структура из анизотропного пиролитического графита, размещенная вблизи поверхности металлопористого катода и имеющая температуру близкую к температуре катода, не оказывает негативного влияния на эмиссионную способность катода.

4. Разработан бесконтактный способ измерения междуэлектродных расстояний в КСУ методом лазерной интерферометрии с точностью до ~ 0.5 мкм. В импульсной ЛБВ, при температуре металлопористого катода 1080°C, уменьшение расстояния катод – теневая сетка, относительно «холодного» при комнатной температуре, составляет ~ 40 мкм.

5. Разработан способ (лазерного пиролиза из газовой фазы) формирования пленочных антиэмиссионных покрытий из пиролитического углерода толщиной не более

10 мкм на сферической поверхности металлопористого катода с коэффициентом подавления эмиссии не менее 200 в течение 150 часов при температуре катода 1240°C.

6. Разработан и запатентован способ изготовления КСУ с встроенными в катодную таблетку перемычками теневой сетки.

Во втором разделе представлены результаты разработки конструкции КСУ с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита. Приведены результаты экспериментальных исследований малогабаритного импульсного клистрона Ку диапазона с выходной импульсной мощностью до 400 Вт с теневой сеткой из АПГ:

1. Подтверждена формоустойчивость сеточных структур из АПГ при воздействии вибрационных и ударных нагрузок с ускорением до 20g. Испытания проведены по методике и на оборудовании, разработанном на предприятии АО «НПП «Алмаз» для испытаний приборов космического и военного применения.

2. Экспериментально установлено, что сеточная структура из анизотропного пиролитического графита, размещенная вблизи поверхности металлопористого катода, способна без появления паразитной термоэлектронной эмиссии рассеивать мощность электронного потока до $\sim 70 \text{ Вт/см}^2$, что до 20 раз больше, чем аналогичная сетка из молибдена и до 10 раз больше, чем сетка из гафния.

3. Экспериментально подтверждена эффективность применения теневой сеточной структуры из анизотропного пиролитического графита в малогабаритном 400 ваттном клистроне Ку диапазона без появления термоэлектронной эмиссии с сетки и без пробоев между сетками в течение не менее 40 минут при температуре металлопористого осмированного катода 1240°C при скважности 3. Дальнейшие испытания были прерваны после уменьшения тока катода на 25% по причине выработки его гарантийного ресурса.

Клистрон аналогичной конструкции с теневой сеткой из гафния при скважности 3 проработал 17 секунд и вышел из строя после пробоя между теневой и управляющей сеткой.

Анализ представленных в диссертационной работе результатов свидетельствует о том, что решена достаточно сложная научно техническая задача по повышению надежности и долговечности работы мощных импульсных электровакуумных приборов, в частности малогабаритного 400 ваттного клистрона Ку диапазона за счет применения в качестве материала сеточных структур анизотропного пиролитического графита.

Содержание диссертации изложено в следующих работах:

В изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Журавлев С.Д. Применение лазерной интерферометрии для измерения тепловых уходов междуэлектродных зазоров в КСУ мощной импульсной ЛБВ / С.Д. Журавлев, Р.Ю. Богачев, В.И. Роговин, А.И. Петросян, В.И. Шестеркин, Б.А. Гризбил, В.П. Рябухо, А.А. Захаров // *Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника.* - 2018. - Вып. 4(539). С. 45-51.

2. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. Токоперехватывающие сетки из анизотропного пиролитического графита в электронных пушках с металлопористым катодом // *ЖТФ.* - 2019. - Т. 89. - Вып. 9. - С. 1464-1468.

3. Журавлев С.Д. Формоустойчивость сеточных структур из высокоплотного пиролитического графита при воздействии вибрационных и ударных нагрузок с большим ускорением / С.Д. Журавлев, В.И. Шестеркин, Д.А. Целиков, М.В. Горбачева Д.А. Бессонов // *Электронная техника. Сер.1, СВЧ-техника.* -2020 - Вып. 1(544). С. 22-25.

4. Журавлев С.Д. Сеточные электроды из высокоплотного пиролитического графита для мощных импульсных ЛБВ / С.Д. Журавлев, В.И. Шестеркин, М.В. Горбачева,

Д.А. Бессонов, Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко // Электронная техника. Сер.1, СВЧ-техника. -2020- Вып. 2(545). С.67-72.

5. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. Эффективная площадь эмиссии импрегнированного катода в катодно-сеточном узле импульсной ЛБВ // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника. -2020. –Вып. 4(547). С. 55-59.

6. Журавлев С.Д. 400-ваттный многолучевой импульсный клистрон Ku диапазона с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита / С.Д. Журавлев, Д.И. Кириченко, М.А. Манжосин, П.Д. Шалаев, В.И. Шестеркин // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника. -2020. - Вып. 4(547). С. 60-65.

Патенты РФ:

7. Пат. 2697190 Российская Федерация, *H01J 9/02*. Способ изготовления катодно - сеточного узла с встроенной в катод теневой сеткой / Журавлев С.Д., Бабанов А.Ж., Шестеркин В.И.; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Алмаз». - № 2018136187. заявл. 12.10.2018; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23. – 6 с.

8. Пат. 193175 Российская Федерация. *H01J 1/20*. Катодно-сеточный узел с многослойной связанной с катодом сеткой / Журавлев С.Д., Сахаджи Г.В., Шестеркин В.И.; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Алмаз». - №2019117834. заявл. 31.08.2017; опубл. 16.10.2019, Бюл. № 29. – 6 с.

Публикации в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования SCOPUS и Web of Science:

9. Shesterkin V.I., Zhuravlev S.D. Grid structures made of anisotropic pyrolytic graphite for high-power electron vacuum microwave devices // Conference Proceedings - 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018. – Saratov, 2018. - P. 80-85.

10. Zhuravlev S.D., Shesterkin V.I. The influence of jumper height of the shadow grid on the effective emission area of the dispenser cathode in cathode-grid assembly of high-power pulsed TWT// Conference Proceedings - 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2020. – Saratov, 2020. – P. 68-70.

11. Zhuravlev S.D. Study of miniature Ku-band multiple - beam klystron with built-in shadow grid of high-density pyrolytic graphite / S.D. Zhuravlev, M.A. Manzhosin, V.I. Shesterkin, P.D. Shalaev, D.I. Kirichenko // Conference Proceedings - 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2020. – Saratov, 2020. – P. 65-67.

12. Zhuravlev S.D. Formation and investigation of the mechanical strength of pyrolytic graphite grid structures for electronic devices/ S.D. Zhuravlev, V.I. Shesterkin, D.A. Bessonov // Conference Proceedings - 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2020. – Saratov, 2020. – P. 62-64.

Публикации в других изданиях:

13. С.Д. Журавлев, Р.Ю. Богачев, В.И. Роговин, А.И. Петросян, В.И. Шестеркин, Б.А. Гризбил, В.П. Рябухо, А.А. Захаров. Исследование тепловых смещений электродов КСУ с помощью лазерной интерферометрии и их влияние на модуляционные параметры импульсной ЛБВ // Доклады VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 28 – 31 мая 2018. Санкт-Петербург. СПбГТУ. С. 170-174.

14. Журавлев С.Д., Гризбил Б.А., Сахаджи Г.В., Богачев Р.Ю., Рябухо В.П. Лазерная спекл-интерферометрия относительных температурных смещений рассеивающих объектов // 8 международная конференция по фотонике и информационной оптике, 23-25 января 2019г. НИЯУ МИФИ. Москва. С. 687-688

15. Журавлев С.Д., Сахаджи Г.В., Соколова Т.Н., Шестеркин В.И. Применение лазерного пиролиза для формирования антиэмиссионных покрытий на поверхности металлопористого катода/ Пленки и покрытия – 2019: Труды 14-й международной конференции, 14 мая-16 мая 2019г.// Под редакцией д-ра техн. наук В.Г. Кузнецова. – Спб.: Изд-во Политех. ун-та. 640 с. С.432-437.

16. Журавлев С.Д., Сторублев А.В., Крачковская Т.М., Сахаджи Г.В. Повышение точности определения температуры КСУ в форсированном режиме нагрева. Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей VIII Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019, с. 364-368.

17. Журавлев С.Д., Бессонов Д.А., Попов И.А., Сахаджи Г.В., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л., Шестеркин В.И. Изготовление сеточных электродов из пиролитического графита для мощных импульсных ЛБВ ультракоротким лазерным излучением. Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей VIII Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019, с. 559-562.

18. Журавлев С.Д. Современные источники электронной эмиссии для ламп бегущей волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов / С.Д. Журавлев, Н.А. Бушуев, Т.М. Крачковская, Г.В. Сахаджи // Успехи современные науки. – 2016. – Том 2. - №10. – С. 126-139.

19. Журавлев С.Д., Сахаджи Г.В., Крачковская Т.М., Сторублев А.В., Эффект Пельтье при исследовании эмиссионной способности скандиевого металлопористого катода: сб. ст. IV Всерос. конф. Электроника и микроэлектроника СВЧ, Том 2. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015г., С.300.

20. Журавлев С.Д., Крачковская Т.М., Сахаджи Г.В. Актуальные проблемы катодного производства и пути их решения // «Электронные приборы и устройства СВЧ»: тез. докл. науч.-тех. конф. посвящ. 60-летию АО «НПП «Алмаз» - Саратов: Изд-во ООО «Научная книга». -2017. – С.82-84.

21. Zhuravlev S.D., Krachkovskaya T.M., Sahadji G.V. Modern electron sources for TWTs in millimeter and submillimeter ranges // Zhurnal Radioelektroniki – Journal of Radio Electronics. – 2017. – No. 12. Available at <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/5/text.pdf>

Журавлев Сергей Дмитриевич

**КАТОДНО-СЕТОЧНЫЕ УЗЛЫ С СЕТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО
ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА ДЛЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ
ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __. __. 2020

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ __

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, Политехническая ул., 77

Тел.: 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru