

Исследование и оптимизация бокового катода для магнетронов с холодным вторично-эмиссионным катодом

Н. И. Автомонов, С. В. Сосницкий, Д. М. Ваврив

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: avtomat@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 3 мая 2007 г.

Проведено теоретическое исследование влияния температуры бокового катода на эмитируемый им ток в магнетронах с холодным вторично-эмиссионным катодом. Исследованы различные способы обеспечения режима ограничения тока эмиссии полем пространственного заряда с целью устранения температурной зависимости. Предложена новая конструкция бокового катода, которая должна обеспечить бóльшую температурную стабильность по сравнению с используемой при производстве магнетронов.

1. Введение

Магнетрон является одним из наиболее распространенных устройств для генерации электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона. Его отличительными особенностями, как известно, являются высокий КПД и большая мощность генерируемых колебаний. Важным шагом на пути повышения эффективности магнетронов стало применение комбинации “холодного” вторично-эмиссионного катода и вспомогательного бокового термокатада [1-3] вместо традиционного термокатада, помещаемого на оси магнетрона. Это решение оказалось наиболее востребованным при создании магнетронов миллиметрового диапазона длин волн.

На рис. 1 приведено продольное сечение типичной конструкции магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом. Магнитное поле направлено вдоль оси магнетрона, электрические потенциалы основного и вспомогательного катодов равны.

При запуске магнетрона электроны, эмитируемые боковым катодом, под дейст-

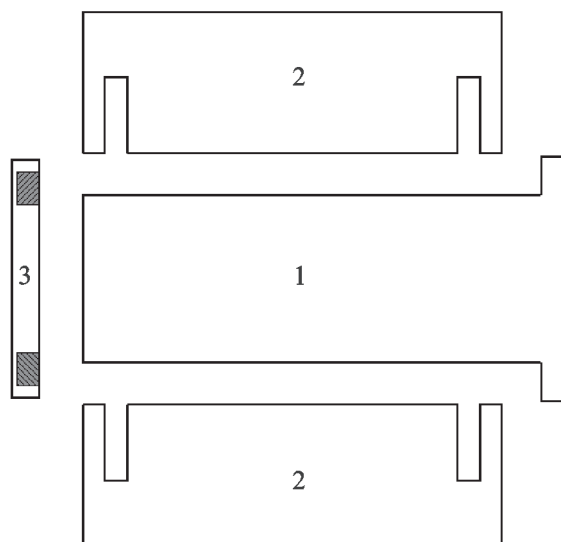


Рис. 1. Исходная геометрия магнетрона: 1 – холодный вторично-эмиссионный катод, 2 – анодный блок с колебательной системой, 3 – боковой термоэмиссионный катод (серым цветом показана эмитирующая область)

вием статических электрического и магнитного полей влетают в пространство взаимодействия магнетрона и создают между анодом и холодным катодом “втулку” – электронное облако, вращающееся вокруг холодного катода. С ростом плотности электронов во втулке развиваются колебания, вызывающие бомбардировку холодного катода и, как следствие, вторичную электронную эмиссию с его поверхности. После того как средний коэффициент вторичной эмиссии становится больше единицы, необходимость в эмиссии со вспомогательного катода пропадает, более того, он может сыграть даже отрицательную роль, ухудшая модуляцию спиц электронного облака. Поскольку коэффициент вторичной эмиссии слабо зависит от температуры, указанный подход позволяет использовать охлаждаемые вторично-эмиссионные катоды, что существенно увеличивает срок их службы.

Следует отметить, что со времени создания первых магнетронов данного типа [4, 5] конструкция бокового термо катода оставалась практически неизменной. К настоящему времени достаточно детально изучены только электронно-волновые процессы, протекающие непосредственно в пространстве взаимодействия таких магнетронов [6, 7]. Кроме того, влияние свойств этого катода на характеристики магнетронов также мало изучены. Вместе с тем из опыта эксплуатации магнетронов известно, что их выходные характеристики могут зависеть от температуры бокового катода.

Целью настоящей работы являлось создание математической модели бокового термо катода магнетронов, исследование особенностей работы используемой конструкции бокового термо катода, а также проведение ее оптимизации и выбор наиболее приемлемых решений для внедрения в магнетроны.

Следует напомнить, что типичная зависимость тока термоэмиссионного катода от температуры имеет вид, приведенный на рис. 2. Здесь можно выделить три рабочие области: 1) режим ограничения тока

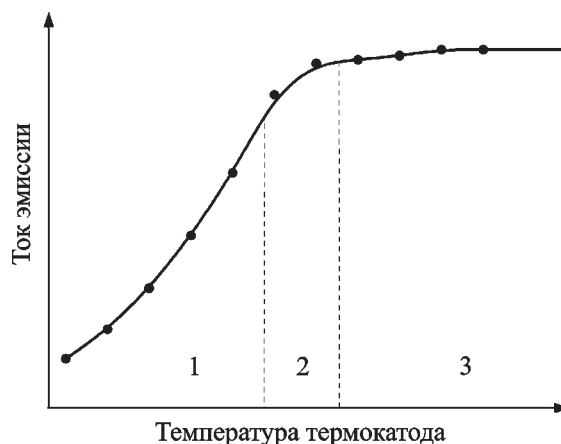


Рис. 2. Типичная зависимость тока эмиссии термоэмиссионного катода от его температуры

температурой, где плотность тока вычисляется по формуле Ричардсона–Дешмана [8]: $j = CT^2 e^{-A/(kT)}$; 2) переходная область; 3) режим ограничения тока пространственным зарядом, где ток практически не зависит от температуры и его величина определяется соотношением Богуславского–Лэнгмюра: $j = BU^{3/2}$.

Оптимальной с точки зрения обеспечения устойчивой работы магнетрона является третья или, в крайнем случае, вторая рабочая область. Как будет показано в статье, в существующей конструкции бокового термо катода реализуется первая рабочая область. Для оптимизации конструкции катода в работе исследуются следующие подходы: 1) размещение бокового катода на большем расстоянии от пространства взаимодействия магнетрона; 2) помещение экранирующей сетки между боковым катодом и пространством взаимодействия; 3) внесение экрана с кольцевым отверстием между боковым катодом и пространством взаимодействия магнетрона; 4) создание экранирующего кольца на боковом катоде.

Все эти подходы анализируются в рамках общей математической модели, которая описана во втором разделе. В третьем

разделе приведены главные результаты по изучению особенности работы различных конструкций катодов, а также по оптимизации их конструкции. Основные выводы изложены в четвертом разделе.

2. Математическая модель

Для теоретического исследования различных конструкций бокового катода необходимо учесть следующие физические процессы и явления. Движение электронов определяется квазистатическими электрическим и магнитным полями. Электрическое поле создается системой осесимметричных электродов и пространственным зарядом. Количество эмитируемых электронов ограничено свойствами материала термокатада и его температурой.

Исследования характеристик боковых термокатодов осуществлялось путем численного моделирования движения и взаимодействия эмитируемых электронов методом крупных частиц [9]. В использованной математической модели электрическое поле предполагалось неоднородным вдоль оси магнетрона и в радиальном направлении, но однородным относительно угловой координаты. Оно вычислялось как решение двумерного уравнения Пуассона с учетом текущих координат макрочастиц методом релаксаций, граничные условия соответствовали рассматриваемым конфигурациям электродов. Магнитное поле также считалось осесимметричным. Оно было рассчитано исходя из геометрии применяемой в магнетронах этого типа магнитной системы.

При моделировании использовались трехмерные уравнения движения электронов, которые решались с помощью метода конечных разностей. Число эмитируемых макрочастиц рассчитывалось в соответствии с эмиссионной способностью бокового катода при исследуемой температуре, а их начальные скорости задавались в соответствии с распределением Ферми $N(V) = 1 / (1 + e^{(mV)/(2kT)})$, приведенном на рис. 3. В процессе моделиро-

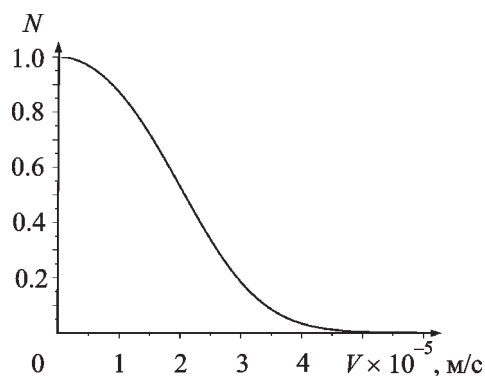


Рис. 3. Распределение эмитируемых частиц по скоростям при температуре катода 1300 К

вания контролировались токи отдельных электродов, а также ток электронов, влетающих в пространство взаимодействия.

3. Результаты численного эксперимента

Все численные эксперименты, если не указано другое, были проведены для магнитного поля напряженностью 0.5875 Тл (в центре магнитной системы) и анодного напряжения 14 кВ, что соответствует типичным рабочим значениям, реализуемым в магнетронах 8-миллиметрового диапазона длин волн. Далее, при обсуждении результатов проведенных расчетов мы использовали следующие понятия. Полезный ток эмиссии (I_0) — та часть тока эмиссии бокового катода, которая дает вклад в образование электронной втулки. Полезный ток эмиссии вычислялся по числу частиц, пересекающих за единицу времени границу пространства взаимодействия. Максимальный ток (I_{\max}) — максимальное значение полезного тока эмиссии, достигаемое при работе бокового катода в режиме ограничения эмиссии полем пространственного заряда. Граничная температура ($T_{\text{гран}}$) — температура, при которой величина полезного тока достигает 95 % величины максимального тока.

Первоначально были проведены исследования характеристик бокового термокатада, который используется в указанных магнетронах. Геометрия такого термокатада в составе магнетрона была приведена на рис. 1. Полученная зависимость полезного тока эмиссии от температуры накала представлена на рис. 4. Видно, что в данном случае режим ограничения тока пространственным зарядом происходит при температуре катода, превышающей 1700 К. С учетом того, что рабочая температура катода в магнетроне обычно равна 1250 К (ее повышение привело бы к сокращению срока службы катода [10]), из полученной зависимости следует, что даже небольшое колебание температуры вызывает значительное изменение тока. Этот эффект может приводить к неустойчивости в работе магнетронов.

Понятно, что для обеспечения устойчивой работы катода и магнетрона необходимо снизить значение температуры катода, при котором происходит ограничение термоэмиссии пространственным зарядом. Далее описаны подходы к решению этой задачи и проведено сравнения их достоинств и недостатков с точки зрения их использования

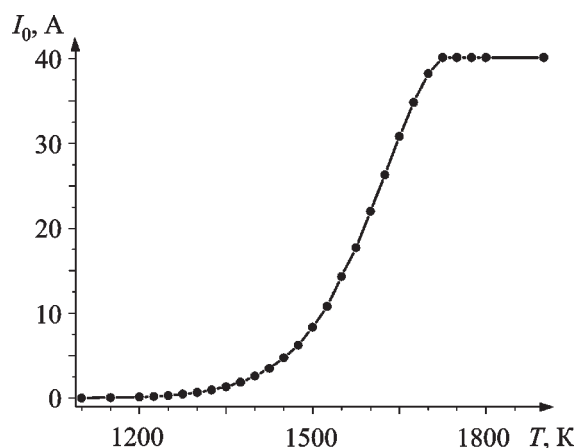


Рис. 4. Зависимость полезного тока эмиссии от температуры накала для исходной конструкции магнетрона

в практических конструкциях магнетронов. Общая идея всех этих подходов заключается в уменьшении напряженности электрического поля электродов, действующего на электроны вблизи поверхности термокатада.

3.1. Размещение термокатада на большем расстоянии от пространства взаимодействия магнетрона

Этот способ основан на том факте, что по мере удаления бокового катода от анода напряженность электрического поля снижается. Таким образом, компенсация электрического поля, наведенного электродами, полем пространственного заряда может достигаться при меньших значениях плотности пространственного заряда, для создания которой требуется меньший ток с термокатада. Это приводит к тому, что уменьшается температура, при которой термокатод начинает работать в режиме ограничения пространственным зарядом. Результаты моделирования этого способа представлены на рис. 5 в виде зависимости граничной температуры от расстояния между термокатодом и пространством взаимодействия магнетрона. Из рисунка видно, что удаление бокового катода от пространства взаимодействия приводит к монотонному умень-

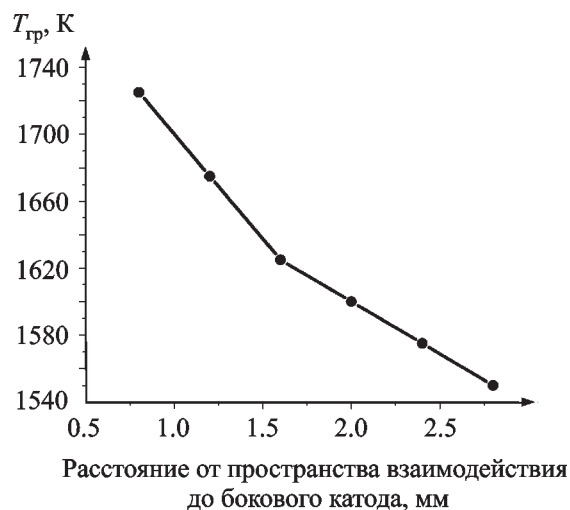


Рис. 5. Зависимость граничной температуры от расстояния между боковым катодом и пространством взаимодействия магнетрона

шению граничной температуры с одновременным уменьшением максимального тока. В принципе данный способ позволяет уменьшить граничную температуру до приемлемого уровня, однако для этого требуется существенно изменить расстояние между катодом и пространством взаимодействия, что приведет к росту осевой длины магнетрона и к необходимости существенного увеличения размеров и веса магнитной системы магнетрона.

3.2. Размещение между термокатодом и пространством взаимодействия магнетрона экранирующей сетки

Для более эффективного по сравнению с предыдущим случаем управления напряженностью электрического поля на эмитирующей поверхности можно поместить между боковым катодом и пространством взаимодействия металлическую сетку, имеющую такой же потенциал, что и оба катода. Нами было проведено моделирование такого решения. Сетка состояла из проволочных колец (диаметр проволоки 0.1 мм) и была расположена на расстоянии 0.8 мм от торца холодного катода. Варьировались расположение бокового катода и шаг сетки (расстояние между кольцами). Из результатов моделирования, представленных на рис. 6 и рис. 7 видно, что использование сетки позволяет добиться существенного уменьшения граничной температуры даже при небольших расстояниях между катодом и пространством взаимодействия. Например, при шаге сетки 0.2 мм и удалении термо катода на 1.8 мм от пространства взаимодействия величина граничной температуры составляет 1250 К, что является приемлемым для практических конструкций магнетрона. Приведенные рисунки иллюстрируют также ожидаемое уменьшение граничной температуры при уменьшении шага сетки и увеличении расстояния от бокового катода до пространства взаимодействия.

К недостаткам данного способа снижения граничной температуры можно отнести усложнение конструкции магнетрона, а также трудности с изготовлением соответствующих сеток.

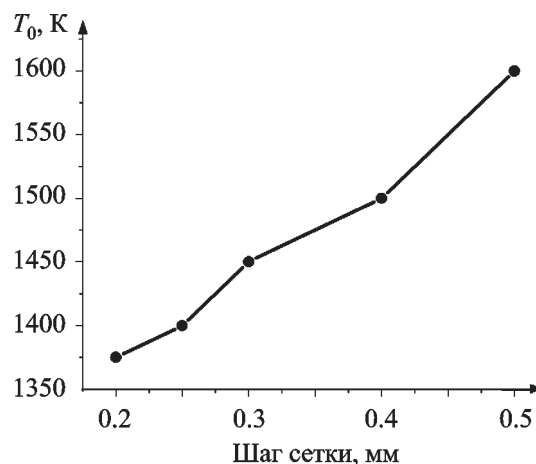


Рис. 6. Зависимость граничной температуры от шага экранирующей сетки (расстояние от сетки до бокового катода 1 мм)

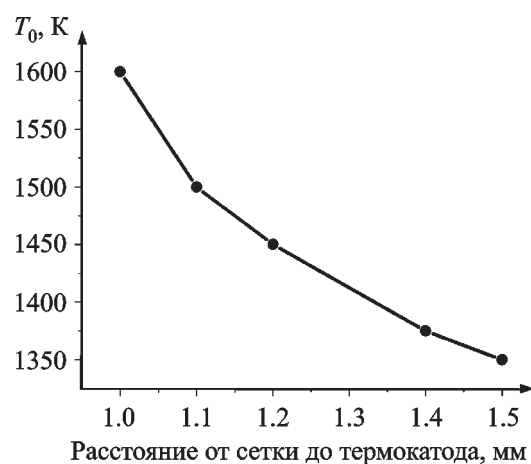


Рис. 7. Зависимость граничной температуры от расстояния между экранирующей сеткой и боковым катодом (шаг сетки 0.5 мм)

3.3. Размещение металлического экрана между вспомогательным катодом и пространством взаимодействия магнетрона

Технологически более простым, по сравнению с внесением сетки, способом снижения напряженности электрического поля на эмитирующей поверхности вспомогательного катода может служить использование сплошного экрана с кольцевым от-

верстием. Возможное решение показано на рис. 8. Управляющими параметрами такой геометрии являются расстояние между боковым катодом и экраном, расстояние между боковым катодом и пространством взаимодействия магнетрона, внутренний и внешний радиусы отверстия.

На рис. 9 представлена зависимость граничной температуры от расстояния между термокатодом и пространством взаимодействия магнетрона. На рис. 10 показана зависимость граничной температуры от внешнего радиуса кольцевого отверстия.

Из приведенных результатов следует, что чем больше экран перекрывает боковой катод, тем меньше температура, при которой возникает режим ограничения тока пространственным зарядом. Очевидно, что это обусловлено уменьшением напряженности поля, создаваемого анодом вблизи термо катода.

На рис. 11 представлены зависимости граничной температуры от расстояния между экраном и пространством взаимодействия магнетрона. Эти зависимости показывают, что по мере приближения экрана с фиксированной геометрией коль-

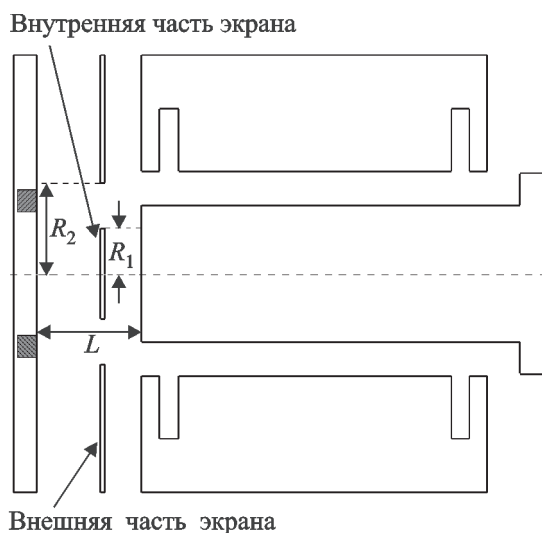


Рис. 8. Расположение металлического экрана с кольцевым отверстием

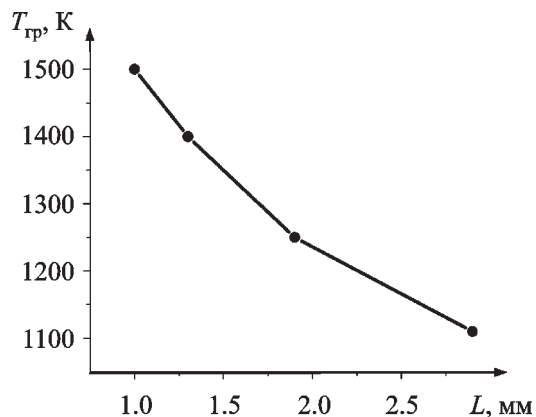


Рис. 9. Зависимость граничной температуры от расстояния между боковым катодом и пространством взаимодействия для случая применения металлического экрана

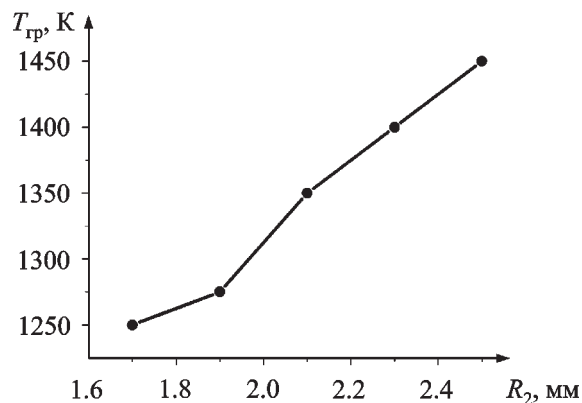


Рис. 10. Зависимость граничной температуры от внешнего радиуса кольцевого отверстия для случая металлического экрана

цевого отверстия к пространству взаимодействия его влияние на эмиссию бокового катода уменьшается. Максимальное приближение экрана к пространству взаимодействия магнетрона ограничено пробоем между экраном и анодом.

Приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что при помощи металлического экрана с кольцевым отверстием можно добиться работы вспомогательного катода при приемлемых значениях рабочей температуры. Такое решение является от-

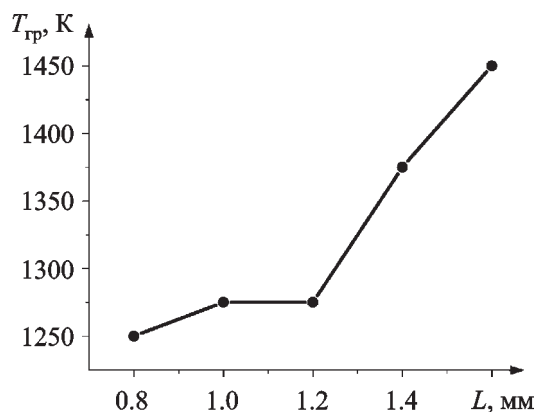


Рис. 11. Зависимость граничной температуры от расстояния между экраном и пространством взаимодействия магнетрона для случая металлического экрана

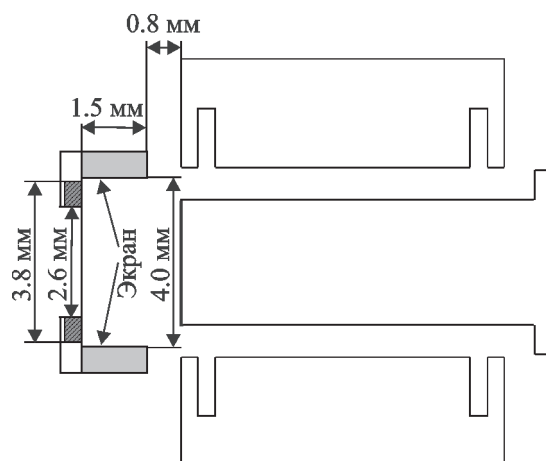


Рис. 12. Конструкция бокового катода, рекомендуемая для натурных испытаний

носителем простым с точки зрения практической реализации и может использоваться в конструкциях магнетронов. Однако, как будет показано ниже, существует еще более простое решение рассматриваемой проблемы.

3.4. Размещение экранирующего кольца на поверхности вспомогательного катода

Одной из проблем при изготовлении магнетронов с экранирующими электродами может стать потребность в деталях, которые удерживают эти электроды в нужном положении, а также обеспечивают электрический контакт между ними и одним из катодов с целью обеспечения равенства потенциалов. Эта проблема отсутствует в том случае, если экранирующий электрод расположен непосредственно на одном из катодов. Нами был исследован случай, когда экран имеет форму цилиндра (см. рис. 12).

Результаты моделирования показали, что данная конструкция позволяет добиться работы бокового катода в режиме ограничения тока эмиссии пространственным зарядом при достаточно низких температурах катода. Поскольку модификация явля-

ется самой простой с точки зрения технологии производства, именно ее целесообразно испытать в действующих приборах. Рекомендуемые для этого геометрические параметры указаны на рис. 12. Расчетная зависимость полезного тока от температуры для этих параметров приведена на рис. 13, где она сравнивается с результатами расчета для исходной конструкции бокового катода. При использовании модифицированного бокового катода с рабочей температурой $T = 1250$ К ток эмиссии практически не зависит от температуры, в то время как в исходной конструкции изменение температуры на 10 К приводит к изменению тока эмиссии на $15 \div 20$ %. При этом, как видно из рис. 14, зависимость полезного тока от анодного напряжения для этой геометрии вспомогательного катода также относительно невелика при рабочих напряжениях магнетрона в окрестности 14 кВ.

4. Выводы

Проведенное теоретическое исследование работы вспомогательного катода в магнетронах с холодным вторично-эмиссионным катодом показало, что термо-

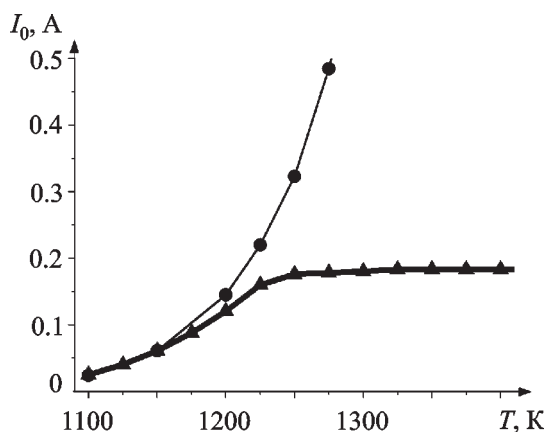


Рис. 13. Зависимость полезного тока от температуры для исходной и модифицированной конструкций магнетрона

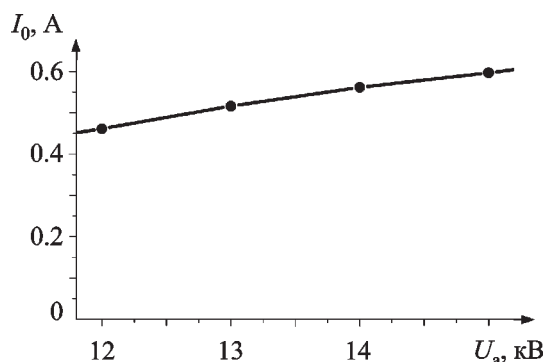


Рис. 14. Зависимость полезного тока от анодного напряжения при температуре 1300 K

электронная эмиссия бокового катода в существующих приборах не ограничена полем пространственного заряда, что приводит к температурной нестабильности в работе магнетронов.

Продемонстрировано, что существуют возможности изменения геометрии прибора таким образом, чтобы ток вспомогательного катода ограничивался пространственным зарядом и не зависел от температуры. Наиболее эффективным способом является экранирование вспомогательного катода дополнительными электродами. Наиболее простой, с точки зрения изготовления,

способ – создание экранирующего кольца на самом боковом катоде.

В работе предложены размеры вспомогательного катода и экранирующего кольца, при которых ток стабилизируется на величине 0.18 А при температуре порядка 1250 К. Эта конструкция рекомендована для натурных испытаний.

Литература

1. Бабенко М. И., Вигдорчик И. М. Магнетрон с боковым катодом // Труды ИРЭ АН УССР. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР. – 1961. – Т. 9. – С. 150-162.
2. Вигдорчик И. М., Мянд В. А., Науменко В. Д. Некоторые особенности работы магнетрона на инжектированных электронах // Труды ИРЭ АН УССР. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР. – 1970. – Т. 18. – С. 22-32.
3. Вигдорчик И. М., Науменко В. Д., Тимофеев В. П. Импульсные магнетроны с холодным вторично-эмиссионным катодом // Доклады АН УССР. Сер. А. – 1975. – №7. – С. 633-636.
4. Пирс Дж. Р. Теория и расчет электронных пучков. – М.: Сов. радио, 1956. – 216 с.
5. Мельников А. И. Металлопористые термоэмиссионные катоды // Вопросы радиоэлектроники. Электроника. – 1965. – №7. – С. 168-180.
6. Schünemann K., Sosnytskiy S. V. and Vavriv D. M. Self-consistent simulation of the spatial-harmonic magnetron with cold secondary-emission cathode // IEEE Trans. Electron Devices. – 2001. – Vol. 48, No. 5. – P. 993-998.
7. Ваврив Д. М., Сосницкий С. В. Нестационарная теория магнетронов на пространственной гармонике с холодным катодом // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 6, №1. – С. 131-141.
8. Евстигнеев С. И., Ткаченко А. А. Катоды и подогреватели электровакуумных приборов. – М.: Высшая школа, 1975. – 197 с.
9. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 157 с.
10. Дмитриева В. Н., Марычева З. Н., Шапкин В. Ф., Шапкина С. И. Сравнительные данные о свойствах бариево-кальциевых алюминатных и алюмосиликатных катодов // Электронная техника. Электроника СВЧ. – 1969. – №1. – С. 159-166.

**Дослідження та оптимізація бокового
катоду для магнетронів з холодним
вторинно-емісійним катодом**

**М. І. Автомонов, С. В. Сосницький,
Д. М. Ваврив**

Теоретично досліджено вплив температури бокового катоду на емітований ним струм у магнетронах з холодним вторинно-емісійним катодом. Досліджено різні засоби забезпечення режиму обмеження струму емісії полем просторового заряду з метою усунення температурної залежності. Запропоновано нову конструкцію бокового катоду, яка має забезпечити кращу температурну стабільність порівняно з використовуваною у виготовленні магнетронів.

**Investigation and Optimization
of Auxiliary Cathode for Secondary
Emission Cold-Cathode Magnetrons**

**N. I. Avtomonov, S. V. Sosnytskiy,
and D. M. Vavriv**

Temperature dependence of the auxiliary cathode emission current in magnetrons with cold secondary-emission cathodes is investigated theoretically. Different methods of providing a spatial-charge limited emission from the auxiliary cathode are studied to eliminate the temperature dependence. A new design of the auxiliary cathode is proposed which is supposed to provide a better temperature stability as compared to that used in currently manufactured magnetrons.