

УДК 621.385.64

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БОКОВОГО КАТОДА ДЛЯ МАГНЕТРОНОВ С ХОЛОДНЫМ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

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

Радиоастрономический институт НАН Украины, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Поступила в редакцию 14 декабря 2009

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнетрон, катод, термокатод, термоэмиссия, температура.

Проведено теоретичне дослідження впливу температури допоміжного бокового катода на струм, що він емітує, у магнетронах з холодним вторинно-емісійним катодом. Досліджено різні засоби забезпечення режиму обмеження струму емісії допоміжного термокатоду полем просторового заряду з метою усунення температурної залежності вихідних характеристик магнетрону. Запропоновано нову конструкцію бокового катода, яка має забезпечити більшу температурну стабільність порівняно з конструкцією, що використовується при виготовленні магнетронів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: магнетрон, катод, термокатод, термоемісія, температура

A theoretical investigation of the emission current temperature dependence of the auxiliary cathode in magnetrons with cold secondary-emission cathodes is performed. Different methods of providing a spatial-charge limited emission from the auxiliary cathode are studied in order to eliminate the temperature dependence of auxiliary cathode thermionic current. A new design of the auxiliary cathode is proposed, which is supposed to provide a greater stability with respect to the cathode temperature variations as compared to the currently manufactured magnetrons.

KEY WORDS: magnetron, cathode, thermionic cathode, thermo emission, temperature.

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 дальнейшего повышения эффективности магнетронов стало применение комбинации "холодного" вторично-эмиссионного катода и вспомогательного бокового термокатода [1–3] вместо традиционного термокатода, помещаемого по 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 действием 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, ток со вспомогательного катода перестает быть нужным, и может сыграть даже отрицательную роль, ухудшая модуляцию спиц электронного облака. Поскольку коэффициент вторичной эмиссии слабо зависит от температуры, то указанный подход позволяет использовать охлаждаемые вторично-эмиссионные катоды, что существенно увеличивает срок их службы.

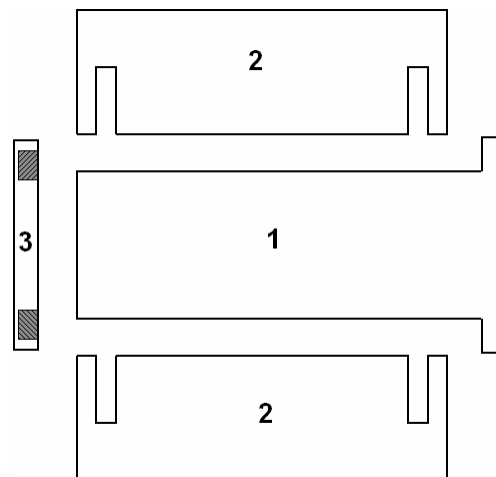


Рис. 1. Исходная геометрия магнетрона: 1 – холодный вторично-эмиссионный катод, 2 – анодный блок с колебательной системой, 3 – боковой термоэмиссионный катод (серым цветом показана эмитирующая область)

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

Ранее считалось, что из-за расположения вспомогательного термокатода вне пространства взаимодействия магнетрона, он в незначительной степени подвержен обратной бомбардировке электронами. Однако, более подробные исследования [8] показали, что вследствие бомбардировки вспомогательного термокатода электронами его температура может меняться достаточно сильно. Это приводит к вариациям тока эмиссии термокатода и уменьшению срока его службы, так как при слишком высокой температуре активное вещество испаряется с поверхности термокатода значительно быстрее. В связи с этим возникла необходимость проведения исследования поведения вспомогательного термокатода в магнетроне при различных температурных режимах и при различной геометрии прибора.

Целью данной работы являлось создание математической модели бокового термокатода магнетронов, исследование особенностей работы используемой конструкции бокового термокатода, а также проведение оптимизации конструкции таких катодов и выбор наиболее приемлемых решений для внедрения в практические магнетроны.

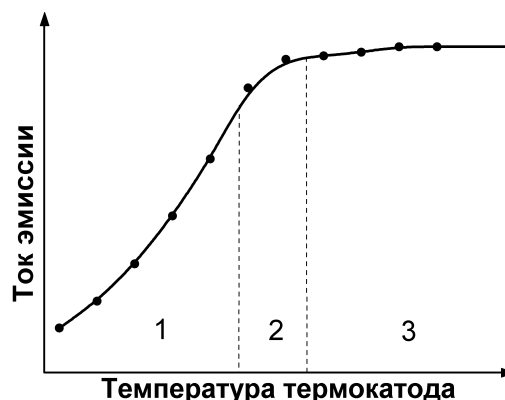


Рис. 2. Типичная зависимость тока эмиссии термоэмиссионного катода от его температуры.

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 температурой, где плотность тока вычисляется по формуле Ричардсона-Дешмана [9]: $j = CT^2 e^{-A/(kT)}$; 2) переходная область; 3) режим ограничения тока пространственным зарядом, где ток практически не зависит от температуры и его величина определяется соотношением Богуславского-Лэнгмюра: $j = BU^{3/2}$.

Оптимальными с точки зрения обеспечения устойчивой работы магнетрона являются третья или, в крайнем случае, вторая рабочие области. Как будет показано в данной статье, в существующей конструкции бокового термокатода 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 между боковым катодом и пространством взаимодействия экранирующей сетки; 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 в соответствующем разделе.

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 термокатода и его температурой.

Для исследования характеристик боковых термокатодов была разработана модель, которая позволяет рассчитывать токи электродов в магнетроне при различных конфигурациях электродов и разных параметрах термоэмиссии (в том числе и при изменяющейся температуре). Численное моделирование движения и взаимодействия эмитируемых электронов осуществлялось методом крупных частиц [10]. В использованной математической модели электрическое поле предполагалось неоднородным вдоль оси магнетрона и в радиальном направлении, но однородным относительно угловой координаты. Это допущение правомерно при рассмотрении запуска магнетрона, поскольку изменения СВЧ-поля по угловой координате в начале запуска магнетрона оказывают пренебрежимо малое влияние на движение электронов ввиду малой амплитуды этого поля.

Суммарное электрическое поле вычислялось как решение двумерного уравнения Пуассона (1) с учетом текущих координат макрочастиц методом релаксаций].

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = -\rho(x, z) \quad (1)$$

Согласно этому методу, посредством многократного итеративного применения выражения (2) вдоль каждой из координат, определяется значение потенциала поля пространственного заряда.

$$\Phi_i = \frac{1}{2} (\Phi_{i+1} + \Phi_{i-1} + h^2 \rho_i) \quad (2)$$

где h – шаг сетки ($x_i = ih, y_j = jh$),

ρ_i – плотность пространственного заряда.

Учитывая, что это поле изменяется не слишком быстро, в качестве начального приближения для метода релаксаций использовалось значение потенциалов на предыдущем шаге по времени, что позволило значительно ускорить процесс расчета. Граничные условия для вычисления электрического поля соответствовали рассматриваемым конфигурациям электродов.

Для нахождения плотности пространственного заряда использовался метод “облако в ячейке” [11], согласно которому заряд макрочастицы с координатами z_j, r_j распределяется между ближайшими узлами сетки согласно следующим выражениям:

$$\begin{aligned} q_{ik} &= (1-a)(1-b)q_0 \\ q_{i+1,k} &= a(1-b)q_0 \\ q_{i,k+1} &= (1-a)bq_0 \\ q_{i+1,k+1} &= abq_0 \end{aligned} \quad (3)$$

где $a = (z_j - z_i) / \Delta z$, $b = (r_j - r_i) / \Delta r$.

Магнитное поле также считалось осесимметричным, что вполне соответствует магнитному полю в реальных приборах. Оно было рассчитано исходя из геометрии магнитной системы, используемой в магнетронах этого типа.

При моделировании трехмерные уравнения движения электронов решались с помощью метода конечных разностей.

Число эмитируемых макрочастиц рассчитывалось в соответствии с эмиссионной способностью бокового катода при заданной температуре, а их начальные скорости задавались в соответствии с распределением Ферми: $N(V) = 1 / (1 + e^{mV / (2kT)})$, приведенном на рис. 3.

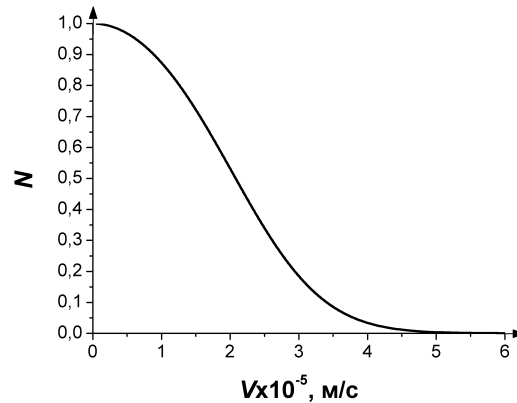


Рис. 3. Распределение эмитируемых частиц по скоростям при температуре катода 1300 К.

Схематическое представление данной модели изображено на рис. 4.

В процессе моделирования контролировались токи отдельных электродов, а также рассчитывался ток электронов, влетающих в пространство взаимодействия при различных температурах накала термокатаода.

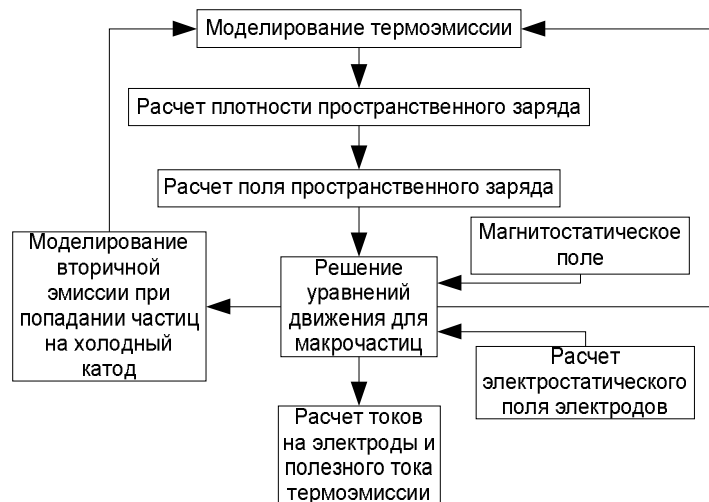


Рис. 4. Схема алгоритма модели вспомогательного термокатаода в магнетроне.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Все численные эксперименты, если не указано другое, были проведены для магнитного поля напряженностью 0.5875 Т (в центре магнитной системы) и анодного напряжения 14 кВ, что соответствует типичным рабочим значениям, реализуемым в магнетронах 8-ми миллиметрового диапазона длин волн. Далее, при обсуждении результатов проведенных расчетов мы будем использовать 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 термокатода, который используется в указанных магнетронах. Геометрия такого термокатода в составе магнетрона была приведена выше на рис. 1. Полученная зависимость полезного тока эмиссии от температуры накала представлена на рис. 5. Видно, что в данном случае режим ограничения тока пространственным зарядом происходит при температурах катода, превышающих величину 1700 К. Учитывая, что рабочая температура катода в магнетроне обычно равна 1250 К (её повышение привело бы к сокращению срока службы катода [12]), то из полученной зависимости следует, что даже небольшое колебание температуры приводит к значительному изменению тока. Этот эффект может приводить к неустойчивости в работе магнетронов.

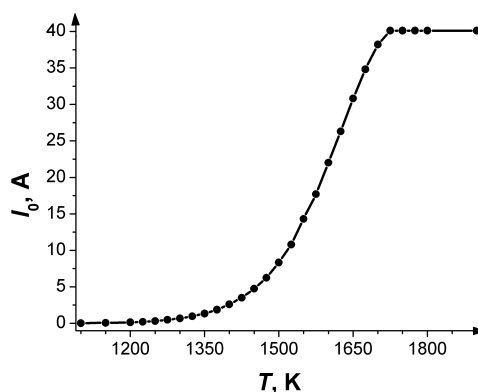


Рис. 5. Зависимость полезного тока эмиссии от температуры накала для исходной конструкции магнетрона.

Понятно, что для обеспечения устойчивой работы катода и магнетрона необходимо снизить значение температуры катода, при котором происходит ограничение термоэмиссии пространственным зарядом. Далее описано несколько подходов для решения этой задачи и проведено сравнения их достоинств и недостатков с точки зрения из использования в практических конструкциях магнетронов. Общая идея всех этих подходов заключается в уменьшении напряженности электрического поля электродов, действующего на электроны вблизи поверхности термокатода.

Размещение термокатода 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 и меньший ток с термокатода. Это приводит к тому, что уменьшается температура, при которой термокатод начинает работать в режиме ограничения пространственным зарядом. Результаты моделирования для этого способа представлены на рис. 6, представлена зависимость граничной температуры от расстояния между термокатодом и пространством взаимодействия магнетрона. Из рисунка видно, что удаление бокового катода от пространства взаимодействия приводит к монотонному уменьшению граничной температуры с одновременным уменьшением максимального тока. В принципе, данный способ позволяет уменьшить граничную температуру до приемлемого уровня, однако для этого требуется существенно увеличивать расстояние между катодом и пространством взаимодействия. Это приводит к увеличению осевой длины магнетрона и к необходимости существенного увеличения размеров и веса магнитной системы магнетрона.

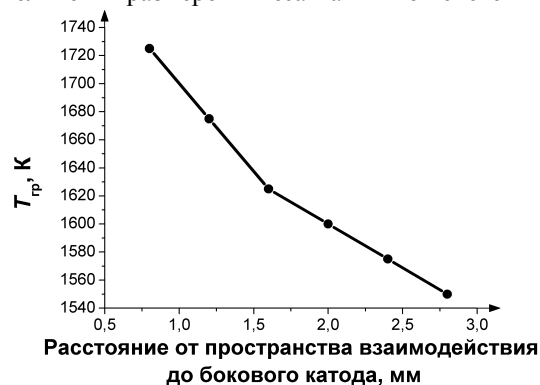


Рис. 6. Зависимость граничной температуры от расстояния между боковым катодом и пространством взаимодействия магнетрона.

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 были проведены моделирования такого решения при использовании проволочной сетки с диаметром проволоки 0.1 мм. Сетка состояла из проволочных колец 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. 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 при 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 также иллюстрируют 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 сложности с изготовлением соответствующих сеток.

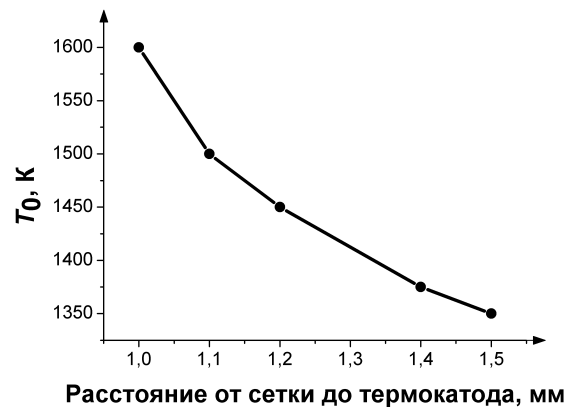


Рис. 7. Зависимость граничной температуры от расстояния между экранирующей сеткой и боковым катодом (шаг сетки 0.5 мм).

Размещение между вспомогательным катодом и пространством взаимодействия магнетрона металлического экрана.

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 отверстием. Возможное решение показано на рис. 8.

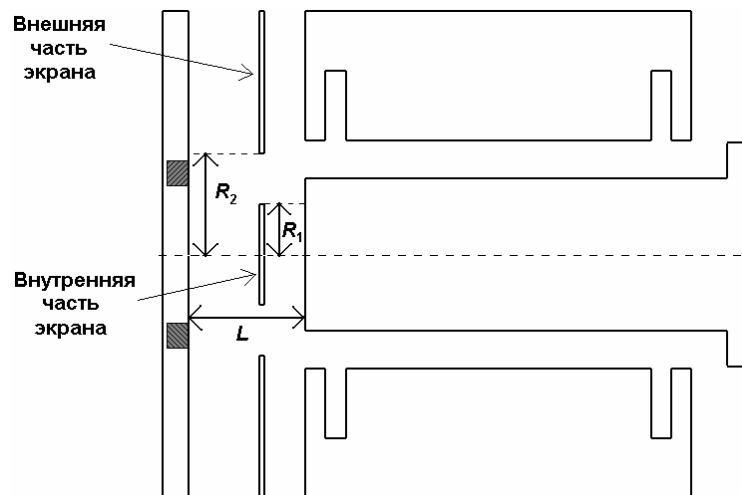


Рис. 8. Расположение металлического экрана с кольцевым отверстием.

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

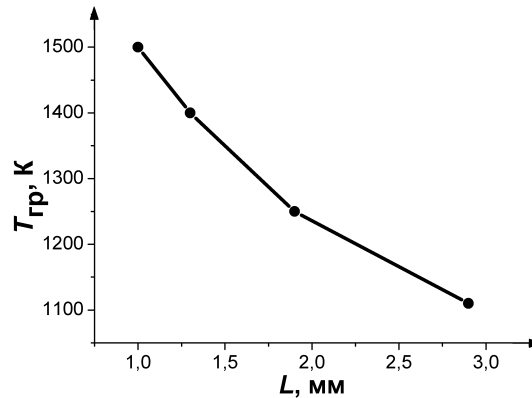


Рис. 9. Зависимость граничной температуры от расстояния между боковым катодом и пространством взаимодействия для случая применения металлического экрана.

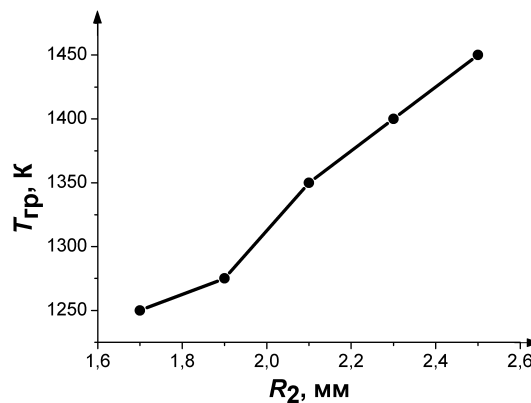


Рис. 10. Зависимость граничной температуры от внешнего радиуса кольцевого отверстия для случая металлического экрана.

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 термокатода.

На рис. 11 приведена зависимость граничной температуры от расстояния между экраном и пространством взаимодействия магнетрона.

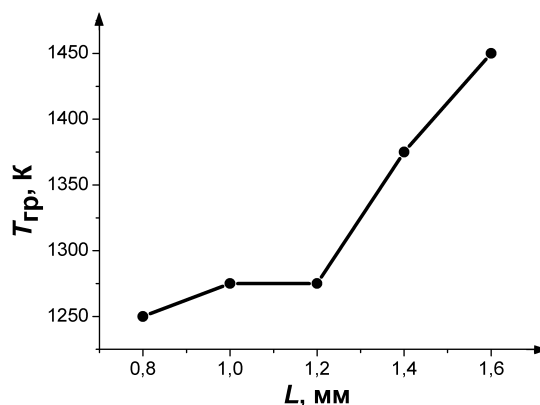


Рис. 11. Зависимость граничной температуры от расстояния между экраном и пространством взаимодействия магнетрона для случая металлического экрана.

Эта зависимость показывает, что по мере приближения экрана с фиксированной геометрией кольцевого 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 результаты свидетельствуют о том, что при помощи металлического экрана с кольцевым отверстием можно добиться работы вспомогательного катода при приемлемых значениях как рабочей температуры. Данное решение является относительно простым с точки зрения практической реализации и может использоваться в практических конструкциях магнетронов. Однако, как будет показано в следующем разделе, существует еще более простое решение рассматриваемой проблемы.

Размещение экранирующего кольца на поверхности вспомогательного катода.

Одной из проблем при изготовлении магнетронов с экранирующими электродами может стать необходимость 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, как это показано на рис. 12.

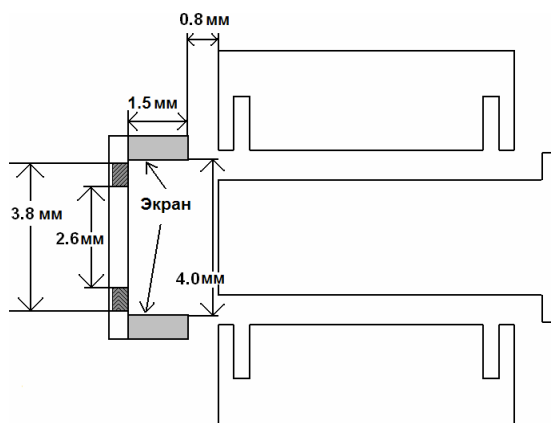


Рис. 12. Рекомендуемая для натурных испытаний конструкция бокового катода.

Результаты моделирования показали, что данная конструкция позволяет добиться работы бокового катода в режиме ограничения тока эмиссии пространственным зарядом при достаточно низких температурах катода. Поскольку данная модификация является самой простой с точки зрения технологии производства, то именно её 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.

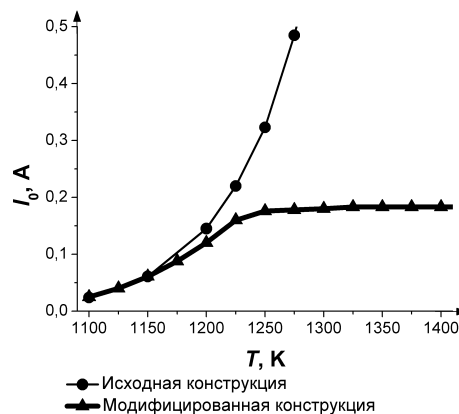


Рис. 13. Зависимость полезного тока от температуры для исходной и модифицированной конструкций магнетрона.

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 15-20%. При этом, как видно из рис. 14, зависимость полезного тока от анодного напряжения для этой геометрии вспомогательного катода также относительно невелика для рабочих напряжений магнетрона в окрестности 14 кВ.

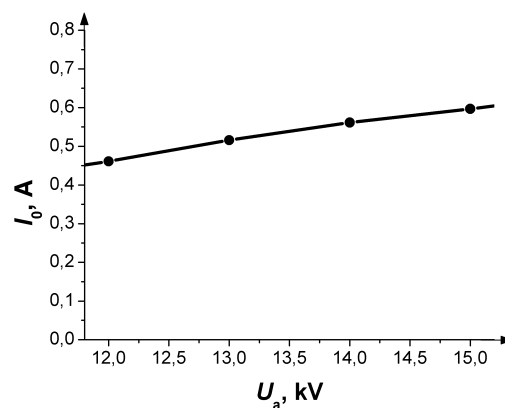


Рис. 14. Зависимость полезного тока от анодного напряжения при температуре 1300 К.

ВЫВОДЫ.

Проведенное теоретическое исследование работы вспомогательного катода в магнетронах с холодным вторично-эмиссионным катодом показало, что термоэлектронная эмиссия бокового катода в существующих приборах не ограничена полем пространственного заряда, что приводит к температурной нестабильности в работе магнетронов.

Показано, 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 же 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабенко М.И., Вигдорчик И.М. Магнетрон с боковым катодом. // Тр. ИРЭ АН УССР, Харьков 1961, 9, с. 150-162.
2. Вигдорчик И.М., Мянд В.А., Науменко В.Д. Некоторые особенности работы магнетрона на инжектированных электронах. // Тр. ИРЭ АН УССР, Харьков 1970, 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. 1956 216 с.

5. Мельников А.И. Металлопористые термоэмиссионные катоды. // Вопросы радиоэлектроники. Электроника, № 7. 1965. 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 Transactions on 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. Науменко В.Д, Суворов А. Н., Сыров А. Р. Исследование температурного режима стартового катода в магнетроне миллиметрового диапазона. // Радиофизика и электроника. - 2003, Вып. 8, №1, с. 99-101.
9. Евстигнеев С.И., Ткаченко А.А. Катоды и подогреватели электровакуумных приборов. М. 1975, 197 с.
10. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. Пер. с англ. М. Мир, 1987.
11. Поршнева С. В. Методика использования пакета Mathcad для изучения итерационных методов решения краевых задач для двумерных эллиптических уравнений. // Вычислительные методы и программирование. - 2001. - Вып. 2, С. 714-721.
12. 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, №1. 1969. с.159-166.

© Автомонов Н.И., Ваврив Д.М., Сосницкий С.В., 2009