

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ТИПА ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННОГО КАТОДА ДЛЯ МАГНЕТРОНА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В. Д. Науменко, А. Н. Суворов, В. А. Марков, А. Е. Моисеенко, Р. В. Науменко

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

Изложены результаты изучения длительной работы магнетронов на частоту 95 ГГц с вторично-эмиссионными катодами различных типов. Показано, что несмотря на большое влияние режима работы магнетрона на вторично-эмиссионные свойства катода, длительная (тысячи часов) работоспособность магнетрона может быть обеспечена не только с платиновыми, но и с другими типами катодов. Ил. 7. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: магнетрон, вторично-эмиссионный катод, эмиссия.

Как известно, одна из основных проблем при разработке импульсных магнетронов сантиметрового (см) и особенно миллиметрового (мм) диапазонов обусловлена необходимостью рассеяния на катоде значительной мощности обратной бомбардировки. В связи с этим большое внимание уделяется исследованию и практическому применению магнетронов с вторично-эмиссионными катодами (ВЭК) [1–11]. В процессе исследований выяснилось, что использование ВЭК в магнетронах мм диапазона действительно позволяет существенно улучшить такие их характеристики, как долговечность и среднюю выходную мощность [3–6]. В то же время до сих пор недостаточно изучены некоторые особенности работы таких магнетронов, знание которых необходимо при разработке реальных конструкций магнетронов, пригодных к использованию в радиотехнической аппаратуре. К таким вопросам следует отнести, в частности, стабильность вторично-эмиссионных свойств катодов при длительной работе и их влияние на выходные характеристики. Особенно актуальна эта проблема для магнетронов, в которых для возбуждения вторичной эмиссии используется вспомогательный термокатод. Как показали наши исследования [7], барий, испаряющийся со вспомогательного термо катода, может откладываться на основном катоде, изменяя его вторично-эмиссионные свойства. Образование монослоя бария на поверхности материалов, обладающих низким коэффициентом вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ), может значительно улучшить их вторично-эмиссионные свойства. В то же время известно [10], что уже при напылении 4...6 монослоев КВЭЭ может упасть до значений, меньших единицы, что сделает работу магнетрона с вторично-эмиссионным основным катодом невозможной. Характер и динамика этих процессов во многом определяют долговечность приборов. Очевидно, что без достаточного понимания сути этих процессов создание магнетронов мм диапазона с

долговечностью более 10 000 ч окажется невозможным.

1. Результаты долговременных испытаний магнетронов. Длительные испытания магнетронов с холодными ВЭК и стартовыми термо катодами показали, что в зависимости от состояния магнетронов (главным образом вакуумного состояния), а также от режима работы приборы ведут себя по-разному.

Недостаточно обезгаженные приборы часто выходили из строя после нескольких десятков, в лучшем случае сотен часов работы. Как правило, они переставали запускаться из-за потери эмиссии вспомогательного катода. Однако в некоторых случаях магнетрон перестает запускаться, несмотря на ток эмиссии вспомогательного катода, в несколько раз превышающий необходимый. Как правило, это происходит при попытках восстановить эмиссию катода за счет повышения его температуры. Скорее всего, при этом происходит напыление толстого слоя бария на холодный основной катод. Иногда этот слой удается удалить, если можно снизить накал, сохранив протекание тока через магнетрон хотя бы на спаде импульса. Один из магнетронов с восстановленной таким способом работоспособностью проработал еще несколько тысяч часов.

На рис. 1, 2 и 3 показаны режимы работы и изменение некоторых параметров в процессе длительных испытаний магнетронов 3-мм диапазона соответственно с платиновым, молибденовым и медным катодом. Испытания проводились по нестандартным методикам с целью изучить особенности поведения приборов подобного типа при длительной работе, а не определить долговечность прибора в том или ином режиме работы, а изучить особенности поведения приборов подобного типа при длительной работе.

Магнетрон с платиновым катодом первые 5 000 ч работал при длительности выходного импульса 20 нс, частоте повторения 20 кГц и анодном напряжении 8 260 В, отдавая при этом

мощность около 1 300 Вт в импульсе. В процессе испытаний выяснилось, что поддерживать постоянно этого режима в течение столь длительного срока достаточно сложно. Длительность импульса и другие параметры генератора с течением времени по разным причинам изменяются. Подробный анализ этих причин выходит за рамки данной работы. Отметим лишь, что основной вклад вносили температурные изменения выходной мощности и длительности импульса.

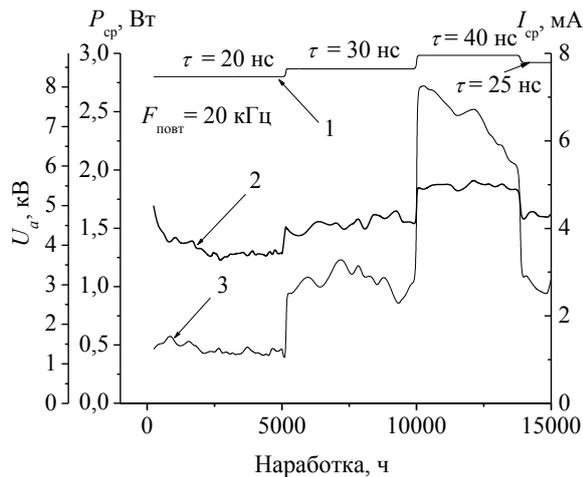


Рис. 1. Изменения анодного напряжения U_a (кривая 1), среднего тока I_{cp} (кривая 2) и средней мощности P_{cp} (кривая 3) при испытаниях магнетрона с платиновым катодом

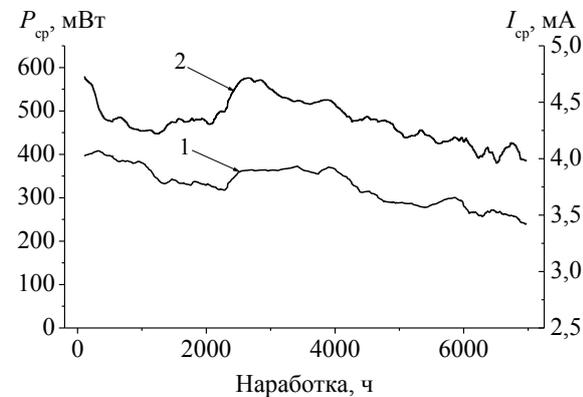


Рис. 2. Изменения среднего тока I_{cp} (кривая 1) и средней мощности P_{cp} (кривая 2), при испытаниях магнетрона с молибденовым катодом

Для обеспечения большей стабильности режима была увеличена длительность импульса с 20 до 30 нс. Кроме того, выходная импульсная мощность была увеличена примерно до 1,5 кВт, что было достигнуто путем увеличения анодного напряжения с 8 260 до 8 460 В. После того как магнетрон отработал в этом режиме 5 000 ч, нагрузка магнетрона еще раз была увеличена. В этот раз длительность импульса была доведена до 40 нс, а импульсная выходная мощность –

до 3 кВт. Видно, что вскоре после того, как магнетрон был переведен в режим работы с длительностью импульса 40 нс при анодном напряжении 8 800 В, выходная мощность магнетрона начала медленно падать и за 3 800 ч снизилась примерно на 25 %. После этого выходную мощность пришлось понизить до 2 кВт путем снижения напряжения до 8 620 В из-за пропусков импульсов, обусловленных переходом на генерацию более высоковольтного вида колебаний. Необходимо отметить, что в процессе длительной работы эмиссионная способность вспомогательного катода понемногу уменьшалась, что приводило к необходимости время от времени увеличивать мощность накала.

После достижения 15 000 ч общей наработки испытания были прекращены, хотя магнетрон оставался работоспособным.

При испытаниях этого магнетрона использовалась автоматическая регулировка мощности накала стартового катода с тем, чтобы поддерживать его температуру на минимально необходимом уровне. Регулировку осуществлял встроенный микроконтроллер испытательного стенда по заданному алгоритму. В качестве критерия использовалась величина среднего анодного тока. При этом наблюдались сбои в работе автомата, обусловленные большой инерционностью процесса изменения свойств термокатада и, вероятно, ВЭК при изменении мощности накала. По-видимому, необходимо подобрать более подходящий критерий для работы автомата регулирования мощности накала. В качестве такого критерия может быть выбрано количество пропусков импульсов или сокращение их длительности. Однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

Магнетрон с неохлаждаемым молибденовым основным катодом испытывался в постоянном режиме 20 нс, 20 кГц, 11 кВ. Кроме колебаний выходной мощности вокруг некоторого среднего значения наблюдалась также общая тенденция к некоторому снижению этого среднего значения. К концу испытаний оно составило около 20 %. Средний анодный ток за тоже время уменьшился на 10 %.

Этот магнетрон почти все время работал при постоянной мощности накала, которая изначально была выбрана примерно на 10 % больше минимально необходимой. Хотя долговечность при этом оказалась значительно меньше, это уменьшение в некоторых случаях может быть оправдано упрощением источника питания накала.

Необходимость изменения накала в течение срока службы возникает по той причине, что стартовый катод работает в режиме ограничения тока эмиссии температурой. Проблема будет

решена, если удастся найти конфигурацию электродов, при которой катод будет работать в режиме ограничения пространственным зарядом.

На рис. 3 показано изменение параметров магнетрона 3-мм диапазона с медным ВЭК. Испытания проводились с целью определения возможности длительной работы магнетрона с таким катодом.

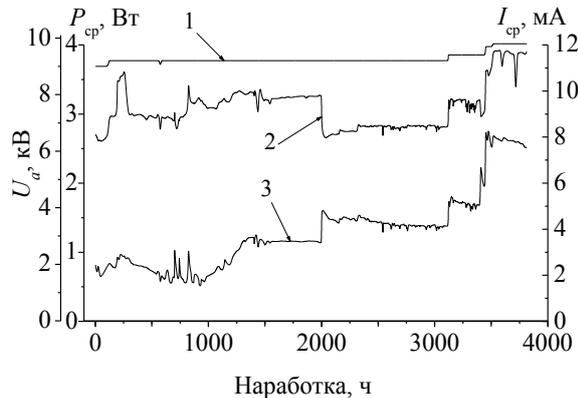


Рис. 3. Изменения анодного напряжения U_a (кривая 1), среднего тока I_{cp} (кривая 2) и средней мощности P_{cp} (кривая 3) при испытаниях магнетрона с медным катодом

При наработке 291 ч был установлен режим с частотой повторения 10 кГц и длительностью 100 нс. В этом режиме началось медленное падение средней выходной мощности: с 947 мВт к 574 ч мощность упала до 516 мВт, т. е. почти вдвое. Наблюдавшееся при этом сокращение длительности иногда до 80 нс никак не может объяснить такое падение средней мощности. Многократные попытки восстановить прежний уровень мощности путем центровки катода успеха не имели. Мощность удавалось увеличить на короткое время, а затем она снова падала. Изменением накала также не удавалось стабилизировать уровень выходной мощности.

Начиная со времени наработки 965 ч средняя мощность начала расти. Непосредственно перед началом этого роста никаких изменений режима не предпринималось. На 934 ч проводилась юстировка катода, которая дала небольшое увеличение выходной мощности. В дальнейшем рост выходной мощности продолжался, несмотря на небольшие изменения мощности накала вспомогательного термокатода и попытки заново отъюстировать основной катод.

К 1 400 ч наработки средняя мощность достигла 1 230 мВт, т. е. более чем в два раза превысила значение, с которого начался рост.

Анодный ток за то же время увеличился с 9,3 до 10 мА. После этого уровень мощности стабилизировался и оставался неизменным до конца работы в этом режиме (2 000 ч).

После того как магнетрон был переведен в другой режим работы (200 нс, 5 кГц), средняя мощность, при той же скважности, значительно возросла, а анодный ток уменьшился. Это можно объяснить относительным улучшением формы модулирующего импульса. Мощность около 400 ч оставалась практически постоянной, а затем начала медленно падать.

К 2 650 ч уровень мощности стабилизировался и оставался неизменным до конца работы в этом режиме (3 100 ч).

Анодный ток на первом этапе работы в этом режиме медленно увеличивался, а на втором оставался неизменным.

В дальнейшем выходная мощность была увеличена примерно в два раза путем увеличения анодного напряжения несколькими ступенями, с 9 200 до 9 800 В. В этом режиме происходило сравнительно быстрое падение выходной мощности.

Таким образом, лампа с медным катодом, по-видимому, отличалась наибольшими нестабильностями в работе.

Отличительной особенностью этой лампы является почти полное отсутствие изменения частоты во времени, как это видно из рис. 4.

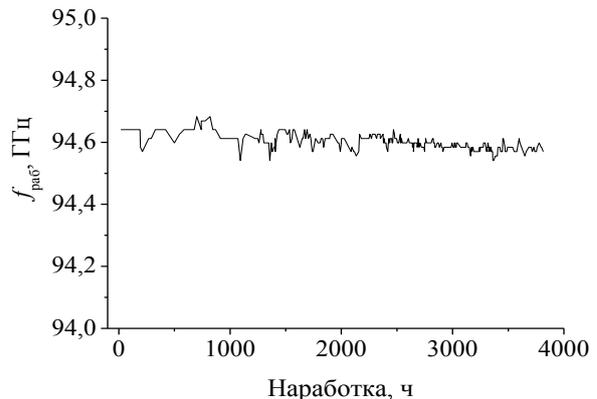


Рис. 4. Изменение рабочей частоты при длительной работе магнетрона с медным катодом

За 3 тыс. ч частота изменилась всего на 40 МГц. Это говорит о практически полном отсутствии напыления на анод, являвшегося основной причиной малого срока службы магнетронов на пространственной гармонике с L -катодами [8].

2. Исследование работы различных типов ВЭК в магнетронных диодах. Описанные выше результаты длительных испытаний магнетронов с разными типами катодов дают основания предполагать, что эмиссионная способность катодов из различных материалов определяется не столько материалом, из которого он изготовлен, а условиями его работы в магнетроне. Дополнительные исследования поведения ВЭК из разных материалов были проведены в магнетрон-

ных диодах. На рис. 5 приведены границы максимального тока для четырех диодов с катодами из различных материалов: меди, платины и алмазоподобных пленок толщиной 0,2 и 0,5 мкм. Эти границы снимались первый раз сразу после откочки, а второй – после нескольких часов работы. Хорошо видно, что после тренировки катодов в рабочем режиме КВЭЭ всех катодов возрастает. Более того, оказалось, что все катоды после тренировки приобретают примерно одинаковые эмиссионные свойства.

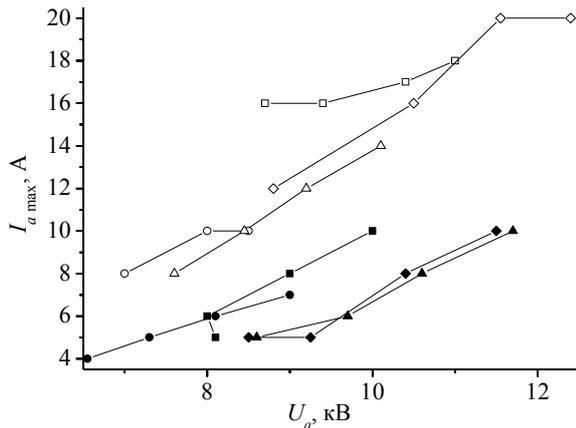


Рис. 5. Границы максимальных токов для магнетронных диодов с катодами из различных материалов: —□— медь; —○— платина; —△— алмаз 0,2; —◇— алмаз 0,5 до тренировки; —■— медь; —●— платина; —▲— алмаз 0,2; —◆— алмаз 0,5 после тренировки

Представляет интерес устойчивость приобретенных эмиссионных свойств. На рис. 6 приведено изменение анодного тока диода в течение 300 ч работы. Видно, что изменения достаточно малы. Сказанное подтверждает и рис. 7, где приведены вольтамперные характеристики этого магнетронного диода после 1, 158, и 320 ч наработки.

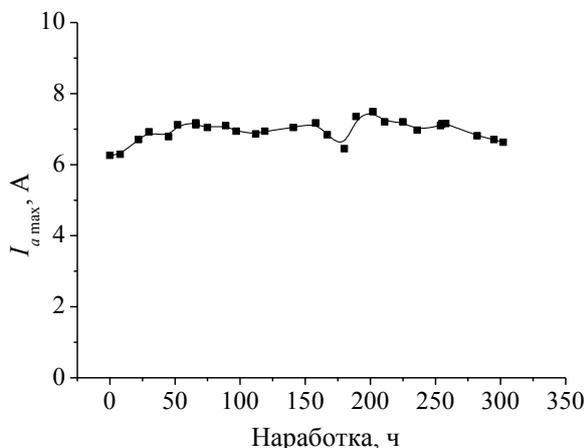


Рис. 6. Изменение анодного тока в магнетронном диоде с медным катодом

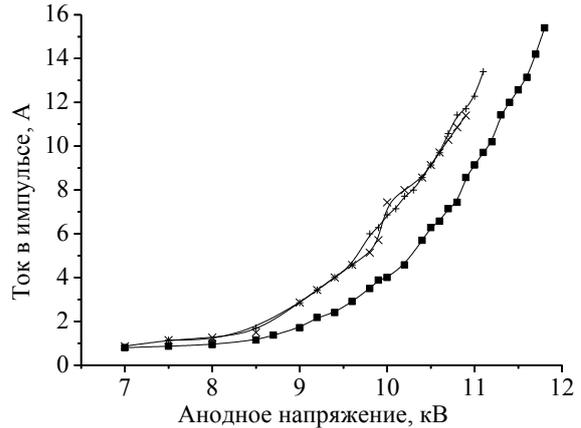


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики магнетронного диода с медным катодом после —■— 1, —×— 158, и —+— 320 ч наработки

Выводы. Проведенные наблюдения длительной работы магнетронов мм диапазона с ВЭК из чистых металлов позволяют сделать следующие выводы.

Вторично-эмиссионные свойства катодов в значительной мере определяются напылением активного вещества со вспомогательного термокатода.

При правильном выборе температуры вспомогательного катода возможна длительная (тысячи часов) работа магнетрона.

Корректировка температуры катода в процессе работы позволяет довести длительность работы магнетрона до 10 000 и более ч.

При уменьшении эмиссионной способности катода возможны значительные изменения выходной мощности при практически неизменном анодном токе.

Для достижения максимальной долговечности магнетронов необходимо тесное взаимодействие разработчиков собственно магнетронов и разработчиков аппаратуры в которой такие магнетроны применяются.

1. Магнетроны сантиметрового диапазона В 2-х т. / Пер. с англ. под ред. С. А. Зусмановского – М.: Сов. радио, 1951. – Т. 2. – С. 120.
2. Jepsen and M. W. Muller. Enhanced emission from magnetron cathodes // J. Appl. Phys. – 1951. – 22, No. 9. – P. 1196–1207.
3. Вигдорчик И. М., Науменко В. Д., Тимофеев В. П. Импульсные магнетроны с холодным вторично-эмиссионным катодом // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1975. – Вып. 7. – С. 634–637.
4. Naumenko V. D., Schunemann K., Vavriv D. M. Miniature 1 kW, 95 GHz magnetrons // Electronics Letters. – 1999. – 35, No. 22. – P. 1960–1961.
5. Моисеенко А. Е., Науменко В. Д., Суворов А. Н., Сыров А. Р. Магнетрон на частоту 94 ГГц с большим сроком службы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – 8, № 4. – С. 421–428.
6. Naumenko V., Suvorov A., Sirov A. Tunable magnetron of a two-millimeter-wavelength band // Microwave and Opticfl Technology Letters. – 1996. – 12, No. 3. – P. 129–131.
7. Грицаенко С. В., Науменко В. Д., Суворов А. Н. Процессы на поверхности деталей магнетронов миллиметрового диапазона с вторично-эмиссионным платиновым катодом //

- Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2006. – 11, № 1. – С. 124–129.
8. Трутень И. Д., Крупаткин И. Г., Баранов О. Н. и др. Импульсные магнетроны миллиметрового диапазона волн в режиме пространственной гармоника // Укр. физ. журн. – 1975. – 20, №7. – С. 1170–1176.
 9. Грицаенко С. В., Еремка В. Д., Копоть М. А. и др. Много-резонаторные магнетроны с холодным вторично-эмиссионным катодом: достижения проблемы перспективы // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2005. – 8, спец. вып. – С. 499–529.
 10. Воронин Ф. И. Вторичная электронная эмиссия Pt, Pd, Ge b и сплавов Pt-C, Pd-C, Ni-Ge в потоке бария // Электронная техн. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1969. – № 8. – С. 138–144.
 11. Дюбуа Б. Ч., Ермолаев Л. А., Есаулов Н. Л. и др. Электронная эмиссия сплавов Pt-Ba, Pd-Ba, Rh-Ba, Au-Ba // Радиотехника и электрон. – 1967. – 12, № 8. – С. 1523–1524.

TO QUESTION ABOUT CHOICE OF TYPE OF SECONDARY-EMISSION CATHODE FOR MILLIMETER WAVE MAGNETRON

V D. Naumenko, O. M. Suvorov, V. O. Markov,
A. E. Moiseenko, R. V. Naumenko

The results of study of the long-term operation of 95 GHz magnetrons with the secondary-emission cathodes of differ-

ent types are expounded. It is shown that, in spite of large influence of operations magnetron mode on secondary-emission properties of cathode, continuous (thousands of hour) magnetron working capacity can be well-to-do not only with platinum but also with other types of cathodes.

Keywords: magnetron, secondary-emission cathode, emission.

ДО ПИТАННЯ ПРО ВИБІР ТИПУ ВТОРИННО-ЕМІСІЙНОГО КАТОДА ДЛЯ МАГНЕТРОНА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

В. Д. Науменко, О. М. Суворов, В. О. Марков,
А. Є. Моїсеєнко, Р. В. Науменко

Викладено результати вивчення довготривалої роботи магнетронів на частоті 95 ГГц з вторинно-емісійними катодами різних типів. Показано, що незважаючи на значний вплив режиму роботи магнетрона на вторинно-емісійні властивості катода тривала (тисячі годин), працездатність магнетрона може бути забезпечена не тільки з платиновими, але й з іншими типами катодів.

Ключові слова: магнетрон, вторинно-емісійний катод, емісія.

Рукопись поступила 17 августа 2009 г.