

В. А. Марков, В. Д. Науменко

Радиоастрономический институт НАН Украины

4, ул. Искусств, Харьков, 61002, Украина

E-mail: naumenko@rian.kharkov.ua

О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ МАГНЕТРОНА НА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГАРМОНИКЕ С ХОЛОДНЫМ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

Одной из главных проблем, с которой сталкиваются разработчики модуляторов для магнетронов на пространственной гармонике с холодным вторично-эмиссионным катодом, является проблема подбора правильной формы импульса анодного напряжения, которая обеспечит стабильную работу магнетрона. В этой статье исследовано влияние формы импульса анодного напряжения на работу передатчиков на основе магнетронов с холодными вторично-эмиссионными катодами. Экспериментально изучено влияние различных частей импульса на такие параметры магнетрона как величина необходимого тока стартового катода, необходимая для стабильного возбуждения вторичной эмиссии с холодного катода, устойчивость работы на выбранном виде колебаний и генерация максимальной мощности. Показано, что величина тока стартового катода определяется, прежде всего, крутизной фронта импульса. Ее оптимальная величина обычно составляет около 150 кВ/мкс. При этом стартовый катод должен отдавать ток всего в несколько десятков миллиампер, что позволяет существенно увеличить срок службы прибора. Показано также, что наличие выброса в начале импульса способствует преждевременному переходу на нерабочий вид колебаний. В итоге это приводит к уменьшению выходной мощности магнетрона. Длительность спада определяют способность магнетрона работать при малой длительности импульса. При очень коротких импульсах энергия, расходуемая на СВЧ-генерацию, может сравниться с энергией, затрачиваемой на формирование спада импульса. В итоге сделано заключение, что применение магнетронов с холодным катодом, работающих на пространственной гармонике, требует тщательной отработки характеристик импульсного модулятора. Крутизна фронта его выходного импульса должна составлять около 150 кВ/мкс, а выброс в начале импульса должен быть как можно меньше. При работе на очень коротких импульсах необходимо обеспечить большую крутизну спада. Ил. 8. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: магнетрон, пространственная гармоника, вспомогательный катод, холодный катод, форма импульса напряжения модулятора.

В последние годы широкое распространение получили магнетроны на пространственной гармонике с вторично-эмиссионным катодом [1, 2]. Такие магнетроны в коротковолновой части миллиметрового диапазона имеют выходные характеристики и долговечность, достаточные для их успешного использования в современных радиотехнических системах, в частности радиолокаторах. В то же время эти приборы имеют ряд особенностей, отличающих их работу от π -видных магнетронов. По этой причине разработчики аппаратуры часто сталкиваются со значительными трудностями при разработке модуляторов для таких магнетронов. В частности, иногда не удается правильно сформулировать требования к электрическим параметрам модулятора. В результате передатчик имеет характеристики гораздо хуже, чем при оптимальном сочетании параметров магне-

трона и модулятора. В данной работе изложены некоторые результаты экспериментальных исследований, позволяющие, на наш взгляд, более осмысленно подходить к выбору характеристик модулятора, чтобы обеспечить устойчивую работу магнетрона и передатчика в целом.

1. Особенности конструкции и основы функционирования магнетронов на пространственной гармонике с холодным вторично-эмиссионным катодом. В рассматриваемых приборах электронный поток взаимодействует с -1 -й гармоникой высокочастотного поля в пространстве взаимодействия. При этом в качестве рабочего вида используется не π -вид колебаний, а вид $\pi/2$ или смежный с ним. Основная волна этого вида имеет гораздо меньшее замедление, чем волна π -вида. В то же время -1 -я гармоника имеет существенно большее замедление, чем

основная волна π -вида. Это позволяет существенно увеличить размеры пространства взаимодействия магнетрона. С другой стороны, увеличение замедления приводит к тому, что поле становится более поверхностным. Следовательно, для эффективного взаимодействия электронный поток должен располагаться как можно ближе к резонаторной системе. Это означает, что магнетрон должен работать вблизи критического режима. С этим связан ряд особенностей работы таких магнетронов. Во-первых, вблизи критического режима через магнетрон протекает значительный ток, обусловленный колебаниями пространственного заряда, не связанными с режимом генерации, что приводит к снижению КПД. Во-вторых, такой режим делает магнетрон более чувствительным к различного рода отклонениям от идеальной геометрии (неравномерность магнитного поля, эксцентricность катода и анода, овальность катода и анода, несоосность магнитного поля и др.).

Особенностью приборов данного типа является возможность возбуждения соседних видов колебаний. Положение несколько улучшается за счет того, что в этой области фазовых сдвигов разное по частоте между видами колебаний значительно больше. Если вблизи π -вида он составляет доли процента, то здесь он может достигать нескольких процентов. В результате виды колебаний оказываются разнесенными по магнитному полю, и их интерференция отсутствует [3]. Тем не менее, эта особенность работы магнетрона должна учитываться при разработке модулятора.

Еще одна особенность работы таких магнетронов связана с использованием холодного катода. Такой катод работает в магнетроне благодаря вторичной эмиссии. Вторичная эмиссия в магнетроне становится возможной, так как часть эмитированных катодом электронов возвращается, получив в пространстве взаимодействия некоторую добавочную энергию. Коэффициент вторичной эмиссии катода должен быть больше единицы. При работе в импульсном режиме вторичную эмиссию необходимо возбуждать в начале каждого импульса. Естественно, такие особенности работы магнетронов не могут не вызывать каких-то внешних проявлений.

Авторами были проведены экспериментальные исследования влияния формы импульса модулятора на работу магнетрона с холодным катодом, работающего на пространственной гармонике. Для проведения экспериментальных исследований была собрана установка, схема которой представлена на рис. 1. Исследовались разработанные в РИ НАНУ пакетированные магнетроны 8-мм и 3-мм диапазонов. Магнетрон 3 запитывался от короткоимпульсного модулятора 1 с частичным разрядом накопителя. Модулятор запускался от генератора импульсов 2. Для измерения анодного тока в цепь анода был включен в качестве датчика резистор 10 Ом. К выходу магнетрона был подключен направленный ответвитель 6. В его ответвленном плече для контроля режима генерации магнетрона были включены резонансный волномер 7 и детектор 8. Выходная мощность контролировалась измерителем мощности 10 типа Я2М с головкой «Магот». Форма импульсов анодного напряжения, анодного тока и огибающей выходного СВЧ-импульса контролировалась при помощи осциллографа *Tektronix TDS 2022*. Для наблюдения импульсов высокого напряжения использовался высоковольтный щуп 4 типа *Tektronix A6015*.

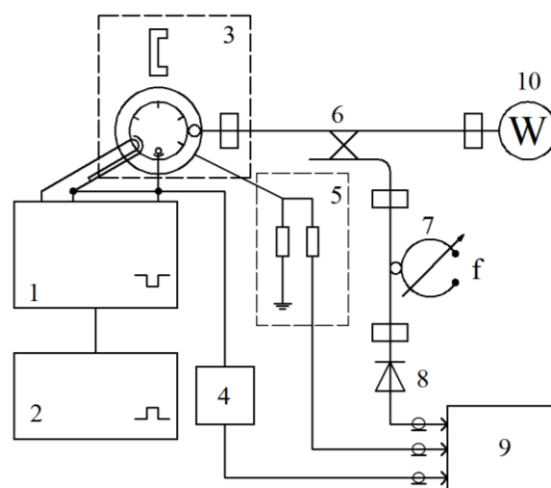


Рис. 1. Схема установки магнетрона: 1 – короткоимпульсный модулятор; 2 – генератор положительных импульсов; 3 – магнетрон; 4 – высоковольтный щуп *Tektronix A6015*; 5 – детектор анодного тока; 6 – направленный ответвитель; 7 – резонансный волномер; 8 – СВЧ-детектор; 9 – осциллограф *Tektronix TDS 2022*; 10 – измеритель мощности Я2М

На рис. 2 показана типичная форма импульса модулятора. Он имеет крутой фронт, крутизна которого определяется, в основном, величиной паразитной емкости и внутренним сопротивлением самого модулятора. Хотя для работы магнетрона идеальной является плоская вершина, однако на практике имеется некоторый спад напряжения, величина которого определяется величиной накопительной емкости и током магнетрона.

Кроме того, на вершине импульса имеются колебания. Амплитуда и частота этих колебаний определяются параметрами последовательного контура, образованного паразитными индуктивностями и емкостями, а также крутизной фронта.

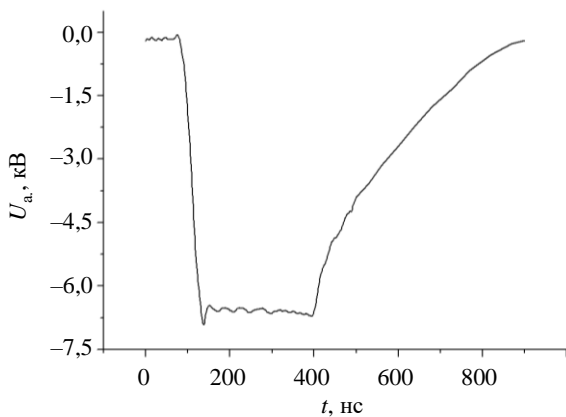


Рис. 2. Импульс модулятора с частичным разрядом накопительной емкости

Наконец, имеется достаточно медленный спад напряжения, представляющий собой процесс разряда паразитной емкости через магнетрон и зарядное сопротивление, если оно имеется в схеме модулятора. Ниже рассмотрено влияние различных частей импульса анодного напряжения на устойчивость работы магнетрона.

2. Нестабильности работы магнетрона, связанные с использованием холодного катода. При использовании вторично-эмиссионного катода часто возникают нестабильности, связанные с возбуждением вторичной эмиссии. Они могут проявляться в виде пропусков импульсов, сокращения длительности, а также, в редких случаях, в виде дрожания фронта импульса анодного тока.

Если импульс анодного напряжения не имеет колебаний на вершине, а коэффициент

заполнения мал, то сценарий изменения импульса анодного тока имеет вид, представленный осциллограммами на рис. 3. На осциллограмме эволюции импульса анодного тока ось абсцисс соответствует времени t с ценой деления 50 нс на клетку, а ось ординат соответствует анодному току I_a с ценой деления 1 А на клетку.

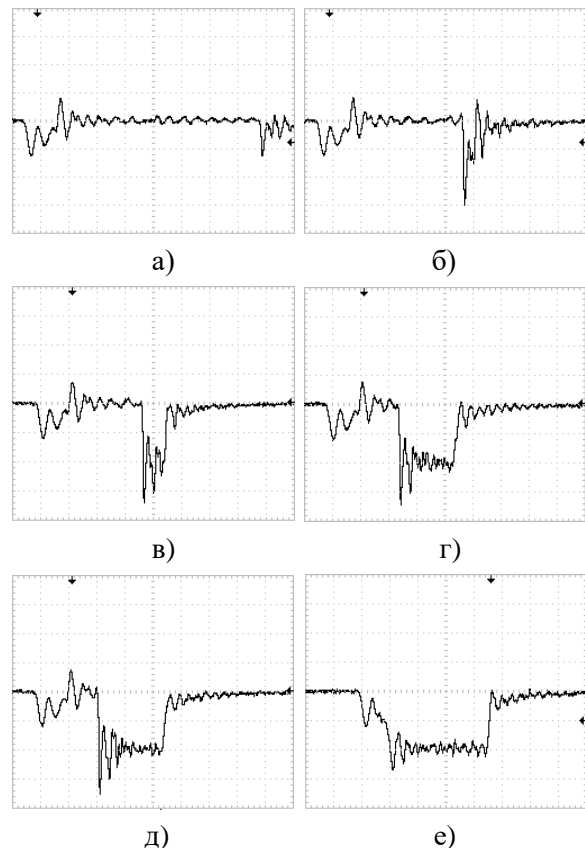


Рис. 3. Эволюция импульса анодного тока при постепенном увеличении тока накала (а – е)

Рисунки «а» – «е» соответствуют следующим токам накала: «а» – 3,44 А; «б» – 3,53 А; «в» – 3,6 А; «г» – 3,67 А; «д» – 3,87 А; «е» – 4,06 А.

По мере увеличения тока накала стартового катода вторично-эмиссионный ток появляется сначала на спаде импульса анодного напряжения. Это объясняется уменьшением ухода электронов на анод по мере удаления от критического режима, а также увеличением энергии возвращающихся электронов при наличии спадающего поля в пространстве взаимодействия [4].

По мере увеличения накала вспомогательного катода запаздывание относительно начала спада уменьшается и, в конце концов,

момент возбуждения вторично-эмиссионного тока выходит на вершину импульса. Характерно, что запаздывание на спаде импульса довольно стабильно от импульса к импульсу, а после выхода на полку обычно появляется большое дрожание фронта импульса тока. При дальнейшем увеличении тока накала момент появления вторичного тока переходит на фронт импульса анодного напряжения. Ток первичной эмиссии в этот момент будем считать необходимым током для запуска магнетрона. Ниже в статье используется выражение «необходимый ток накала». Оно обозначает ток накала вспомогательного катода, обеспечивающий запуск на фронте импульса анодного напряжения.

Примерно такой же сценарий наблюдается при постепенном увеличении магнитного поля, представленный осциллограммами на рис. 4.

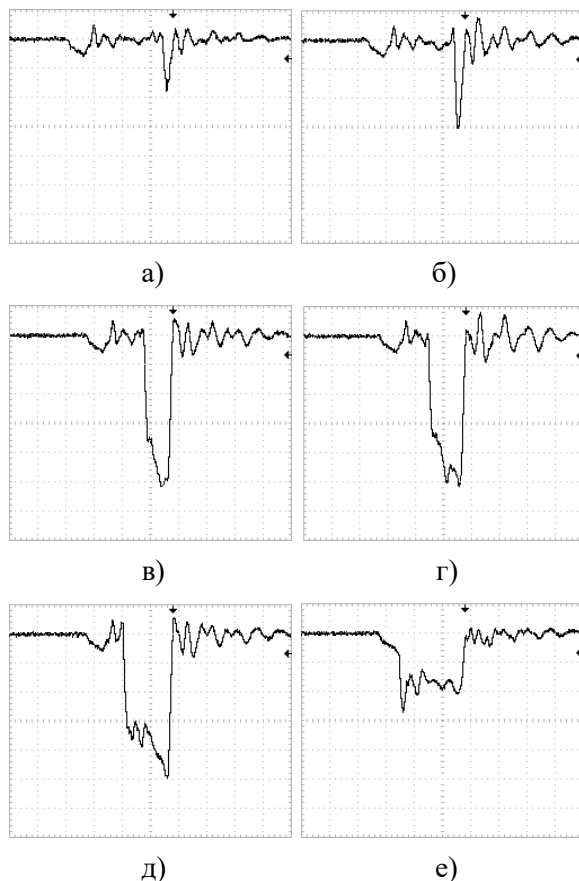


Рис. 4. Сценарий появления анодного тока при постепенном повышении магнитного поля (а – е)

На осциллограмме появления анодного тока ось абсцисс соответствует времени t с

ценой деления 100 нс на клетку, а ось ординат соответствует анодному току I_a с ценой деления 0,5 А на клетку. Рисунки «а» – «е» соответствуют следующим значениям магнитного поля: «а» – 5 340 Гс; «б» – 5 460 Гс; «в» – 5 470 Гс; «г» – 5 500 Гс; «д» – 5 600 Гс; «е» – 6 600 Гс.

Такие сценарии имеют место только при очень большой скважности и хорошей форме импульса напряжения. Картина существенно изменяется, если имеются колебания на полке импульса, что обычно наблюдается при большой крутизне фронта. Сценарии могут быть различными, в зависимости от амплитуды и частоты этих колебаний. Наиболее важным моментом в этих сценариях является высокая вероятность возбуждения вторичного тока на спаде первого выброса импульса напряжения. В этом случае необходимый ток накала может быть значительно меньше, чем при запуске на фронте. После появления вторичного тока даже на спаде импульса начинается подогрев и активация термокатада обратной бомбардировкой, что увеличивает эмиссионную способность вспомогательного катода. При достаточно большой частоте повторения это приводит к искажению результатов измерений. В связи с этим частоту повторения приходилось выбирать как можно меньшую. В дальнейшем выяснилось, что в некоторых случаях эмиссия стартового катода изменяется даже после одиночных импульсов.

Если магнетрон с вторично-эмиссионным катодом работает вблизи критического режима, то при незначительном увеличении анодного напряжения происходит срыв анодного тока. Индуктивность подводящих проводов, емкость магнетрона и накального трансформатора образуют последовательный контур, а магнетрон в момент срыва тока представляет собой огромное отрицательное сопротивление. В результате в анодной цепи магнетрона могут возникать мощные низкочастотные колебания. В этом случае анодный ток возникает при фазе колебаний, когда анодное напряжение понижается и снова срывается при его повышении. Импульс генерации, в результате, как бы «рассыпается». Соответствующий сценарий представлен осциллограммами импульса тока на рис. 5.

Осциллограмма по оси абсцисс соответствует времени t с ценой деления 100 нс на клетку, а ось ординат соответствует анодному току I_a с ценой деления 1 А на клетку. Рисунки осциллограмм «а» – «е» сняты в диапазоне анодного напряжения $U_a = 7,25 \dots 7,5$ кВ с шагом приблизительно 40 В.

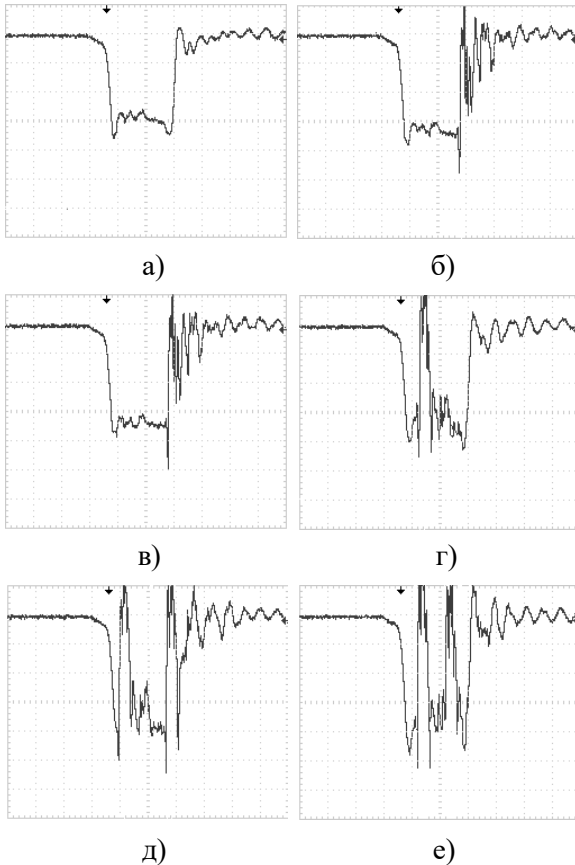


Рис. 5. Эволюция импульса анодного тока при постепенном увеличении анодного напряжения (а – е)

Возникновение таких колебаний часто приводит к перенапряжениям и пробоем магнетрона.

Наибольший интерес для практического применения представляет зависимость необходимого тока накала от крутизны фронта импульса напряжения. Очевидно, что для каждого режима работы эта зависимость будет своя, так как температура катода определяется не только током накала, но зависит также от мощности обратной бомбардировки, определяемой режимом работы.

На рис. 6 приведена такая зависимость для частоты повторения 40 Гц, а на рис. 7 показано соответствующие этим токам накала термоэмиссии.

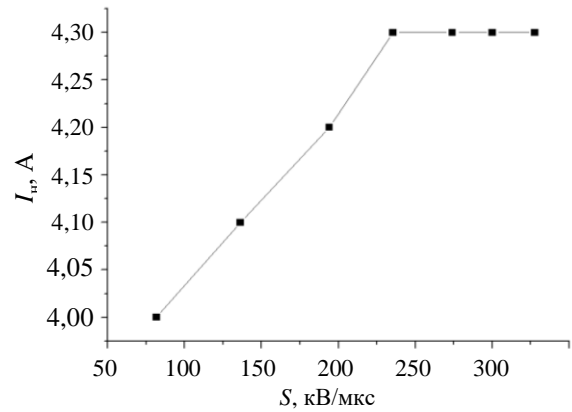


Рис. 6. График зависимости необходимого тока накала от крутизны фронта

Увеличение крутизны фронта свыше 250 кВ/мкс не приводит к росту необходимого тока накала стартового катода. После возбуждения тока на спаде первого выброса происходит некоторое увеличение эмиссионной способности стартового термокатода, и точка возбуждения вторичного тока практически мгновенно перемещается на фронт импульса анодного напряжения.

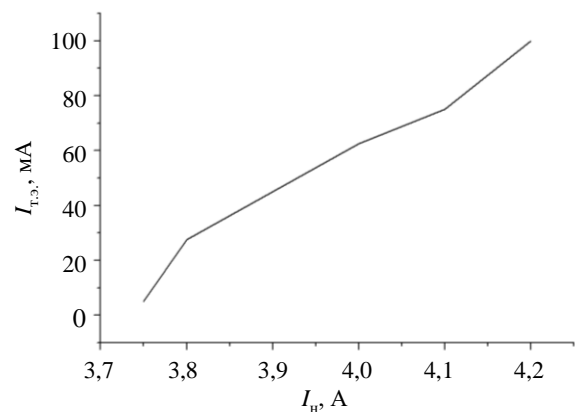


Рис. 7. График зависимости термоэмиссионного тока от тока накала

Таким образом, для устойчивой работы магнетрона стартовый термокатод должен формировать электронный поток с параметрами, обеспечивающими надежное возбуждение вторичной эмиссии в магнетроне с малым запаздыванием. Кроме того, его конструкция должна обеспечивать низкую плотность термоэмиссионного тока. Продукты испарения термокатода не должны попадать на вторично-эмиссионный катод.

Для обеспечения максимальной долговечности магнетрона необходимо осуществлять

корректировку напряжения накала в течение срока службы.

3. Нестабильности, связанные с работой на пространственной гармонике. Как известно, при работе на пространственной гармонике используются колебания вида $N/4$ или соседнего с ним [3]. Справедливость этого общепринятого мнения нуждается, по видимому, в дополнительной проверке, так как появились магнетроны, весьма эффективно работающие на виде $N/4-2$. Эти виды колебаний резонаторной системы магнетрона, как и все остальные, кроме нулевого и вида $N/2$, являются двукратно вырожденными. Это означает, что для каждого из этих видов колебаний возможны два распределения высокочастотного поля со сдвинутой на 90° фазой. Из-за погрешностей в изготовлении резонаторной системы и влияния вывода энергии резонансные частоты для этих двух распределений будут слегка (на доли процента) отличаться. Вследствие этого появляется дублетная структура видов колебаний в магнетронах, работающих на пространственной гармонике. Это явление еще недостаточно изучено. В частности, в силу разной ориентации распределения высокочастотного поля эти две составляющие дублета будут по-разному связаны с выводом энергии. Следовательно, слабее связанная составляющая должна иметь более высокую нагруженную добротность и легче возбуждаться. Именно опасения неэффективной работы магнетрона на ненагруженной составляющей дублета послужили причиной отказа от проведения исследований в этом направлении в США [5]. На самом деле оказалось, что магнетроны работают на вырожденных видах колебаний достаточно эффективно и стабильно. Причины этого обстоятельства до сих пор неясны. Утверждения, изложенные в [6], что в таких магнетронах всегда возбуждается нагруженная составляющая дублета как имеющая более низкую частоту физически, не обоснованы. Более реальным нам представляется предположение, что в таких магнетронах возбуждается бегущая волна, которая в любом случае будет связана с нагрузкой [7].

Второе отрицательное последствие работы при малых значениях индукции магнитного поля к ее критическому значению

($B/B_{кр}$) связано с протеканием тока в закритическом режиме магнетрона. Как известно, этот ток быстро возрастает при приближении магнитного поля к его критическому значению. В связи с этим КПД магнетрона при работе в близкритическом режиме оказывается значительно ниже. По этой причине иногда оказывается выгодным выбирать в качестве рабочего вида колебания $N/4-1$ или даже $N/4-2$ вместо вида $\pi/2$. Большее провисание поля этих видов позволяет работать при больших значениях магнитного поля и, следовательно, с увеличенным КПД.

Можно предположить, что при работе на вторичной эмиссии, особенно с использованием сравнительно низкоэффективных катодов из чистых металлов, чаще должны наблюдаться сдвиги частоты, обусловленные изменением состояния пространственного заряда. Наши наблюдения, однако, не подтверждают этого предположения. Скачки частоты в пределах 20...40 МГц при изменении анодного тока иногда наблюдаются, но, как правило, это имеет место в магнетронах, имеющих неудовлетворительные основные параметры. Чаще эти скачки связаны не с изменением состояния облака пространственного заряда, а с дублетной структурой рабочего вида колебаний. Отличие их состоит в том, что в первом случае мощность выходного сигнала остается практически неизменной, а во втором мощность может измениться в 2...3 раза. Тем не менее, очевидно, что это явление может отрицательно повлиять на работу радиолокатора, поскольку величина сдвига сравнима с шириной спектра.

В большинстве случаев конструкция магнетрона обеспечивает достаточно хорошее разделение видов колебаний. Для примера на рис. 8 показано разделение видов колебаний по магнитному полю в магнетроне 3-мм диапазона с 28-резонаторным анодным блоком с диаметром анода $d_a = 2,57$ мм, диаметром резонатора $d_p = 3,73$ мм и толщиной ламели $t = 0,1$ мм.

Однако часто складывается ситуация, когда наилучшие мощность и КПД получаются в точке, расположенной в непосредственной близости от границы перехода на следующий вид колебаний. В таких случаях для обеспечения нормальной работы магне-

трона резко возрастают требования к форме модулирующего импульса.

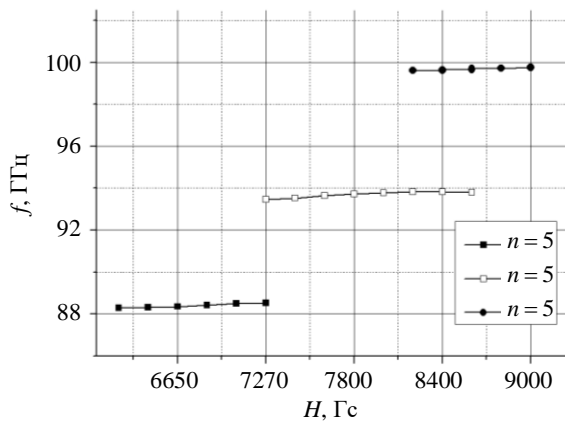


Рис. 8. Разделение видов колебаний по магнитному полю в магнетроне 3-мм диапазона с 28-резонаторным анодным блоком

Необходимо также отметить, что при использовании вторично-эмиссионных катодов несколько сужаются области существования видов колебаний по магнитному полю. Как правило, при изменении анодного тока может появляться два и, в редких случаях, три вида колебаний. Чем больше отношение диаметров катода и анода, тем шире области существования видов по магнитному полю. По-видимому, это обусловлено тем обстоятельством, что магнетроны с вторично-эмиссионным катодом имеют более высокое динамическое сопротивление, чем, например, описанные в работе [3] магнетроны с L-катодом.

Выводы. Стабильность работы магнетрона на пространственной гармонике в большой степени зависит от формы импульса анодного напряжения. В частности, для стабильного возбуждения вторичной эмиссии крутизна фронта импульса должна составлять от 100 до 200 кВ/мкс.

Амплитуда выброса напряжения в начале импульса должна быть как можно меньше во избежание преждевременного перехода на соседний вид колебаний.

Спад импульса должен быть по возможности короче.

Библиографический список

1. Vavriv D., Naumenko V., Schuenemann K., Markov V., Suvorov S. Advances in Spatial-Harmonic Magnetrons

with Cold Secondary-Emission Cathode. Proceedings of the 47th European Microwave Conference (EuMC'17) (10–12 Oct. 2017, Nuremberg, Germany). P. 672–675. DOI: 10.23919/EuMC.2017.8230936

2. Еремка Д. Е., Науменко В. Д. Исследование и разработка магнетронов миллиметрового диапазона. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2008. № 4. С. 23–58.
3. Трутенъ И. Д., Крупаткин И. Г., Баранов, О. Н., Галущко Н. Н., Игнатов В. Е. Импульсные магнетроны миллиметрового диапазона волн в режиме пространственной гармоник. *Украинский физический журнал*. 1975. Т. 20, № 7. С. 1170–1176.
4. Науменко В. Д., Черенщиков С. А. Исследование запуска магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом на спаде импульса напряжения. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1984. Т. 27, № 2. С. 250–256.
5. Магнетроны сантиметрового диапазона. Пер. с англ. под ред. С. А. Зусмановского. Москва: Советское радио, 1950. Т. 1. 421 с.
6. Атласман А. В., Гурко А. И., Саевский Ф. В., Гаплевский В. В., Трутенъ И. Д. О физических условиях устойчивой одночастотной генерации в магнетронах с поверхностной волной. *Труды ИРЭ АН УССР*. Харьков, 1970. Т. 18. С. 5–21.
7. Ковалев Ю. А., Масленников Ю. В. О взаимодействии электронного потока с вырожденными видами резонаторной системы магнетрона. *Электронная техника. Серия 1. «Электроника СВЧ»*. 1969. Вып. 10. С. 28–33.

REFERENCES

1. Vavriv, D., Naumenko, V., Schuenemann, K., Markov, V., Suvorov, S., 2017. Advances in Spatial-Harmonic Magnetrons with Cold Secondary-Emission Cathode. In: *IEEE Proc. 47th European Microwave Conf. (EuMC'17)*. Nuremberg, Germany, 10–12 Oct. 2017. Nuremberg: IEEE. DOI: 10.23919/EuMC.2017.8230936
2. Eremka, D., Naumenko, V., 2008. Research and development of millimeter-band magnetrons. *Uspеhi sovremennoj radioelektroniki*, 4, pp. 23–58 (in Russian).
3. Truten, I., Krupatkin, I., Baranov, O., Galushko, N., Ignatov, V., 1975. Pulsed millimeter wave range magnetrons in spatial harmonics mode. *Ukrainskiy fizicheskii zhurnal*, **20**(7), pp. 1170–1176 (in Russian).
4. Naumenko, V., Cherenchikov, S., 1984. Study of the start up of a magnetron with cold secondary-emission cathode on the pulse voltage drop. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.*, **27**(2), pp. 250–256 (in Russian).
5. *Microwave magnetrons*. 1950. Translated from English and ed. by S. A. Zusmanovskiy. Moscow: Sovetskoe radio Publ. (in Russian).
6. Atlasman, A., Gurko, A., Saevskii, F., Gapevskii, V., Truten, I., 1970. About the physical conditions of stable single-frequency generation in magnetrons with surface wave. In: A. Ya. Usikov, ed. 1970. *Trudy IRE NAS of UkrSSR*. Kharkov: IRE NAS of UkrSSR Publ. **18**, pp. 5–21 (in Russian).
7. Kovalev, Y., Maslenikov, Y., 1969. About the interaction of electron flow with degenerate mode of

resonator system of the magnetron. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1. «Elektronika SVCh»*, 10, pp. 28–33 (in Russian).

Рукопись поступила 23.10.2017.

V. A. Markov, V. D. Naumenko

ON THE INFLUENCE OF THE SHAPE
OF ANODE VOLTAGE PULSE
ON THE OPERATION STABILITY
OF SPATIAL-HARMONIC MAGNETRON
WITH COLD SECONDARY EMISSION
CATHODE

One of the main problems faced by developers of modulators for spatial-harmonic magnetrons with cold secondary emission cathode is the selection of the correct shape of an anode voltage pulse that will ensure the stable operation of the magnetron. In this paper, the effect of the shape of the anode voltage pulse on the operation of transmitters based on magnetrons with cold secondary emission cathodes is investigated. The influence of different parts of the pulse on such parameters of the magnetron as the required current of the starting cathode necessary for stable excitation of secondary emission from the cold cathode, the stability of operation on the selected mode of oscillation, and the generation of the maximum power is experimentally studied. It is shown that the magnitude of the starting cathode current is determined, first of all, by the steepness of the pulse front. Its optimum value is usually about 150 kV/ μ s. In this case, starting cathode should provide a current of only a few tens of milliamperes, which can significantly increase the lifetime of the device. The article also shows that the presence of a pulse spike at the beginning of a voltage pulse facilitates a premature transition to a non-working mode of oscillation. As a result, this leads to a decrease in the output power of the magnetron. The duration of the decay determines the ability of the magnetron to operate at small pulse duration. For very short pulses, the energy expended on the microwave generation can be equal to the energy expended on the formation of the pulse decay. As a result, it was concluded that the usage of spatial-harmonic magnetrons with cold cathode requires a careful refinement of the characteristics of a pulse modulator. The steepness of the front of its output pulse should be about 150 kV/ μ s, and the pulse spike at the beginning of the voltage pulse should be as small as possible. When working on very short pulses it is necessary to provide a longer rate of pulse decay.

Key words: magnetron, spatial harmonic, auxiliary cathode, cold cathode, voltage modulator pulse shape.

В. О. Марков, В. Д. Науменко

ПРО ВПЛИВ ФОРМИ ІМПУЛЬСУ
АНОДНОЇ НАПРУГИ
НА СТІЙКІСТЬ РОБОТИ МАГНЕТРОНА
НА ПРОСТОРОВІЙ ГАРМОНІЦІ
З ХОЛОДНИМ ВТОРИННО-
ЕМІСІЙНИМ КАТОДОМ

Однією з основних проблем, з якою стикаються розробники модуляторів для магнетронів на просторовій гармоніці з холодним вторинно-емісійним катодом, є проблема добору правильної форми імпульсу анодної напруги, котра забезпечить стабільну роботу магнетрона. У цій статті досліджено вплив форми імпульсу анодної напруги на роботу передавачів на основі магнетронів з холодними вторинно-емісійними катодами. Експериментально вивчено вплив різних частин імпульсу на такі параметри магнетрона як величина необхідного струму стартового катода необхідна для стабільного збудження вторинної емісії з холодного катода, стійкість роботи на обраному виді коливань і генерація максимальної потужності. Показано, що величина струму стартового катода визначається, перш за все, крутістю фронту імпульсу. Її оптимальна величина зазвичай складає близько 150 кВ/мкс. При цьому стартовий катод повинен віддавати струм всього в декілька десятків міліамперів, що дозволяє істотно збільшити термін служби приладу. Показано також, що наявність викиду на початку імпульсу сприяє передчасному переходу на неробочу моду коливань. У результаті це призводить до зменшення вихідної потужності магнетрона. Тривалість спаду визначає здатність магнетрона працювати при малій тривалості імпульсу. При дуже коротких імпульсах енергія, що витрачається на СВЧ-генерацію, може зрівнятися з енергією, що витрачається на формування спаду імпульсу. У результаті зроблено висновок, що використання магнетронів з холодним катодом, що працюють на просторовій гармоніці, вимагає ретельного відпрацювання характеристик імпульсного модулятора. Крутість фронту його вихідного імпульсу повинна складати близько 150 кВ/мкс, а викид на початку імпульсу має бути якомога менше. Для роботи на дуже коротких імпульсах необхідно забезпечити велику крутість спаду.

Ключові слова: магнетрон, просторова гармоніка, допоміжний катод, холодний катод, форма імпульсу напруги модулятора.