

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДНОГО ЗАПУСКА МАГНЕТРОНОВ С ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ ПРИ ПОМОЩИ ВНЕШНЕГО СВЧ-СИГНАЛА

Н. И. Автомонов, Д. М. Ваврив, С. В. Сосницкий
Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков

Получена 14 декабря 2009 г.

Проведен теоретический анализ механизмов возбуждения автоколебаний в магнетронах с вторично-эмиссионным катодом без применения вспомогательного термокатода. Изучены процессы возбуждения автоколебаний с использованием модулированного импульса анодного напряжения. Определены условия, при которых возможна реализация данного механизма возбуждения автоколебаний.

Ключевые слова: магнетрон, холодный запуск.

1. Введение

Магнетроны с холодным вторично-эмиссионным катодом известны как эффективные источники электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона длин волн [1-2]. Применение такого катода по сравнению с традиционным термокатодом позволяет повысить срок службы магнетронов. Вместе с тем, в практических конструкциях рассматриваемых магнетронов применяется вспомогательный термокатод для эмиссии в пространство взаимодействия некоторого начального количества электронов, необходимого для инициирования вторично-электронной эмиссии с основного катода. Хотя мощность вспомогательного катода является относительно небольшой, его применение усложняет конструкцию магнетрона, а также может приводить к снижению надежности работы магнетрона.

К настоящему времени известно несколько попыток по созданию полностью «холодных» магнетронов, в которых возбуждение автоколебаний (запуск магнетрона) возможно без применения вспомогательного термокатода [1-3]. Для этой цели применялись следующие подходы: 1) запуск магнетрона с помощью внешнего СВЧ-

сигнала [4, 5], 2) возбуждение автоколебаний при модуляции анодного напряжения [6-8], 3) создание начального количества электронов с помощью автоэммиттеров [9]. Пока данные подходы не нашли широкого применения при создании коммерческих магнетронов с холодным вторично-эмиссионным катодом. Причиной этого является плохая воспроизводимость результатов указанных экспериментов, а также отсутствие достаточно полного понимания физических процессов, ответственных за возбуждение автоколебаний в полностью «холодных» магнетронах. Следует также указать на отсутствие достаточно полного теоретического анализа работы таких магнетронов, хотя отдельные попытки теоретического объяснения запуска магнетрона на спаде анодного импульса напряжения предпринимались в работах [1, 2, 10].

Сейчас понятно, что дальнейший прогресс в разработке методов холодного запуска магнетронов требует достаточно подробного теоретического исследования соответствующих физических процессов с привлечением самосогласованных моделей магнетронов. Такие исследования должны определить основные факторы, влияющие на эффективность возбуждения колебаний, и найти оптимальные конструкции соответствующих приборов. В данной работе предпринята попытка такого теоретического исследования, которое проводится в рамках предложенной ранее самосогласованной модели магнетронов с холодным вторично-эмиссионным катодом [11] путем ее соответствующего обобщения. В данной работе мы исследуем запуск магнетрона с помощью внешнего СВЧ-сигнала.

2. Холодный запуск магнетрона при помощи внешнего СВЧ-сигнала.

Наиболее простым способом холодного запуска является подача в магнетрон внешнего СВЧ-сигнала. В данной работе мы рассмотрим особенности такого подхода.

Для моделирования запуска магнетрона посредством внешнего СВЧ-сигнала также использовалась математическая модель магнетрона [11], которая была соответствующим образом обобщена. Для учета внешнего источника СВЧ-сигнала была модифицирована эквивалентная схема магнетрона в соответствии с рис.1. Здесь приведен участок эквивалентной цепи резонансной системы магнетрона, соответствующий трем соседним анодным резонаторам. В одном из резонаторов осуществляется вывод и ввод СВЧ-энергии. Подача внешнего СВЧ-сигнала описывается источником тока j_0 , резистивность R_2 описывает нагрузку магнетрона, R_1 - омические потери на стенках резонаторов, L и C – индуктивность и емкость анодного резонатора, C' – емкость между сегментом анодного блока и катодом.

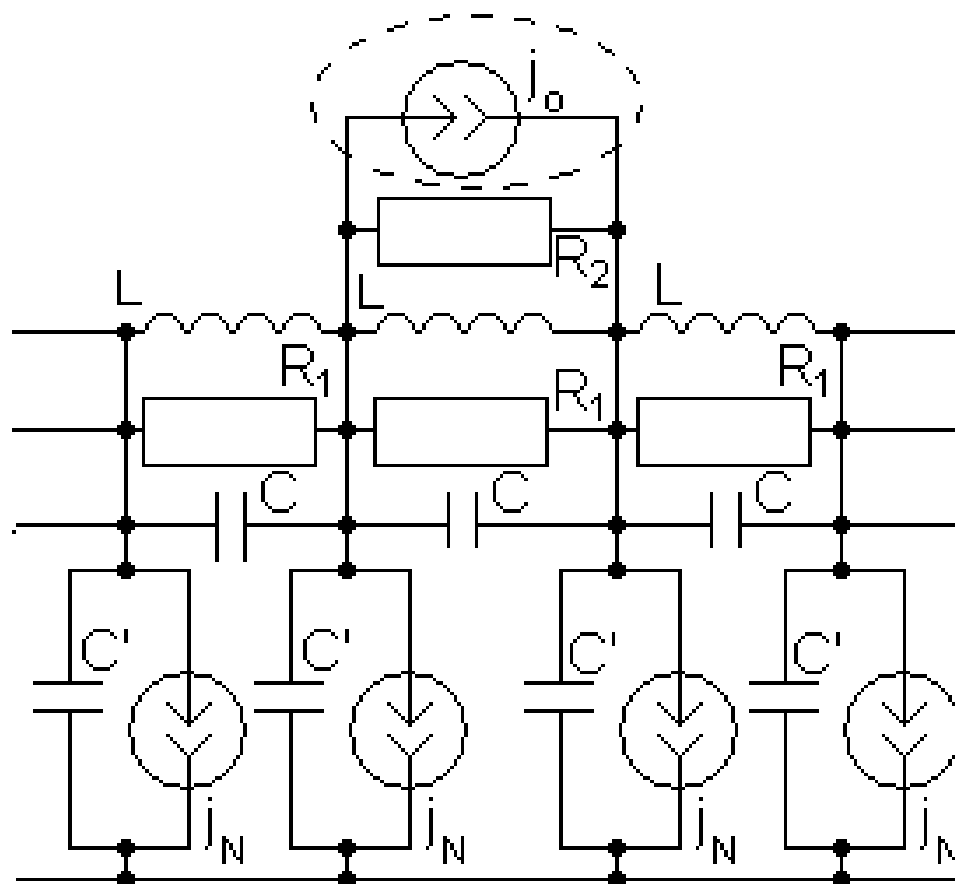


Рис. 1. Эквивалентная схема трех резонаторов магнетрона при моделировании воздействия внешнего СВЧ-сигнала.

Моделирование проводилось для двух различных магнетронов, которые исследовались экспериментально в работах [7] и [12]. Параметры этих магнетронов:

- 1) Радиус анода $R_a = 2.25$ мм, радиус катода $R_c = 1.1$ мм, анодное напряжение $U_a = 18.6$ кВ, магнитное поле $B = 0.59$ Тл, количество резонаторов $N = 16$, радиус резонатора $R_d = 3.4$ мм, ширина ламели $d = 0.4$ мм, высота анодного блока $h = 6$ мм, $\lambda_{\pi 2} = 6.8$ мм (параметры из работы [7])
- 2) Радиус анода $R_a = 2.25$ мм, радиус катода $R_c = 1.3$ мм, анодное напряжение $U_a = 12.8$ кВ, магнитное поле $B = 0.5875$ Тл, количество резонаторов $N = 16$, радиус резонатора $R_d = 3.635$ мм, ширина ламели $d = 0.4$ мм, высота анодного блока $h = 6$ мм, $\lambda_{\pi 2} = 8$ мм (параметры из работы [12])

Как следует из предыдущего анализа, для запуска магнетрона принципиально важным является накопление в пространстве взаимодействия некоторой критической величины заряда. Рассмотрим процесс накопления заряда для изучаемого случая. На рис. 2

показаны временные зависимости величины заряда в пространстве взаимодействия при различных мощностях внешнего сигнала P_{ext} .

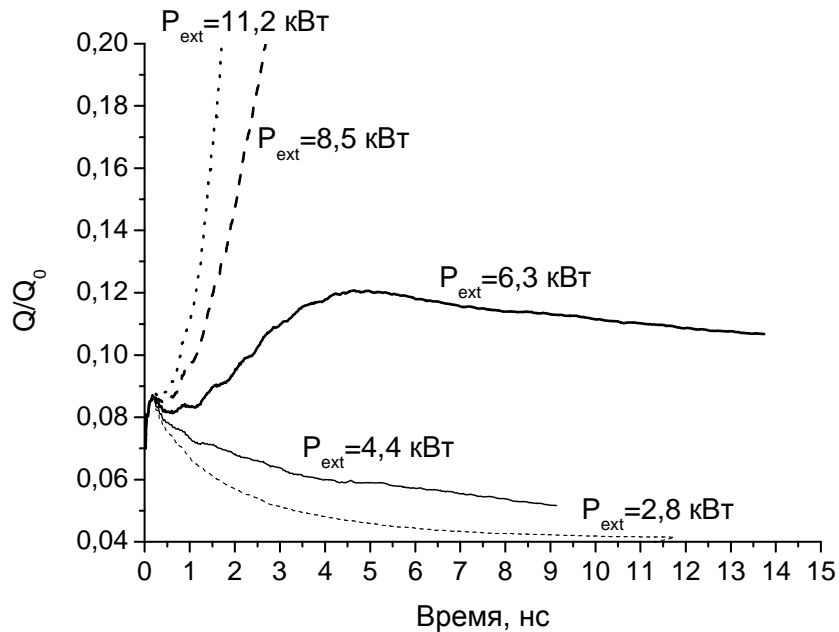


Рис. 2. Зависимость заряда пространства взаимодействия от времени при начальном заряде равном 7% от заряда Бриллюэна для магнетрона из работы [12].

Анализ результатов моделирования показывает, что для каждого значения начального заряда пространства взаимодействия существует некоторая минимальная мощность внешнего сигнала P_{min} , при которой происходит запуск магнетрона. При достижении внешним сигналом мощности, превышающей P_{min} , энергия электронов, бомбардирующих вторично-эмиссионный катод, становится достаточной для инициирования лавинообразного роста количества электронов за счет вторичной эмиссии.

Увеличение, как мощности внешнего сигнала, так и величины начального заряда приводит к уменьшению времени запуска магнетрона. Сами выходные характеристики магнетрона (КПД, выходная мощность, анодный ток) остаются практически неизменными при изменении этих параметров, если реализованы условия запуска магнетрона.

Рассмотрим сравнение результатов экспериментальных исследований [7, 12] с нашими результатами численного моделирования. В качестве стартового состояния прибора при моделировании использовалось равномерное распределение частиц по пространству взаимодействия магнетрона, при этом, поскольку величина начального заряда пространства взаимодействия магнетрона в экспериментах не была известна, ее значение варьировалось.

На рис. 3 показаны графики экспериментальной [12] и расчетной зависимости минимальной мощности P_{min} , необходимой для запуска, от частоты внешнего сигнала F . Видно, что существует оптимальное значение частоты внешнего сигнала, при котором запуск магнетрона происходит при минимальной мощности входного сигнала. Это значение частоты близко к собственной частоте рабочей моды магнетрона.

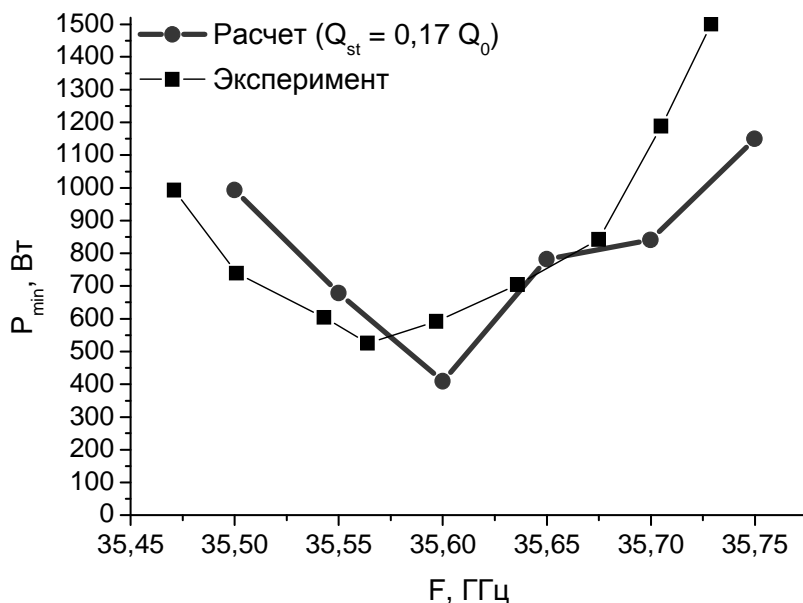


Рис. 3. Сравнение экспериментальной [12] и расчетной зависимости минимальной мощности, необходимой для запуска, от частоты запускающего сигнала.

На рис. 4 показаны графики экспериментальной [7] и расчетной зависимости времени запуска магнетрона $T_{зан}$ от мощности внешнего сигнала P_{ext} . Как видно из приведенных графиков результаты численного моделирования и экспериментов демонстрируют достаточно хорошее совпадение. Некоторый разброс величины начального заряда пространства взаимодействия (8% и 17% от заряда Бриллюэна), требуемого для запуска этих магнетронов обусловлен целым рядом их отличий. Эти магнетроны отличаются рабочей длиной волны, размерами пространства взаимодействия и, возможно, давлением остаточных газов.

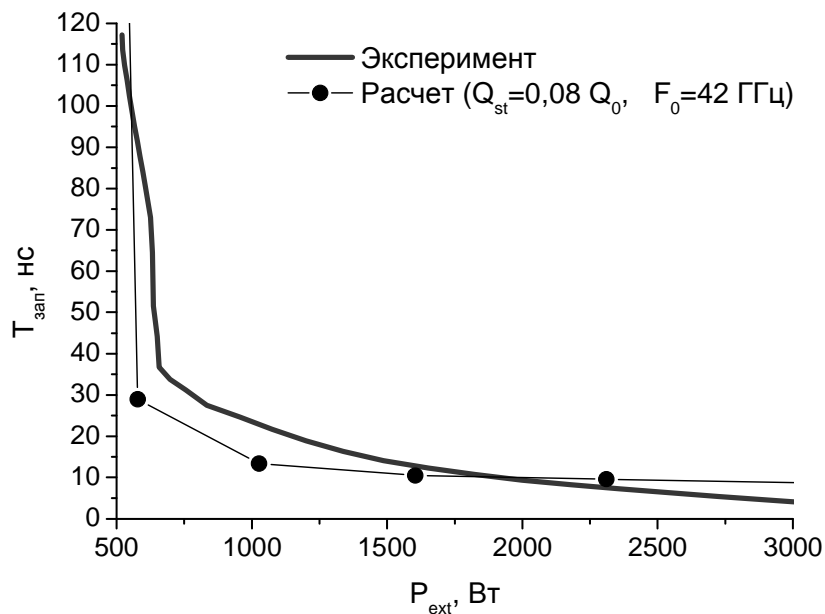


Рис. 4. Сравнение экспериментальной [7] и расчетной зависимости времени запуска магнетрона от мощности внешнего сигнала.

3. Заключение

Анализируя вышеприведенные данные можно сделать ряд выводов. Для запуска магнетрона при помощи внешнего СВЧ сигнала требуется некоторое начальное количество электронов, зависящее от мощности внешнего сигнала. Согласно полученным результатам моделирования, требуемая для холодного запуска магнетрона величина начального заряда составляет порядка 10% от заряда Бриллюэна. Было получено, что увеличение мощности выходного сигнала приводит к уменьшению времени запуска магнетрона. При этом следует отметить, что при больших уровнях внешнего сигнала прекращается запуск магнетрона. Однако, согласно расчетам, значения мощности внешнего сигнала в этом случае должны быть гораздо больше мощности генерации самого магнетрона, то есть это ограничение не является существенным с точки зрения практической реализации такого запуска магнетронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.А. Черенищikov. О запуске магнетрона с холодным катодом на спаде импульса напряжения. // Электронная техника. Электроника СВЧ – 1973 - № 6 - стр. 20-28.
2. В.Д. Науменко, С.А. Черенищikov. Исследование запуска магнетрона с холодным

- вторично-эмиссионным катодом на спаде импульса напряжения. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика – 1984 - том XXVII, № 2 - стр. 250-256.
3. Ю.Я. Волколупов, А.Н. Довбня, В.В. Закутин, М.А. Красноголовец, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько. Быстрое формирование электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным катодом. // Журнал технической физики – 2002 - том 72, вып. 10 - стр. 124-127.
 4. И.М. Вигдорчик, В.А. Мяндр, В.Д. Науменко. Исследование работы магнетронов с холодным платиновым катодом при запуске внешним сигналом. // Труды ИРЭ АН УССР – 1970 - том 18 - стр. 33-45.
 5. J.F. Skowron. The continuous-cathode (emitting-sole) crossed-field amplifiers. // Proc. of the IEEE – 1973 - Vol. 61, No. 3 - P. 339-371.
 6. R.A. White. Cold cathode operation of a hot cathode magnetron. // IEEE Transactions on electron devices. – 1963 - Vol. ED-10, No. 1 - P. 59-61.
 7. R.A. White. More information on the cold cathode operation of a hot cathode magnetron. // IEEE Transactions on electron devices – 1963 - Vol. ED-10, No. 2 - P. 96-97.
 8. В.М. Ломакин, Л.В. Панченко. О самовозбуждении импульсного магнетрона при малых значениях начальной эмиссии катода (холодное самовозбуждение). // Электронная техника. Электроника СВЧ – 1970 - № 2 -стр. 33-42.
 9. Б.В. Бондаренко, Р.Л. Акоюн. Расчет эмиссионных характеристик пленочных автокатодов. // Радиотехника и электроника – 1972 - том 17, № 5 - стр. 1059-1061.
 10. Ю.Я. Волколупов, А.Н. Довбня, В.В. Закутин, М.А. Красноголовец, Н.Г. Решетняк, В.В. Митроченко, В.П. Ромасько, Г.И. Чурюмов. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с вторично-эмиссионным катодом. // Журнал технической физики – 2001 - том 71, вып. 2 - стр. 98-104.
 11. K. Schunemann, S.V. Sosnytskiy and D.M. Vavriv. Mathematical model of spatial-harmonic magnetrons with cold secondary-emission cathode. // Радиофизика и радиоастрономия – 2000 - том 5, вып. 2 - стр. 171-181.
 12. А.В. Соин. Возбуждение колебаний в магнетронах с вторично-эмиссионным катодом с помощью внешнего СВЧ-сигнала. // Радиофизика и радиоастрономия – 2003 - т. 8, № 3 - стр. 313-316.