

ВАКУУМНАЯ И ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.642.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ХОЛОДНОГО ЗАПУСКА МАГНЕТРОНОВ С ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

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

*Радиоастрономический институт НАН Украины
4, ул Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина*

E-mail: avtomat@rian.kharkov.ua

Проведен теоретический анализ механизмов возбуждения автоколебаний в магнетронах с вторично-эмиссионным катодом без применения вспомогательного термокатада. Изучены процессы возбуждения автоколебаний с помощью внешнего СВЧ-сигнала и с использованием модулированного импульса анодного напряжения. Определены условия, при которых возможна реализация указанных механизмов возбуждения автоколебаний. Приведены результаты сравнения численного моделирования с экспериментальными данными, полученными для магнетронов миллиметрового диапазона длин волн. Ил. 15. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: магнетрон, холодный запуск.

Магнетроны с холодным вторично-эмиссионным катодом известны как эффективные источники электромагнитных колебаний миллиметрового (мм) диапазона длин волн [1–2]. Применение такого катода по сравнению с традиционным термокатодом позволяет повысить срок службы магнетронов. Однако 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. Учитывая, что 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 создания полностью «холодных» магнетронов, в которых возбуждение автоколебаний (запуск магнетрона) возможно без применения вспомогательного термокатада [1–3]. Для этой цели применялись следующие подходы:

- запуск магнетрона с помощью внешнего СВЧ-сигнала [4, 5];
- возбуждение автоколебаний при модуляции анодного напряжения [6–8];
- создание начального количества электронов с помощью автоэммиттеров [9].

Пока данные подходы не нашли широкого применения при создании коммерческих магнетронов с холодным вторично-эмиссионным катодом. Причина – 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 исчерпывающего 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 подробного теоретического исследования соответствующих физических процессов с привлечением самосогласованных моделей магнетронов. В результате таких исследований должны быть определены основные факторы, влияющие на эффективность возбуждения колебаний, и найдены 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. Мы исследуем запуск магнетрона с помощью внешнего СВЧ-сигнала и модулированного импульса анодного напряжения. Эти два случая, как оказалось, характеризуются рядом общих закономерностей. Результаты исследования запуска такого типа магнетронов с помощью автоэммиттеров будут представлены в отдельной работе.

1. Основные принципы холодного запуска магнетрона. Рассмотрим общие принципы холодного запуска магнетрона на примере магнетрона с модулированным импульсом анодного напряжения. Покажем на упрощенной модели, каким образом модуляция анодного напряжения может приводить к запуску магнетрона с вторично-эмиссионным катодом. Рассмотрим для простоты траекторию движения электронов в плоском магнетронном диоде (рис. 1), в котором анодное напряжение U_a модулируется по следующему закону:

$$U_a = U_{a0} + U_{m0} \sin\left(2\pi \frac{t}{T_0} + \varphi_0\right), \quad (1)$$

где U_{a0} – постоянная составляющая анодного напряжения; U_{m0} – амплитуда модуляции анодного напряжения; T_0 – период модуляции; t – время; φ_0 – начальная фаза анодного напряжения.

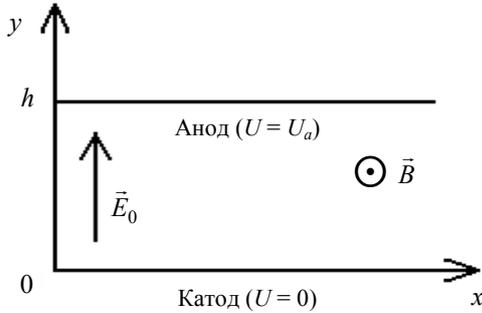


Рис. 1. Схема плоского магнетронного диода

Уравнения движения электронов в системе координат, приведенной на рис. 1, для данного случая записываются в виде

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = eB \frac{dy}{dt}; \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = eE_0 - eB \frac{dx}{dt}, \quad (2)$$

где m – масса электрона; e – заряд электрона; B – напряженность магнитного поля; $E_0 = \frac{U_a}{h}$ – напряженность электрического поля; h – расстояние между катодом и анодом; x, y – координаты электрона, $\Omega = \frac{eB}{m}$.

Пусть в начальный момент времени электрон находится в начале координат и вектор его скорости перпендикулярен направлению магнитного поля:

$$x = y = 0; \quad \frac{dy}{dt} = v_x; \quad \frac{dx}{dt} = v_y, \quad (3)$$

где v_x, v_y – проекции скорости электрона на оси координат.

Интегрирование уравнений движения (2) с данными начальными условиями приводит к выражению (4) для траектории электронов (пример траектории приведен на рис. 2). Видно, что зависимость траектории электрона от времени представляет собой сумму двух колебаний: одно – с циклотронной частотой $F_{\text{циклотр.}} = \frac{eB}{2\pi m}$, а второе – с частотой модуляции анодного напряжения $F_0 = \frac{1}{T_0}$. Из анализа приведенного решения следует, что при совпадении этих частот достигается максимальное значение энергии соударения электрона с катодом при определенных значениях начальной фазы φ_0 . При увеличении разности между циклотронной частотой и частотой модуляции зависимости $x(t)$ и $y(t)$ приобретают характер биений, амплитуда которых уменьшается по мере увеличения $\Delta F = |F_0 - F_{\text{циклотр.}}|$ и траектория приближается к циклоиде.

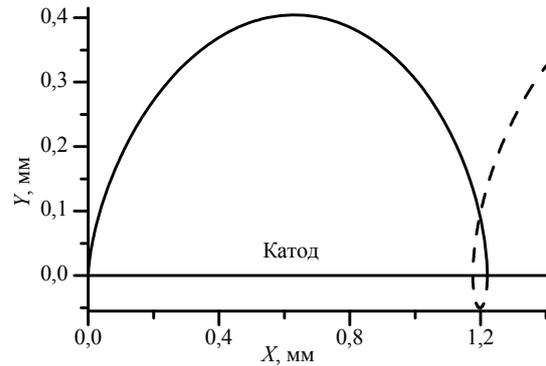


Рис. 2. Пример траектории электрона

$$\left\{ \begin{aligned} x(t) &= \left(-\frac{U_{m0}T_0}{8\pi^3 Bh(\Omega^{-2}T_0^{-2} - 1)} \cos(\varphi_0) - \frac{1}{eB} \left(\frac{eU_{m0}T_0}{2\pi h} \cos(\varphi_0) + mv_y \right) \right) \cos(\Omega t) + \frac{U_{a0}}{Bh} t + \\ &+ \frac{1}{\Omega} \left(\frac{U_{m0} \sin(\varphi_0)}{8\pi^3 Bh(\Omega^{-2}T_0^{-2} - 1)} - \frac{U_{a0}}{Bh} + v_x \right) \sin(\Omega t) + \frac{U_{m0}T_0}{8\pi^3 Bh(\Omega^{-2}T_0^{-2} - 1)} \times \\ &\times \cos\left(2\pi \frac{t}{T_0} + \varphi_0\right) + \frac{1}{eB} \left(\frac{eU_{m0}T_0}{2\pi h} \cos(\varphi_0) + mv_y \right); \\ y(t) &= \frac{1}{\Omega} \left[\left(\frac{U_{m0}T_0}{8\pi^3 Bh(\Omega^{-2}T_0^{-2} - 1)} \cos(\varphi_0) + \frac{1}{eB} \left(\frac{eU_{m0}T_0}{2\pi h} \cos(\varphi_0) + mv_y \right) \right) \sin(\Omega t) + \frac{U_{a0}}{Bh} - v_x + \right. \\ &\left. + \left(\frac{U_{m0} \sin(\varphi_0)}{4\pi^2 Bh(\Omega^{-2}T_0^{-2} - 1)} - \frac{U_{a0}}{Bh} + v_x \right) \cos(\Omega t) - \frac{U_{m0}T_0}{4\pi^2 Bh(\Omega^{-2}T_0^{-2} - 1)} \sin\left(2\pi \frac{t}{T_0} + \varphi_0\right) \right]. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Необходимым условием запуска магнетрона является лавинообразный рост количества вторично-эмиссионных электронов. Это условие осуществляется в том случае, если количество электронов, образовавшихся в результате вторичной эмиссии, превышает количество электронов, попавших на «холодный» катод.

Из полученных выражений можно найти энергию соударения $W'(\varphi_0)$ электрона с катодом в зависимости от начальной фазы анодного напряжения φ_0 . Нас будет интересовать усредненный по φ_0 коэффициент вторичной эмиссии с катода. Рассмотрим платиновый катод, для которого зависимость коэффициента вторичной эмиссии $\delta(W)$ от энергии бомбардировки дается выражением

$$\delta(W) = \begin{cases} \sqrt{5W}, & W < 0,3; \\ 1,39 - 0,8(0,8 - W)^2, & 0,3 \leq W \leq 1; \\ 1,57e^{-0,14W}, & W > 1, \end{cases} \quad (5)$$

где W измеряется в килоэлектронвольтах.

Усредненное значение коэффициента вторичной эмиссии вводится следующим образом:

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \delta(W'(\varphi_0)) d\varphi_0. \quad (6)$$

Величина I характеризует интенсивность генерации вторичных электронов.

На рис. 3 приведена зависимость величины I от частоты модуляции анодного напряжения F_0 . Максимум I наблюдается при частоте модуляции, равной циклотронной частоте. На частотах модуляции, соответствующих $nF_{\text{циклотр.}}$, где $n = 2, 3, \dots$, наблюдаются минимумы этой величины I .

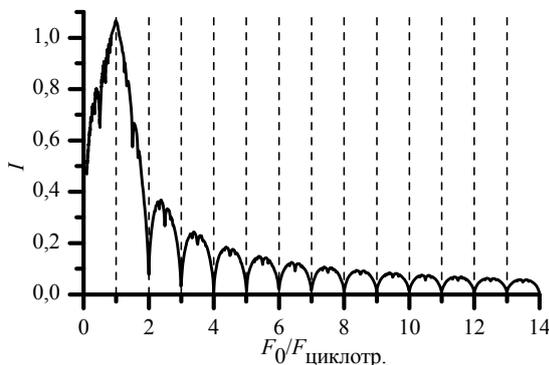


Рис. 3. Зависимость усредненного коэффициента вторичной эмиссии I от частоты модуляции анодного напряжения F_0

На рис. 4 приведена зависимость I от амплитуды модуляции анодного напряжения U_{m0} при различных периодах модуляции T_0 . С увеличением

амплитуды модуляции анодного напряжения происходит сначала увеличение коэффициента I , а затем его уменьшение. Это обусловлено наличием максимума в зависимости коэффициента вторичной эмиссии от энергии соударения электрона с катодом (5). Кроме того, на приведенных зависимостях имеются локальные минимумы и максимумы, количество которых увеличивается по мере приближения частоты модуляции к циклотронной частоте, а также имеются некоторые области параметров модуляции, для которых коэффициент $I > 1$. Эти области параметров являются пригодными для реализации холодного запуска магнетронов. Следует отметить, что при $I < 1$ существуют группы электронов, для которых $\delta(W) > 1$ в некоторых интервалах вариации φ_0 .

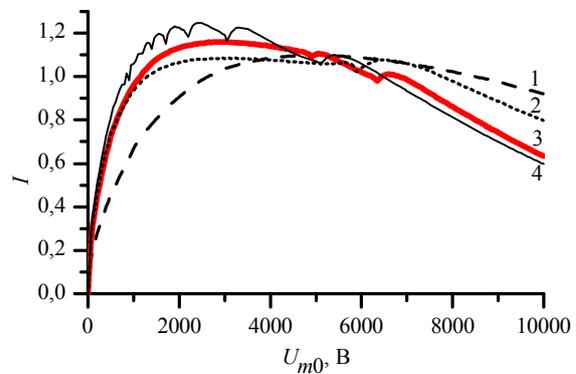


Рис. 4. Зависимости параметра I от амплитуды модуляции анодного напряжения U_{m0} при различных периодах модуляции T_0 : 1) — $T_0 = 0,04$ нс; 2) — $T_0 = 0,05$ нс; 3) — $T_0 = 0,06$ нс; 4) — $T_0 = 0,08$ нс

Оптимальная амплитуда модуляции анодного напряжения для случая платинового катода и рассматриваемого типа магнетронов находится в интервале от $0,15 U_{a0}$ до $0,25 U_{a0}$. Учитывая оптимальное значение периода модуляции, находим, что для приведенного на рис. 4 случая оптимальная величина скорости изменения анодного напряжения составляет величину порядка 10^4 кВ/мкс.

Таким образом, при модуляции анодного напряжения синусоидой высокой частоты с указанными выше параметрами U_{a0} , T_0 реализуются условия, при которых возможен холодный запуск магнетрона.

Понятно, что подобные условия холодного запуска магнетронов могут реализоваться и при использовании внешнего СВЧ-сигнала вместо модуляции анодного напряжения. Электроны при движении в пространстве взаимодействия, при условии близости частоты внешнего сигнала к циклотронной частоте, получают дополнительную энергию в высокочастотном поле. При воз-

вращении на катод определенные группы электронов могут обладать энергией, достаточной для эффективной генерации вторичных электронов и поддержания значительной величины вторично-эмиссионного тока.

2. Запуск магнетрона с помощью модулированного импульса анодного напряжения. В этом разделе мы рассмотрим более подробно механизм холодного запуска магнетрона с использованием синусоидально модулированного импульса анодного напряжения. В отличие от разд. 1, здесь мы используем более реалистичную модель магнетрона. Учитывается реальная геометрия, наличие пространственного заряда, а также нелинейные механизмы взаимодействия электронов с полем. Соответствующая самосогласованная модель была описана в работе [11]: она обобщается на случай модуляции анодного напряжения. При моделировании рассматривался магнетрон 8-мм диапазона длин волн со следующими параметрами: 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. Эти параметры соответствуют реальным магнетронам, которые производятся в Радиоастрономическом институте НАН Украины [12].

При моделировании процессов запуска магнетрона анодное напряжение U_a изменялось в соответствии с формулой (1) в течение некоторого времени T_{st} , а затем полагалось равным U_{a0} , амплитуда модуляции при этом была равна U_{m0} .

В качестве стартового состояния прибора использовалось равномерное распределение частиц по пространству взаимодействия магнетрона. Начальный заряд частиц пространства взаимодействия Q_{st} нормировался на заряд Бриллюэна Q_0 , который представляет собой суммарный заряд электронов, соответствующий стационарному состоянию Бриллюэна.

На рис. 5–7 показаны примеры временной эволюции суммарной величины пространственного заряда Q при различных параметрах запускающего импульса анодного напряжения. Видно, что процесс роста количества электронов в среднем имеет экспоненциальный характер при условии, если частота модуляции F_0 примерно совпадает с циклотронной частотой $F_{циклотр.}$, одной из ее гармоник или субгармоник (см. разд. 1).

Из приведенных графиков видно, что спадающим участкам синусоиды модуляции анодного напряжения соответствуют участки роста пространственного заряда, в то время как нарастающим участкам синусоиды соответствуют участки, на которых величина пространственного

заряда остается неизменной либо несколько уменьшается. Таким образом, данный запуск магнетрона представляет собой последовательность электронных вторично-эмиссионных лавин, каждая из которых начинается с пространственного заряда, созданного предыдущей.

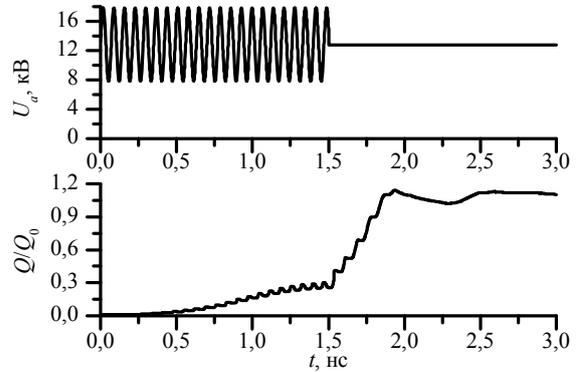


Рис. 5. Зависимость заряда в магнетроне и анодного напряжения от времени при $U_{m0} = 5$ кВ, $T_0 = 0,07$ нс, $Q_{st}/Q_0 = 0,01$, $T_{st} = 1,5$ нс

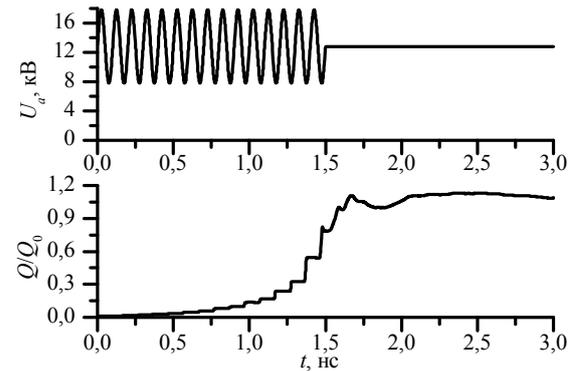


Рис. 6. Зависимость заряда в магнетроне и анодного напряжения от времени при $U_{m0} = 5$ кВ, $T_0 = 0,1$ нс, $Q_{st}/Q_0 = 0,01$, $T_{st} = 1,5$ нс

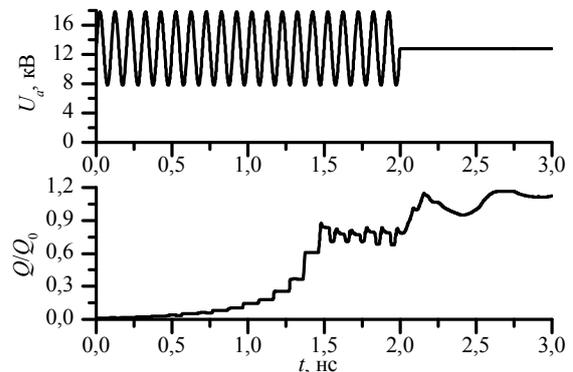


Рис. 7. Зависимость заряда в магнетроне и анодного напряжения от времени при $U_{m0} = 5$ кВ, $T_0 = 0,1$ нс, $Q_{st}/Q_0 = 0,01$, $T_{st} = 2$ нс

При достижении пространственным зарядом величины примерно 30 % от заряда Брил-

люэ-на наличие модуляции анодного напряжения перестает быть необходимым для дальнейшего запуска магнетрона (см. рис. 5). Для различных параметров модуляции анодного напряжения и разных конструкций магнетрона это значение величины пространственного заряда меняется в диапазоне от 15 до 30 %. Если модуляция напряжения будет продолжаться, то при достижении пространственным зарядом величины порядка 80 % от заряда Бриллюэна величина заряда начинает колебаться в пределах от 50 до 100 % (см. рис. 7). Для запуска магнетрона необходимо прекратить модуляцию анодного напряжения. Только после этого происходит установление стационарной рабочей величины заряда и возбуждение СВЧ-колебаний магнетрона.

Указанные закономерности возбуждения колебаний практически не зависят от величины начального заряда, которая в наших численных экспериментах изменялась от 0,01 до 10 % от заряда Бриллюэна.

Таким образом, для запуска магнетрона достаточно с помощью модуляции анодного напряжения накопить заряд порядка 30 % от Бриллюэновского, после чего можно прекращать модуляцию анодного напряжения. Из расчетов видно, что время накопления необходимого заряда составляет всего несколько наносекунд, т. е. задержки импульса генерации по отношению к запускающему импульсу увеличиваются незначительно с точки зрения практического применения магнетронов.

Следует отметить, что такие малые времена запуска магнетрона достигаются при выборе некоторого оптимального значения амплитуды модуляции анодного напряжения. Подтверждение этому представлено на рис. 8, где показано изменение времени задержки $T_{0,3}$, за которое накапливается заряд, равный 30 % от заряда Бриллюэна, в зависимости от амплитуды модуляции импульса анодного напряжения.

Наиболее быстро заряд накапливается в пространстве взаимодействия магнетрона при амплитуде модуляции анодного напряжения в диапазоне от 5,5 до 7,5 кВ, что соответствует глубине модуляции анодного напряжения U_a примерно от 0,4 до 0,6. При увеличении амплитуды модуляции происходит резкое увеличение времени задержки запуска магнетрона вплоть до прекращения возбуждения СВЧ-колебаний вследствие попадания все большей части электронов на анод при росте амплитуды модуляции. Уменьшение же амплитуды модуляции также приводит к росту времени задержки и прекращению запуска магнетрона, но уже из-за того, что энергия электронов, бомбардирующих вторично-эмиссионный катод, недостаточна для инициирования лавинообразного роста заряда в пространстве взаимодействия магнетрона.

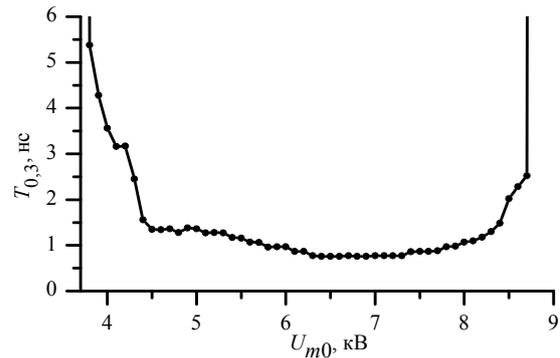


Рис. 8. Зависимость времени $T_{0,3}$ от амплитуды модуляции запускающего импульса

На рис. 9 показаны зависимости времени $T_{0,3}$ от частоты модуляции импульса анодного напряжения F_0 при различных радиусах анода. Зоны возникновения вторично-эмиссионной электронной лавины примерно соответствуют значениям F_0 , находящимся в резонансных соотношениях с циклотронной частотой, но не точно совпадают с ней, ее гармониками или субгармониками. Это связано с тем, что в реальном магнетроне условия указанного резонанса зависят также от геометрии прибора и величины пространственного заряда.

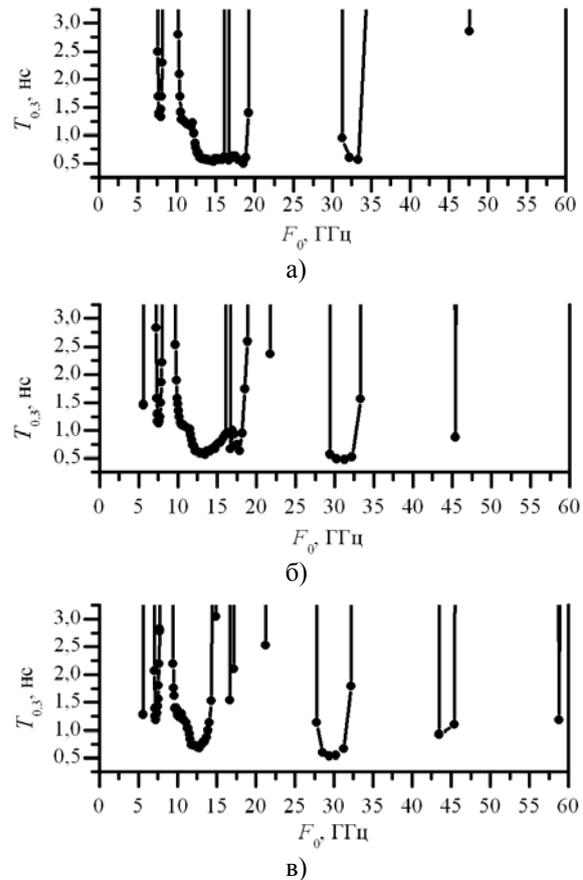


Рис. 9. Зависимость времени $T_{0,3}$ от частоты модуляции запускающего импульса при разных анодных радиусах магнетрона: а) – $R_a = 3$ мм; б) – $R_a = 2,5$ мм; в) – $R_a = 2,25$ мм

Однако определяющим фактором для холодного запуска является выполнение резонансных условий между частотой модуляции и циклотронной частотой. Это иллюстрирует график на рис. 10, где показана зависимость оптимального периода модуляции от циклотронного периода, который изменялся путем вариации величины магнитного поля.

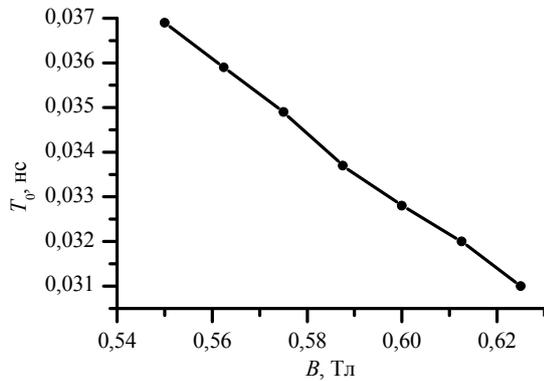


Рис. 10. Зависимость оптимального периода модуляции запускающего импульса от магнитного поля

3. Запуск магнетрона с помощью внешнего СВЧ-сигнала. Практическая реализация высокочастотной модуляции анодного напряжения с большим коэффициентом модуляции является достаточно сложной задачей. Более простым решением является подача в магнетрон внешнего СВЧ-сигнала. Мы рассмотрим особенности такого способа холодного запуска магнетрона. Следует отметить, что он подобен рассмотренному в разд. 2 способу возбуждения магнетрона.

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. 11. Здесь приведен участок эквивалентной цепи резонансной системы магнетрона, соответствующий трем соседним анодным резонаторам. В одном из резонаторов осуществляется вывод и ввод СВЧ-энергии. Внешний СВЧ-сигнал 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.

Моделирование проводилось для двух различных магнетронов, которые исследовались экспериментально в работах [7] и [13].

Параметры магнетрона из работы [7]: 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 резона-

торов $N = 16$, 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.

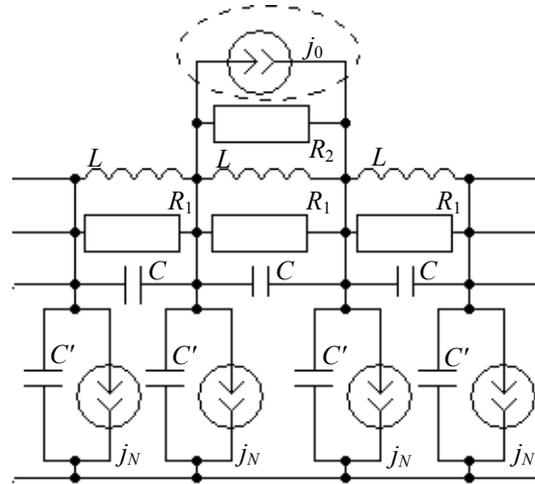


Рис. 11. Эквивалентная схема трех резонаторов магнетрона при моделировании воздействия внешнего СВЧ-сигнала

Параметры магнетрона из работы [13]: 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.

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

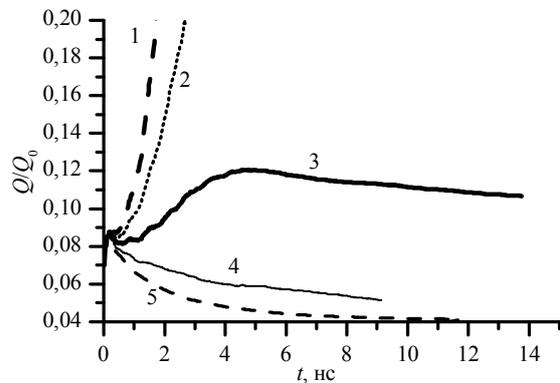


Рис. 12. Зависимость заряда пространства взаимодействия от времени при начальном заряде равном 7 % от заряда Бриллюэна, для магнетрона из работы [13]: 1) – $P_{ext} = 11,2$ кВт; 2) – $P_{ext} = 8,5$ кВт; 3) – $P_{ext} = 6,3$ кВт; 4) – $P_{ext} = 4,4$ кВт; 5) – $P_{ext} = 2,8$ кВт

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, в то время как 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, 13] с нашими результатами численного моделирования. В качестве стартового состояния прибора при моделировании использовалось равномерное распределение частиц по пространству взаимодействия магнетрона, при этом значение величины начального заряда пространства взаимодействия магнетрона варьировалось, поскольку ее экспериментальное значение не было известно.

На рис. 13 показаны графики экспериментальной [13] и расчетной зависимостей 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.

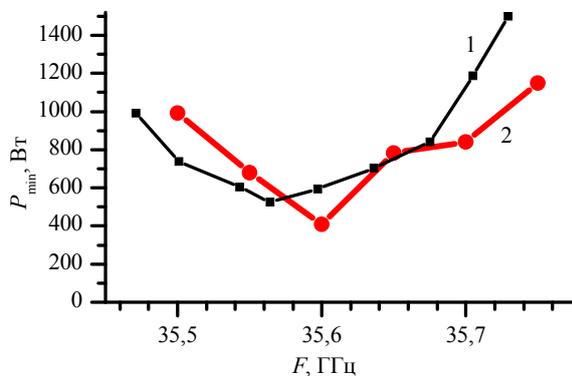


Рис. 13. Сравнение экспериментальной [13] и расчетной зависимостей минимальной мощности, необходимой для запуска, от частоты запускающего сигнала: 1) – эксперимент; 2) – расчет ($Q_{st} = 0,17 Q_0$)

На рис. 14 показаны графики экспериментальной [7] и расчетной зависимостей времени запуска магнетрона $T_{\text{зап}}$ от мощности внешнего сигнала P_{ext} . Видно, что 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 их отличиями: рабочей длиной волны, размерами пространства взаимодействия и, возможно, давлением остаточных газов.

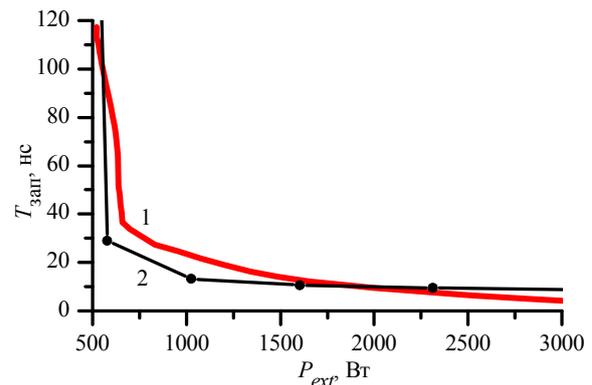


Рис. 14. Сравнение экспериментальной [7] и расчетной зависимостей времени запуска магнетрона от мощности внешнего сигнала: 1) – эксперимент; 2) – расчет ($Q_{st} = 0,08 Q_0$, $F_0 = 42$ ГГц)

Анализируя вышеприведенные данные можно сделать следующие выводы. Для запуска магнетрона при помощи внешнего СВЧ-сигнала требуется некоторое начальное количество электронов, зависящее от мощности внешнего сигнала. Согласно полученным результатам моделирования требуемая величина начального заряда составляет величину порядка 10 % от заряда Бриллюэна. Как уже отмечалось, увеличение мощности выходного сигнала приводит к уменьшению времени запуска магнетрона. При этом следует отметить, что, как и в случае с увеличением амплитуды модуляции анодного напряжения, 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, т. е. это ограничение не является существенным с точки зрения практической реализации такого запуска магнетронов.

4. Образование начального заряда в магнетроне. В каждом из рассмотренных механизмов холодного запуска магнетронов требуется наличие некоторого «затравочного» количества электронов для инициирования вторичной эмиссии. Вероятная причина существования таких электронов может быть связана с тем, что в усло-

виях низкого давления, которое обеспечивается в реальных конструкциях приборов, остаточный газ является сильно ионизированным. Об этом, в частности, свидетельствует тот факт, что в холодных магнетронах протекает определенный ток ионизации. Согласно приведенным в работе [14] данным ток положительных ионов на катод для подобной рассматриваемой нами магнетронной системы составляет около $10 \div 20$ мА. Соответственно, в пространстве взаимодействия за счет ионизации образуется определенное количество электронов. Эту ситуацию можно промоделировать, вводя в пространство взаимодействия такое количество электронов, которое соответствует указанному току ионов. В результате нашего численного моделирования были получены зависимости заряда в пространстве взаимодействия от времени при наличии и отсутствии внешнего СВЧ-сигнала при токе ионизации 10 и 20 мА, которые приведены на рис. 15.

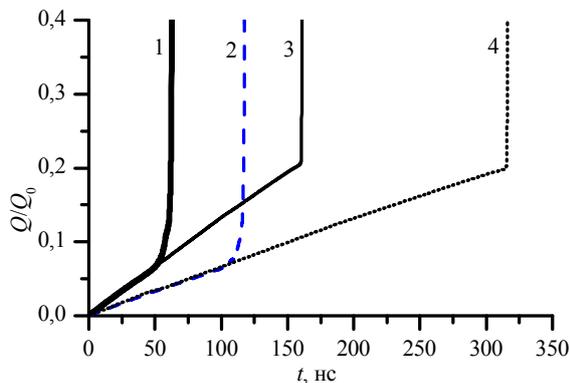


Рис. 15. Зависимость заряда в пространстве взаимодействия от времени при наличии внешнего СВЧ-сигнала (кривые 1, 2) и его отсутствии (кривые 3, 4), а также при токе ионизации 10 мА (кривые 3, 4) и 20 мА (кривые 1, 2)

Как видно из рис. 15, при накоплении за счет ионизации в пространстве взаимодействия заряда около 7 % от заряда Бриллюэна и наличии внешнего СВЧ-сигнала происходит лавинообразное увеличение количества электронов. Если внешний СВЧ-сигнал отсутствует, то лавинообразный рост числа электронов происходит значительно позже (в 3 раза дольше, чем при использовании внешнего СВЧ-сигнала) или вообще не наступает.

Следует отметить, что приведенное объяснение происхождения «затравочных» электронов является лишь предположением и полноценное обоснование может быть дано только после тщательного и всестороннего изучения данного вопроса, что выходит за рамки нашей работы.

Выводы. Проведен теоретический анализ запуска магнетрона с помощью внешнего СВЧ-сигнала и модулированного импульса анодного

напряжения, а также выполнено численное моделирование данных способов запуска. В результате исследования различных методов холодного запуска магнетрона можно сделать следующие выводы:

- запуск магнетрона с помощью внешнего СВЧ-сигнала, на спаде импульса напряжения и с помощью модуляции анодного напряжения имеют в своей основе один и тот же механизм – увеличение энергии электрона, соударяющегося с катодом, при резком уменьшении анодного напряжения. При определенных условиях это приводит к возникновению вторично-эмиссионной лавины и необходимому для работы магнетрона анодному току;

- существуют пороговые значения амплитуды модуляции анодного напряжения или мощности входного СВЧ-сигнала, при превышении которых происходит холодный запуск магнетрона. Эти пороговые значения снижаются при увеличении начального заряда в пространстве взаимодействия;

- величина начального заряда пространства взаимодействия влияет лишь на время запуска магнетрона и практически не влияет на его выходные характеристики (мощность, КПД, частоту генерации, анодный ток);

- одним из вероятных механизмов возникновения начального заряда в пространстве взаимодействия магнетрона является ионизация остаточного газа.

Авторы выражают искреннюю благодарность В. Д. Науменко за обсуждение этой работы и ряд ценных замечаний.

1. Черенищев С. А. О запуске магнетрона с холодным катодом на спаде импульса напряжения // *Электронная техн. Электроника СВЧ*. – 1973. – № 6. – С. 20–28.
2. Науменко В. Д., Черенищев С. А. Исследование запуска магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом на спаде импульса напряжения // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1984. – XXVII, № 2. – С. 250–256.
3. Волколутов Ю. Я., Довбня А. Н., Закутин В. В. и др. Быстрое формирование электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным катодом // *Журн. техн. физики*. – 2002. – 72, вып. 10. – С. 124–127.
4. Вигдорчик И. М., Мяндр В. А., Науменко В. Д. Исследование работы магнетронов с холодным платиновым катодом при запуске внешним сигналом // *Тр. Ин-та радиофизики и электрон. АН УССР*. – 1970. – 18. – С. 33–45.
5. Skowron J. F. The continuous-cathode (emitting-sole) crossed-field amplifiers // *Proc. of the IEEE*. – 1973. – 61, No. 3. – P. 339–371.
6. White R. A. Cold cathode operation of a hot cathode magnetron // *IEEE Transactions on electron devices*. – 1963. – ED-10, No. 1. – P. 59–61.
7. White R. A. More information on the cold cathode operation of a hot cathode magnetron // *IEEE Transactions on electron devices*. – 1963. – ED-10, No. 2. – P. 96–97.
8. Ломакин В. М., Панченко Л. В. О самовозбуждении импульсного магнетрона при малых значениях начальной эмиссии катода (холодное самовозбуждение) // *Электронная техн. Электроника СВЧ*. – 1970. – № 2. – С. 33–42.
9. Бондаренко Б. В., Аюбян Р. Л. Расчет эмиссионных характеристик пленочных автокатодов // *Радиотехника и элект-*

- трон. – 1972. – 17, № 5. – С. 1059–1061.
10. Волколутов Ю. Я., Довбня А. Н., Закутин В. В. и др. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с вторично-эмиссионным катодом // Журн. техн. физики. – 2001. – 71, вып. 2. – С. 98–104.
 11. Schunemann K., Sosnytskyi S. V., Vavriv D. M. Mathematical model of spatial-harmonic magnetrons with cold secondary-emission cathode // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – 5, вып. 2. – С. 171–181.
 12. Касаткин Л. В., Рукин В. П., Еремка В. Д. и др. Электровакуумные приборы диапазона миллиметровых волн. – Севастополь: Вебер, 2007. – 252 с.
 13. Соин А. В. Возбуждение колебаний в магнетронах с вторично-эмиссионным катодом с помощью внешнего СВЧ-сигнала // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – 8, № 3. – С. 313–316.
 14. Малюгин В. И., Солинский Г. Г. Исследование ионной бомбардировки катодов в амплитроне // Электронная техн. Электроника СВЧ. – 1970. – № 10. – С. 113–117.

RESEARCH ON COLD START PROCESS IN MAGNETRONS WITH COLD SECONDARY-EMISSION CATHODE

N. I. Avtomonov, D. M. Vavriv, S. V. Sosnytsky

Theoretical analysis of auto-oscillations excitation mechanism in magnetrons with cold secondary-emission cathode and

without auxiliary cathode has been performed. Auto-oscillations excitation by external UHF signal or modulation of anode voltage has been studied. Conditions of specified mechanisms implementation have been defined. Comparison of numerical modeling results and experimental data, obtained for millimeter wavelength band magnetrons, has been carried out.

Key words: magnetron, cold start.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ХОЛОДНОГО ЗАПУСКУ МАГНЕТРОНІВ ІЗ ВТОРИННО-ЕМІСІЙНИМ КАТОДОМ

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

Проведено теоретичний аналіз механізмів збудження автоколивань у магнетронах із вторинно-емісійним катодом без застосування допоміжного термокатоду. Вивчено процеси збудження автоколивань за допомогою зовнішнього НВЧ-сигналу та з застосуванням модульованого імпульсу анодної напруги. Визначено умови, за яких можлива реалізація зазначених механізмів збудження автоколивань. Наведено результати порівняння чисельного моделювання з експериментальними даними, що отримані для магнетронів міліметрового діапазону довжин хвиль.

Ключові слова: магнетрон, холодний запуск.

Рукопись поступила 27 апреля 2009 г.