

С. А. Бердин, Н. П. Гадецкий, В. Г. Коренев, А. Н. Лебеденко, М. И. Марченко, И. И. Магда, О. Г. Мележик, В. А. Сошенко, К. В. Чижев, С. Н. Терехин*, А. С. Тищенко*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
НАН Украины, Харьков, Украина*

**Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: magda@kipt.kharkov.ua

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО МАГНЕТРОНА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Настоящая работа является продолжением исследований слабoreлятивистского импульсного магнетрона миллиметровых волн [1, 2], целью которых была оптимизация электрических параметров прибора и выявление факторов, препятствующих его эффективной работе. Приводятся результаты экспериментального исследования условий возбуждения 48-резонаторного релятивистского магнетрона 8-мм диапазона (PM8), в ходе которого определялись частота и типы колебаний, измерялись зависимости интенсивности генерации от величины внешних статических E - и H -полей. Обнаружено, что в широком диапазоне значений внешних полей основным типом колебаний для исследуемого диапазона частот 37...41 ГГц является π -вид. Также приводятся результаты оптимизации рабочих режимов генерации (импульсного высоковольтного напряжения U_0 и индукции внешнего магнитного поля B_0) в зависимости от геометрических параметров пространства взаимодействия магнетрона, а именно – от размеров катода и величины зазора d_{ca} между катодом и анодом. Ил. 5. Библиогр.: 4 назв.

Ключевые слова: релятивистский импульсный магнетрон, миллиметровый диапазон, резонаторная система, дисперсионная характеристика.

1. Экспериментальная установка. На рис. 1 схематически представлено устройство 48-резонаторного релятивистского магнетрона 8-мм диапазона магнетрона (PM8). Высоковольтное импульсное питание магнетрона ($U_0 = 100...350$ кВ, $t_p = 35...40$ нс) осуществлялось от двойной формирующей линии с выходным импедансом 16 Ом, подключенной к коаксиальному вакуумному диоду через вакуумный изолятор 1. Сменный цилиндрический катод 4 из нержавеющей стали крепился на длинной катодной ножке 3 диаметром 12 мм из того же материала. Анодный блок, выполненный в виде равнорезонаторной замедляющей системы, помещен в центре цилиндрического вакуумного сверхразмерного волновода 7. Дифракционный (аксиальный) вывод СВЧ-излучения осуществляется через конический рупор 6, размещенный в волноводе 7. В торце волновода расположено радиопрозрачное окно. Волновод круглого сечения изготовлен также из нержавеющей стали и имеет размеры $d_w = 80$ мм, $L_w = 600$ мм. Вдоль его наружных стенок расположен импульсный соленоид 2, создающий магнитное поле с индукцией до $B_0 = 0,8$ Тл. Краевые поля соленоида рассчитывались с учетом минимизации попадания электронов, эмитированных различными участками катодной ножки 3, на диэлектрические поверхности изолятора вакуумного диода и выходного ВЧ-окна.

Расчет магнетрона на заданное напряжение U_0 и длину волны генерируемых колебаний λ основан на традиционных методах [3, 4], предусматривающих задание числа резонаторов N и вида колебаний резонаторной системы, выбор геометрии ЭДС (диаметров анода d_a , катода d_c и

размеров резонаторов), определение дисперсионной характеристики и рабочих режимов.

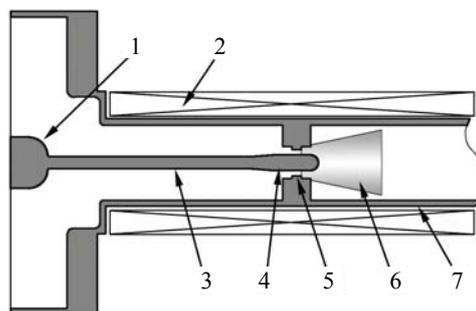


Рис. 1. Схема релятивистского магнетрона: 1 – изолятор вакуумного диода; 2 – импульсный соленоид; 3 – катодная ножка; 4 – катод; 5 – анодный блок; 6 – рупор; 7 – сверхразмерный волновод

Для экспериментального исследования магнетрона в предполагаемом диапазоне частот 36...38 ГГц использовалась замедляющая система, с диаметром анода $d_a = 22$ мм и числом резонаторов $N = 48$. При этом период системы был равен 1,44 мм, толщина ламелей 0,6 мм и глубина резонаторов 1,38 мм. Диаметр катода d_c в одном случае был равен 12 мм, в другом – 14 мм и в третьем – 16 мм, соответственные величины зазора катод–анод d_{ca} – 5 мм, 4 мм и 3 мм. Предполагалось, что PM8 работает на пространственных гармониках π - и $\pi/2$ -видов. Результаты измерений распределения ВЧ-поля в «холодной» резонаторной системе, проведенные зондовым методом в заданном частотном диапазоне, подтвердили возможность возбуждения колебаний как π -, так и $\pi/2$ -вида.

Результаты расчетов дисперсионной характеристики РМ8, соответствующие выбранным рабочим частотам и видам колебаний, представлены на рис. 2.

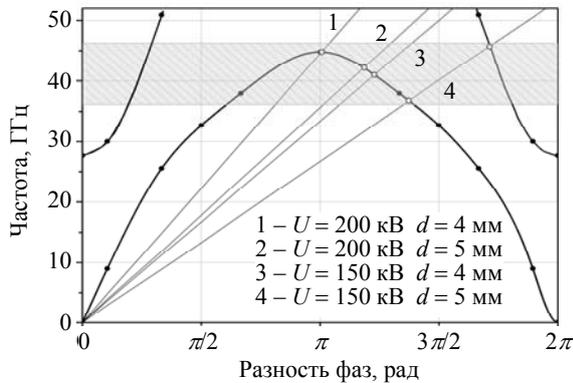


Рис. 2. Дисперсионная диаграмма РМ8 для $d_{ca} = 4$ мм и $d_{ca} = 5$ мм. По оси абсцисс указана разность фаз поля между соседними резонаторами замедляющей системы

Области рабочих режимов, рассчитанные для различных значений зазора катод–анод, приведены на рис. 3 вместе с экспериментальными данными.

Для исследования влияния объемного заряда сильнооточного электронного потока на рабочие характеристики магнетрона проведено численное 3D-моделирование динамики взаимодействия «волна – электронный поток» методом крупных частиц. Численные эксперименты в основном подтвердили правильность выбранных параметров замедляющей системы и рабочих режимов. В то же время было отмечено увеличение частоты генерации (до 39 ГГц и более) по сравнению с данными расчета. Было обнаружено преимущественное возбуждение типов колебаний, близких к π -виду ($n = 22 \div 24$). Кроме π -вида колебаний в исследуемом диапазоне частот при некоторых значениях U_0 и B_0 при моделировании наблюдалась генерация полей существенно меньшей интенсивности в модах, близких к $\pi/2$.

2. Экспериментальное исследование РМ8.

Расчетные режимы генерации РМ8 сравнивались с экспериментальными данными, полученными при измерениях интенсивности СВЧ-излучения для различных значений питающего напряжения U_0 , индукции магнитного поля B_0 и величины промежутка катод–анод d_{ca} (рис. 3).

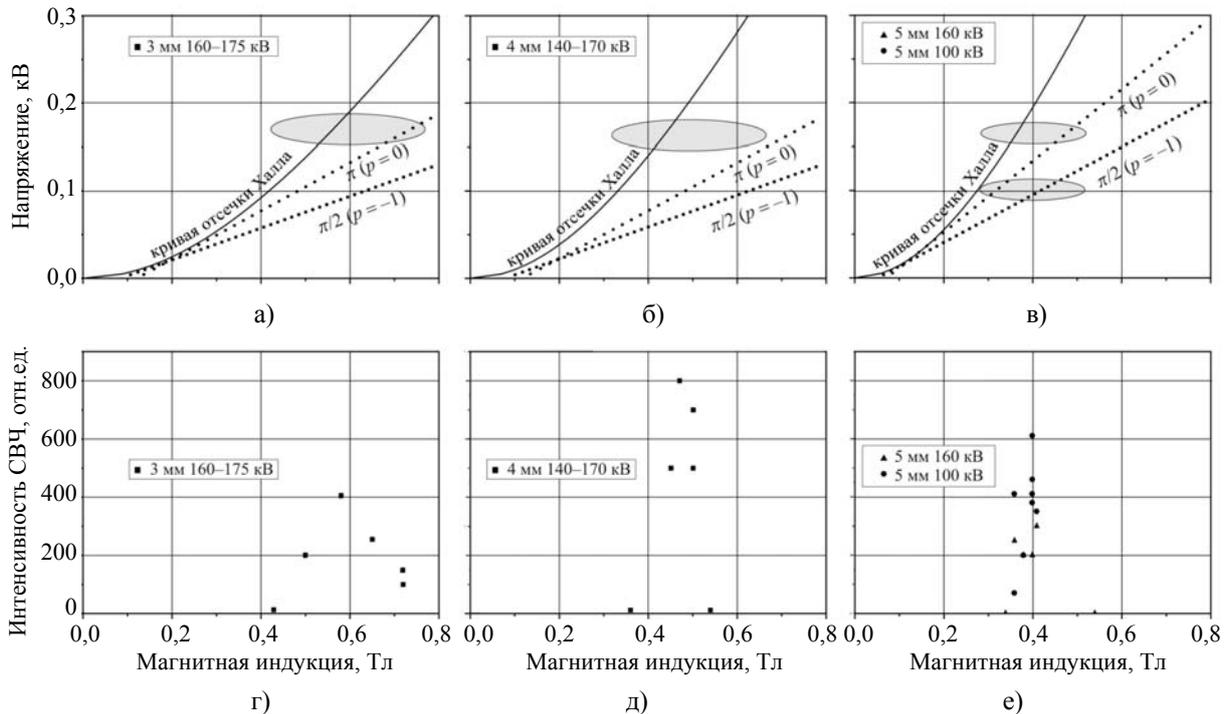


Рис. 3. Диаграммы рабочих режимов РМ8 (а–в) и интенсивность излучения при различных U_0 и B_0 (г–е) для зазоров $d_{ca} = 3$ мм (а, г), 4 мм (б, д) и 5 мм (в, е)

Для удобства определения вида колебания на расчетных диаграммах рабочих режимов (рис. 3, а–в) заштрихованы области, соответствующие экспериментальным значениям U_0 и B_0 ,

для которых приведены зависимости СВЧ-поля (U_0, B_0) (рис. 3, г–е).

Полученные данные свидетельствуют о следующем:

- рабочая область генерации РМ8 при заданных U_0 и d_{ca} характеризуется хорошо выраженным максимумом магнитной индукции B_{\max} ;
- при уменьшении d_{ca} значение B_{\max} увеличивается, так как изменяются условия синхронизма замедленной волны с дрейфовым движением частиц: $v_{ph} \approx v_D = cE_0/B_0$ (фазовая скорость волны близка к скорости азимутального дрейфа электронов);
- практически во всех режимах при малых значениях магнитной индукции нарушаются расчетные условия халловской отсечки, типичные для традиционных магнетронов; существование генерации в этом диапазоне значений B_0 можно объяснить только искажением ларморовских траекторий частиц из-за меньшей величины эффективного электрического поля вблизи анодного блока (по сравнению с прямым расчетом $E \approx U_0/d_{ca}$); этот эффект усиливается при меньших зазорах, указывая на усиление действия полей объемного заряда либо ВЧ-полей вблизи резонаторов;
- основным видом колебаний во всех режимах является π -вид. Возможность работы на $\pi/2$ -виде существует только для «низковольтных» режимов и больших зазоров $d_{ca} = 5$ мм, т. е. при меньших скоростях дрейфа v_D .

Одновременно с помощью набора полосовых волноводных фильтров проводилось измерение частоты излучения магнетрона в диапазоне частот 35...38,5 ГГц. Данные этих измерений приведены на рис. 4.

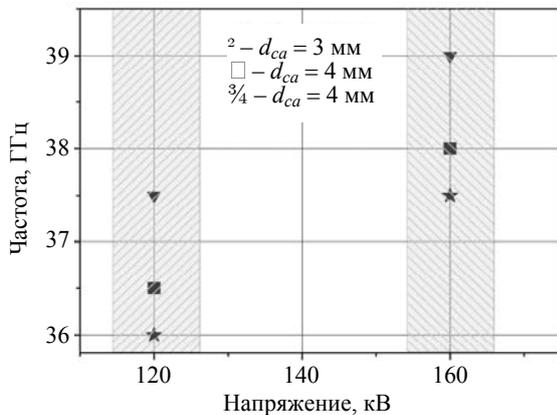


Рис. 4. Смещение частоты генерации при изменении величины зазора катод-анод

Как видно, изменения частоты генерации хорошо соответствуют изменениям U_0 и B_0 , что подтверждает расчетные данные $f_{\text{свч}}(U_0, B_0)$ и выбранные режимы работы (см. рис. 3). Действительно, меньшие электрические и большие магнитные поля приводят к замедлению дрейфа потока частиц и, соответственно, к уменьшению частоты генерации на колебаниях π -вида основной пространственной гармоники.

Интересно отметить, что почти во всех наблюдаемых режимах реализовался один и тот же тип колебаний. На рис. 5 приведена фотография катода с $d_c = 16$ мм ($d_{ca} = 3$ мм), на котором благодаря локальным СВЧ-пробоям проявились очертания ламелей замедляющей системы и места пучностей электрического СВЧ-поля вблизи резонаторов. Следы пробоев у края резонаторов идут через один след от ламелей замедляющей системы, что позволяет классифицировать тип колебаний как π -вид.

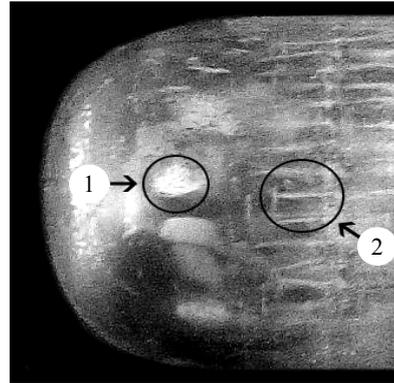


Рис. 5. Фотография катода со следами СВЧ-пробоев: 1 – очертания ламелей замедляющей системы; 2 – пучности СВЧ-поля

Выводы. Результаты исследования РМ8 продемонстрировали в основном хорошее соответствие расчетным значениям и данным 3D-моделирования. При рабочих зазорах катод-анод от 3 до 5 мм генерация происходила в диапазоне 36...39 ГГц, что соответствует возбуждению колебаний π -вида основной пространственной гармоники. В то же время длительность импульса генерации $t_{\text{свч}}$, равная $3 \div 8$ нс практически во всех режимах, была существенно меньше длительности импульса питающего напряжения $t_p = 35$ нс. Это свидетельствует о наличии факторов, негативно влияющих на работу прибора. Следы СВЧ-пробоев между анодом и катодом, а также расширение рабочих параметров (U_0, B_0) в область халловской отсечки свидетельствуют о высоком уровне СВЧ-полей, возбуждаемых в рабочем зазоре сильноточным потоком электронов. Можно сделать вывод, что в режиме развитой генерации на частицы пучка, кроме статических полей B_0 и $E_0 \approx U_0/d_{ca}$ действуют сравнимые по величине поля СВЧ-колебаний и объемного заряда, которые существенно изменяют режимы возбуждения полей в пространстве взаимодействия.

Библиографический список

1. Релятивистский магнетрон миллиметрового диапазона / И. И. Магда, С. А. Бердин, Н. П. Галецкий и др. // 18-я Междунар. Крымская конф. СВЧ-техника и телеком-

- муникационные технологии (КрыМиКо'2008): материалы конф. – Севастополь, 2008. – С. 637–639.
2. *Relativistic Magnetron of 8 mm Waveband* / I. I. Magda, N. P. Gadetski, E. I. Kravtsova et al. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электрон. и новые методы ускорения. – 2008. – № 4. – С. 18–20.
 3. *Collins J. B. Microwave Magnetrons* / J. B. Collins. – N. Y.: McGraw-Hill, 1948. – 806 p.
 4. *Прокопчук Ю. А. Собственные колебания резонаторной системы магнетронного типа* / Ю. А. Прокопчук, В. Г. Сологуб // Радиотехника: науч.-техн. сб. / Харьков. гос. ун-т. – X., 1969. – Вып. 10. – С. 216–221.

Рукопись поступила 24.10.2013.

S. A. Berdin, N. P. Gadetski, V. G. Korenev,
A. N. Lebedenko, M. I. Marchenko, I. I. Magda,
O. G. Melezhik, V. A. Soshenko, K. V. Chizhov,
S. N. Terekhin, A. S. Tishchenko

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A MILLIMETER WAVE RELATIVISTIC MAGNETRON

In this work the authors continue their investigation of a millimeter wave weakly relativistic pulse magnetron [1, 2], aimed at the optimization of electric parameters of the device and pointing out the disturbing factors in its efficient performance. The research is illustrated by experimental results featuring the excitation conditions of an 8-mm relativistic magnetron consisting of 48 resonators (RM8). The experiment sought to define oscillations' frequency and modes and to obtain numerical values of the relations between the generation intensity and the magnitudes of the external static E - and H -fields. It was revealed that, over a wide value range of the external fields, the π -mode is the principal oscillation mode of the frequency range under study (37...41 GHz). The paper also reports the results of optimizing the operation modes of generation (pulse high-

voltage U_0 and external magnetic field induction B_0) and their dependence on the geometric parameters of magnetron's interaction space, namely on cathode's dimension and the distance between the cathode and anode d_{ca} .

Key words: relativistic pulse magnetron, millimeter wave band, cavity system, dispersion curve.

С. А. Бердін, М. П. Гадецький, В. Г. Коренев,
О. М. Лебеде́нко, М. І. Марченко, І. І. Магда,
О. Г. Мележик, В. А. Сошенко, К. В. Чижов,
С. М. Терехін, А. С. Тіщенко

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЯТИВІСТСЬКОГО МАГНЕТРОНА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Ця робота є продовженням досліджень слаборелятивістського імпульсного магнетрона міліметрових хвиль [1, 2], які мали на меті оптимізацію електричних параметрів пристрою та визначення факторів, які перешкоджають його ефективному функціонуванню. Наведено результати експериментального дослідження умов збудження 48-резонаторного релятивістського магнетрона 8-мм діапазону (РМ8), в ході якого було визначено частоту та типи коливань, виміряно залежності інтенсивності генерації від величини зовнішніх статичних E - і H -полів. Виявлено, що у широкому діапазоні значень зовнішніх полів основним типом коливань для досліджуваного діапазону частот 37...41 ГГц є π -вид. Також наведено результати оптимізації робочих режимів генерації (імпульсної високовольтної напруги U_0 та індукції зовнішнього магнітного поля B_0) у залежності від геометричних параметрів простору взаємодії магнетрона, а саме – від розмірів катода і величини проміжку між катодом і анодом d_{ca} .

Ключеві слова: релятивістський імпульсний магнетрон, міліметровий діапазон, резонаторна система, дисперсійна характеристика.