

УДК 621.385.69

МОЩНЫЕ ГИРОТРОНЫ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ

В. Е. Запевалов, С. А. Малыгин, Ш. Е. Цимринг

Рассмотрен экспериментальный гиротрон на второй гармонике циклотронной частоты с максимальной выходной мощностью 0,6 Мвт. Исследования показывают, что основными факторами, ограничивающими выходную мощность, являются конкуренция мод и влияние поля пространственного заряда. Приведены результаты экспериментов по электронной селекции с помощью дополнительного поглощающего пучка.

Введение. Гиротроны, работающие на второй гармонике циклотронной частоты (МЦР-2), по сравнению с МЦР-1 помимо двухкратного снижения требуемого магнитного поля в рабочем пространстве, характеризуются меньшей тепловой нагрузкой коллектора, меньшей критичностью параметров электронной пушки, а также большим значением оптимального по КПД тока пучка. Теория МЦР-2 с оптимизированным распределением высокочастотного поля в резонаторе и экспериментальные данные показали [1 - 3], что по максимальному КПД эти приборы близки к гиротронам на основном циклотронном резонансе (МЦР-1). Недостатком МЦР-2, затрудняющим получение больших средних мощностей, особенно в коротковолновой части миллиметрового диапазона, является необходимость использования по сравнению с МЦР-1 более добротных резонаторов, что приводит к росту омических потерь. Однако, наиболее серьезной проблемой при повышении мощности МЦР-2 является конкуренция со стороны мод, синхронных с пучком на основном циклотронном резонансе.

В гиротроне с рабочей модой H_{021} ($\lambda \approx 9$ мм) конкуренция паразитных мод приводила к неустойчивости рабочей моды (многочастотность, перескоки частоты, резкое снижение КПД, срыв

колебаний) уже при величине выходной мощности 35 кВт. Применение электронной и электродинамической селекции [4] способствовало ослаблению паразитной генерации и позволило повысить выходную мощность в том же макете до 160 кВт.

Эксперименты и теория устойчивости колебаний при наличии конкуренции мод [4, 5] позволяют дать следующие рекомендации:

1) длина участка однородного магнитного поля не должна превышать минимума, обеспечивающего приемлемый КПД;

2) продольное распределение высокочастотного поля рабочей моды $f_1(\zeta)$ должно по сравнению с паразитными модами усиливать группировку электронного пучка на начальном участке резонатора;

3) функция $f_1(\zeta)$, добротность резонатора, а также средний радиус R_0 электронного пучка в резонаторе должны минимизировать фактор \hat{Q} , характеризующий запас устойчивости рабочей моды [6]:

$$\hat{Q} = \frac{1}{2\beta_1^2} \frac{G_2}{G_1} \frac{\int |f_1(\zeta)|^2 d\zeta}{\int |f_2(\zeta)|^2 d\zeta} \quad (1)$$

Здесь ζ - безразмерная продольная координата. Индекс 1 относится к рабочей, 2 - к паразитной моде. Структурные факторы мод

$$G_m = \frac{J_{m-n}^2(2\pi R_0/\lambda_s)}{[(2\pi R/\lambda_s)^2 - m^2] J_m^2(2\pi R/\lambda_s)} \quad (2)$$

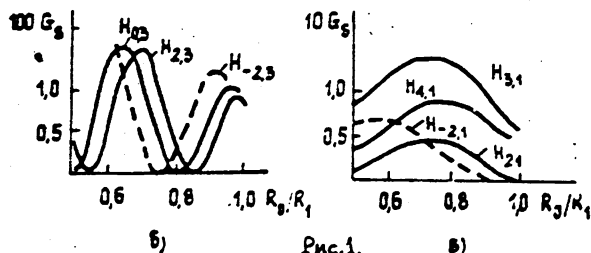
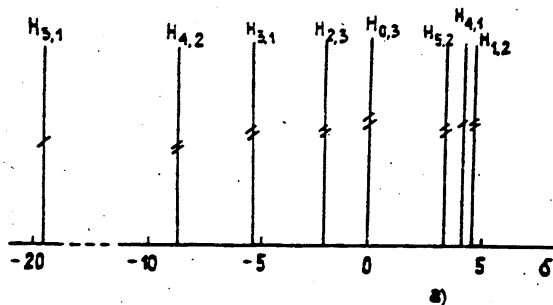


Рис.1. б) в)

4) при работе в импульсном режиме целесообразно применять схему питания гиротрона, способствующую первоначальному возбуждению рабочей моды [7].

Настоящая работа является продолжением исследований [4] и посвящена изучению роли паразитных мод и параметров пучка на более высоких мощностях.

1. Экспериментальный гиротрон. Схема экспериментального

гиротрона разрабатывалась с учетом рекомендаций [1 - 4] ($\lambda \approx 1,2 - 1,3$ см). Электронно-оптическая и магнитная системы позволяли возбуждать на второй гармонике моды $H_{4,2,1}'$, $H_{8,1,1}'$, $H_{2,3,1}'$, $H_{0,3,1}'$. Спектр мод резонатора приведен на рис. 1а. Здесь число черточек на вертикальных линиях равно номеру гармоники гирочастоты. Структурные факторы рабочих и паразитных мод показаны на рис. 1б и 1в соответственно. На них относительная расстройка собственных чисел мод относительно собственного числа рабочей моды $H_{0,3,1}$ $\delta = \left(\frac{2\nu_{mn}}{n_s \nu_{03}} - 1 \right) \%$, ν_{mn} - нуль производной функции Бесселя J_n , m, n - азимутальный и радиальный индексы мод соответственно, R_0 - радиус пучка в рабочем пространстве, R_1 - радиус резонатора, n_s - номер гармоники гирочастоты s -й моды $H_{0,3,1}$, $H_{2,3,1}$.

В гиротроне использовалась магнетронно-инжекторная пушка с изолированным анодом. Коллектор совмещался с выходным волноводом.

2. Влияние паразитных мод на выходные характеристики гиротрона.

В используемом резонаторе для рабочей моды $H_{0,3,1}$ обеспечивалось оптимизированное продольное распределение высокочастотного поля с характерной длиной $L/\lambda \approx 5$ и добротностью $Q \approx 2 \cdot 10^3$.

Максимальная мощность составляла 500 кВт при токе $I = 32$ А ($t_j = I/I_d = 0,23$)*, напряжении 54 кВ и КПД 30%. Максимальный КПД 46% достигался при $I = 7$ А (выходная мощность 170 кВт). При $I > 32$ А имел место резкий спад выходной мощности и КПД с одновременным возникновением генерации на основном циклотронном резонансе.

Идентификация паразитных мод и определения степени их влияния на устойчивость рабочей моды исследовалась путем изучения

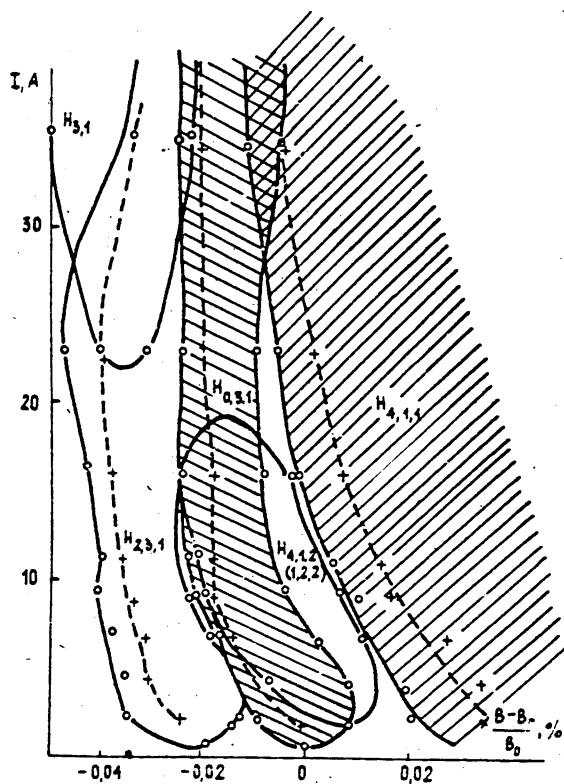


Рис. 2.

* I_d - ленгмюровский ток эквивалентного безмагнитного диода.

области генерации гиротрона (рис. 2, $U_0 = 40$ кВ, $U_a = 28$ кВ). Анализ радиальной структуры производился по термическому действию СВЧ поля. Наличие единственного максимума по радиусу характеризует паразитную моду $H_{4,1}$.

Зоны генерации мод (рис. 2) снимались при токе катодной катушки, оптимальном для генерации рабочей моды $H_{0,3,1}$. Сплошными линиями на рис. 2 обозначены границы зон генерации мод, пунктиром - линии максимального КПД. Перекрытию зон соответствует двухчастотная генерация. Согласно рис. 2 рабочая зона частично перекрывается с зоной паразитной моды $H_{4,1,1}$. Линии максимального КПД рабочей и паразитной мод достаточно разнесены, что обеспечивает устойчивую генерацию рабочей моды при указанных напряжениях вплоть до предельных токов.

Перекрытие зон $H_{0,3,1}$ и $H_{4,1,1}$, рассчитанных по линейной теории, возрастает с увеличением питающих напряжений (при сохранении $g = v_1/v_{II}$). При напряжении $U_0 = 60$ кВ, $g = 1,7$ полное перекрытие имеет место уже при токе около 10 А. Это согласуется с наблюдавшейся в эксперименте тенденцией к увеличению перекрытия зон и уменьшению устойчивости с ростом питающих напряжений. Слева от рабочей зоны находится зона генерации моды $H_{2,3,1}$, резонансной со второй гармоникой гирочастоты.

В область генерации согласно рис. 2 входят еще две зоны. Первая из них начинается при токе пучка около 2,5 А и перекрывается частично с зоной $H_{0,3,1}$. Длина волны для этой зоны близка к критической для $H_{4,1}$ ($H_{1,2}$), хотя и несколько меньше чем для зоны справа. Расположение границ зоны и частота колебаний указывают на наличие генерации моды $H_{4,1,2}$ ($H_{1,2,2}$) на попутной волне. Крайне малая мощность и наличие сопутствующей мощной генерации на рабочей моде затрудняют определение поперечной структуры паразитной моды. Воздействие соседних мод и изменение качества пучка с током деформирует границы зоны $H_{4,1,2}$ ($H_{1,2,2}$) и при токе около 20 А паразитная генерация исчезает. Наличие моды $H_{4,1,2}$ не вызывает заметной деформации границ рабочей зоны или кривой максимального КПД. С повышением напряжения паразитная генерация становится еще слабее и практически не влияет на выходные характеристики гиротрона.

Возбуждение мод $H_{0,3,1}$ и $H_{4,1,2}$ ($H_{1,2,2}$) вблизи минимального стартового тока является магким. При таких режимах двухчастотные колебания реализуются только при слабой межмодовой связи [8]. Причиной последней может быть значительный скоростной разброс, в

результате которого различные скоростные фракции взаимодействуют с разными модами.

При токе 22 А возникает зона генерации моды $H_{3,1}$, которая частично перекрывается с зонами $H_{0,3,1}$ и $H_{2,3,1}$. Измеренная длина волны меньше критической для $H_{3,1}$ и больше для $H_{4,1}$. Наиболее вероятной в данном случае является генерация на встречной волне на модах $H_{3,1}$ с большим числом вариаций ($q > 2$) по длине резонатора. Оценки показывают, что для взаимодействующей встречной волны продольный индекс $q \sim 3$. Деформация левой границы зоны $H_{2,3,1}$ связана с воздействием указанной паразитной моды. Перекрывание $H_{3,1}$ с зоной $H_{0,3,1}$ мало. Поэтому устойчивость рабочей моды не уменьшается.

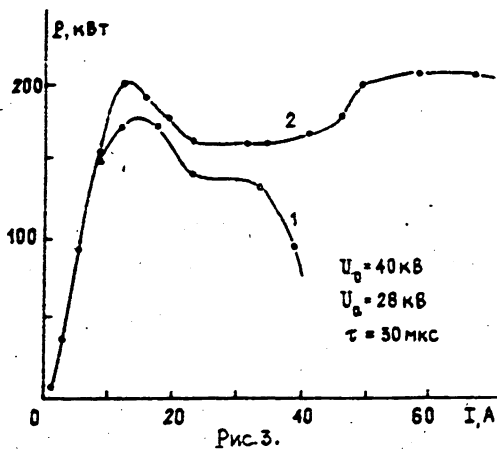
Таким образом, основным фактором, определяющим неустойчивость рабочей моды, является конкуренция со стороны моды $H_{4,1,1}$. Вследствие медленности спадания структурного фактора $H_{4,1,1}$ (см. рис. 1) в области максимума структурного фактора рабочей моды $H_{0,3,1}$ электронная селекция паразитной моды за счет изменения радиуса пучка в резонаторе малоэффективна. Продольное распределение высокочастотного поля $H_{4,1,1}$ практически совпадает с $H_{0,3,1}$. Это затрудняет использование для селекции мод коррекции длины области взаимодействия. Так, попытка применить резонатор с поглощающей вставкой, аналогичный использованному в [4], не дала положительных результатов.

Исследование области генерации гиротрона с другими резонаторами показало, что для более коротких резонаторов перекрытие рабочей зоны с зоной моды $H_{4,1,1}$ происходит уже при $U_0 = 40$ кВ. Применение резонаторов с увеличенной длиной поля приводит к перекрытию с зоной моды $H_{3,1}$, которая, расширяясь, принимает очертания, характерные для нефиксированной структуры поля [9] при синхронизме со встречной волной. Повышение питающих напряжений увеличивает влияние паразитной моды $H_{4,1,1}$, тогда как роль моды $H_{3,1}$ несколько снижается.

3. Выходные характеристики гиротрона при повышенных токах пучка. Уменьшение питающих напряжений, как отмечалось выше, снижает влияние паразитных колебаний на моду $H_{0,3,1}$. Для поддержания уровня выходной мощности уменьшение напряжения должно быть компенсировано увеличением тока пучка, что естественно приводит к возрастанию сил объемного заряда. На рис. 3 показана зависимость выходной мощности от тока пучка для моды $H_{0,3,1}$ ($U_0 = 40$ кВ, $U_a = 28$ кВ). При токе корректирующих резонаторных катушек $I_{кор.} = 7$ А выходная мощность достигает максимума 170 кВт при токе пучка $I = 14$ А (рис. 3 кривая

1), а затем падает почти до нуля. При тех же параметрах пучка и $I_{кор} = 9$ А (рис. 3 кривая 2) выходная мощность почти не меняется и при $I = 50$ А ($t_j = 0,52$) близка к максимуму, соответствующему $I = 10$ А. При токе $I = 67$ А отношение тока пучка к ленгмюровскому току эквивалентного безмагнитного диода $t_j = I/I_n = 0,7$.

Аналогичный характер имеет зависимость $P(I)$ и для соседней моды



$H_{2,3,1}$ В режимах, соответствующих данным рис. 3 ($I_{кор} = 7$ А), для $I = 10$ А при небольшой отстройке от оптимального режима $H_{0,3,1}$ наблюдалась двухмодовая генерация $H_{0,3,1}$ и $H_{2,3,1}$ при суммарной выходной мощности 90 кВт и КПД = 23%. Из сопоставления кривых 1 и 2 (рис. 3) видно, что само по себе ухудшение качества пучка с током практически не влияет на устойчивость рабочих колебаний,

поскольку параметры потока не зависят от тонких деталей распределения магнитного поля в области взаимодействия. Причиной неустойчивости, по-видимому, является критичность эффектов конкуренции мод к малым изменениям магнитного поля в резонаторе.

Увеличение питающих напряжений уменьшает выходную мощность в области за первым максимумом практически до нуля. При напряжении $U_0 = 50$ кВ в некоторых режимах генерация срывалась при токах 20 А. Однако она вновь возникала при $I = 80$ А. Этот эффект не имеет однозначной интерпретации. Возможно, что он обусловлен различной реакцией эффективности взаимодействия с модами $H_{0,3,1}$ и $H_{4,1,1}$ на ухудшение качества пучка. Наличие в пучке электронов с малой осцилляционной энергией приводит к циклотронному поглощению моды $H_{4,1,1}$.

В табл. 1 приведены параметры некоторых рабочих режимов (мода $H_{0,3,1}$) с большим током пучка.

Таблица 1

	$U_0, \text{кВ}$	$U_a, \text{кВ}$	$I, \text{А}$	$I_a, \text{А}$	t_j	$P, \text{кВт}$	$\eta, \%$
1	40	28	67	0,7	0,7	210	8
2	52	32	100	4	0,85	460	9
3	47	28	102	2	1	350	7,4

Примечателен вариант 3, который соответствует режиму полного пространственного заряда (ρ -режим). Наличие ρ -режима устанавливалось путем проверки закона "3/2":

$$I = p U_a^{3/2} \quad (3)$$

при условии, что потенциал резонатора и магнитное поле меняются по известным соотношениям подобия

$$U_0 = K_1 U_a, \quad B_0 = K_2 \sqrt{U_a} \quad (K_1, K_2 - \text{константы}), \quad (4)$$

которые обеспечивают неизменность электронных траекторий в статическом режиме. Мощность подогрева при измерении соответствовала максимальному току эмиссии.

Существенное влияние на выходные характеристики гиротрона оказывает изменение тока корректирующей катодной катушки. Это согласуется с теоретической зависимостью [11] $t_1 \sim \alpha^5$, где $\alpha = B_0/B_K$ (t_1 - отношение поперечной энергии электронов в резонаторе к их полной энергии). Для режима температурного ограничения эмиссии при $I \ll I_L$ $t_1 \sim \alpha^3$.

Следует отметить, что колебания в ρ -режиме отличались устойчивостью к малым изменениям регулирующих параметров и отсутствием электрических пробоев в пушке. Электронно-оптические изменения дали для ρ -режима $t_1 \approx 0,2$ и $\delta v_1 - 100\%$. Если использовать данные таблицы 1 и $t_1 = 0,2$ мы получим для электронного КПД величину $\approx 40\%$, что намного меньше теоретического максимума. Большой скоростной разброс в пучке вполне объясняет указанное расхождение. Оптимизация электронно-оптических систем в ρ -режиме по всей вероятности позволит улучшить параметры электронных пучков и повысить выходную мощность и КПД.

4. Эксперименты с дополнительным поглощающим пучком. Введение в рабочее пространство дополнительного неосциллирующего пучка приводит к поглощению мод на основном циклотронном резонансе и не должно оказывать влияния на моды, синхронные со второй гармоникой гирочастоты. Согласно [10] электронная добротность паразитной моды, вносимая поглощающим пучком,

$$Q_{23л} = \frac{2,16 \cdot 10^3}{I^{(2)} G_2} \frac{\beta^{(2)2} \lambda_2}{L_2} \exp\{\psi_2^{(2)2} / 8\}, \quad (5)$$

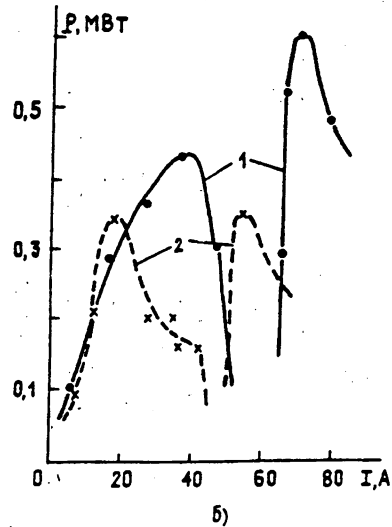
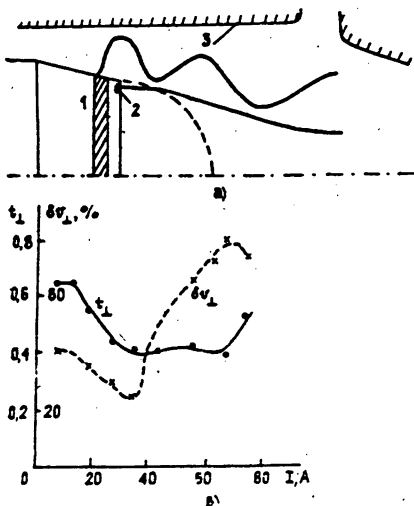
где $\psi_2^{(2)}$ - угол пролета электронов поглощающего пучка для паразитной моды, $I^{(2)}$ - ток поглощающего пучка.

Полная добротность резонатора на паразитной моде

$$Q_2^* = \frac{Q_2 Q_{2эл}}{Q_2 + Q_{2эл}} \quad (6)$$

Увеличение стартового тока мешающей моды определяется фактором Q_2/Q_2^* .

Для формирования дополнительного пучка передняя сферическая часть катода (пунктир на рис. 4а) была удалена, а на образовавшийся открытый торец камеры подогревателя основного эмиттера-1 был помещен дополнительный эмиттирующий поясок-2. Для увеличения расстояния между траекториями основного пучка и образовавшимся изломом катодной поверхности диаметр анода 3 был увеличен. Накал обоих эмиттеров осуществлялся общим подогревателем. Это, однако, препятствовало разделному управлению токами пучков и усложняло измерение парциальных токов.



Зависимость выходной мощности от полного катодного тока двухлучевого гиротрона приведена на рис. 4б, кривая 1. Наибольшая выходная мощность достигала 600 кВт при токе 70 А ($U_0 = 47$ кВ, $U_a = 32$ кВ). При устранении дополнительного поглощающего пучка (путем ликвидации эмиттирующего пояска 2) максимальная мощность не превышала 360 кВт (зависимость P (1) на рис. 4б) кривая 2). Характерной особенностью кривых 1 и 2 являлось наличие двух максимумов P (1).

Электронно-оптические измерения показали, что дополнительный пучок является практически неосциллирующим ($t_1 \approx 0,1$; $\delta v_{\parallel} \approx 7\%$). Зависимость поперечной энергии и скоростного разброса от тока для основного пучка приведена на рис. 4в (кривые 3 и 4). Наличие минимума δv_{\perp} (не типичное для традиционной геометрии) в некоторой мере объясняет провал кривой P (1) на рис. 4б. Уменьшение скоростного разброса способствует лучшему взаимодействию основного пучка с паразитной модой $H_{3,1}$ (бегущая волна), которая и подавляет рабочую моду $H_{0,3,1}$. Применение поглощающего дополнительного пучка способствует подавлению моды $H_{4,1,1}$ и, по-видимому, слабо влияет на бегущую волну $H_{3,1}$ вследствие низкой эквивалентной добротности. Увеличение скоростного разброса при дальнейшем увеличении тока основного пучка приводит к повышению устойчивости рабочей моды, сохраняющейся вплоть до лентмюровского тока ($I \approx 83$ А).

Таким образом, применение дополнительного пучка позволяет существенно повысить устойчивость рабочей моды по отношению к резонансным синхронным с первой гармоникой гирочастоты и поднять выходную мощность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеев М. А., Рогачева Г. Г., Юлпатов В. К. // Тезисы докл. Всесоюзной научной сессии, посвященной Дню Радио. - М., 1968. С. 6.
2. Нусинович Г. С., Эрм Р. Э. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1972. Вып. 8. С. 55.
3. Кисель Д. В., Кораблев Г. С., Павельев В. Г. и др. // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19. № 4. С. 782.
4. Запевалов В. Е., Кораблев Г. С., Цимринг Ш. Е. // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 8. С. 1661.
5. Запевалов В. Е., Зарницына И. Г., Нусинович Г. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22. № 3. С. 367.
6. Зарницына И. Г., Нусинович Г. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 3. С. 461.
7. Нусинович Г. С. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1974. № 3. С. 44.
8. Зарницына И. Г., Нусинович Г. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. № 2. С. 303.
9. Братман В. Л., Моисеев М. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. № 2. С. 1045.
10. Запевалов В. Е., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 32. № 11. С. 1288.