

УДК 621.384.633

## МОЩНЫЙ ДВУХЛУЧЕВОЙ ГИРОТРОН НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ

*В.Е.Запевалов, В.Н.Мануилов, О.В.Малыгин,  
Ш.Е.Цимринг*

Приводятся результаты экспериментов с гиротроном на второй гармонике гирочастоты, в которых используются два активных электронных пучка. Внутренний (дополнительный) пучок слабо связан с полем паразитной моды. Предусмотрена возможность независимого управления токами обоих пучков.

Даются выходные характеристики гиротрона при различных токах пучков. Показывается, что дополнительный пучок существенно усиливает устойчивость генерации на рабочей моде и вносит заметный вклад в выходную мощность. Максимум выходной мощности 0,87 МВт при КПД 25%, токах пучков 57 и 13 А и напряжении 60 кВ. Наибольший КПД составил 40%. Результат исследования позволит считать двухлучевые ЭОС с обоими активными пучками, несмотря на определенные осложнения конструкции пушки, перспективными и для коротковолновых гиротронов на основном циклотронном резонансе. Отмечается снижение (по сравнению с однолучевым аналогом) удельной мощности рассеяния на коллекторе.

1. Многолучевые гиротроны [1] (см. также [2]), как следует из теории [3] и предварительных экспериментов [4], позволяют существенно расширить, по сравнению с традиционными электронно-оптическими системами (ЭОС), область устойчивой одномодовой генерации в сторону больших КПД и повысить выходную мощность. Максимальный эффект достигается у гиротронов, работающих на гармониках циклотронной частоты, где возбуждение паразитных мод наиболее вероятно [5, 6].

В гиротронах с *дополнительными поглощающими пучками* при работе на второй гармонике гирочастоты эффективно подавляются паразитные моды на основном циклотронном резонансе [4]. Однако само по себе наличие поглощающего пучка не является положительным фактором, поскольку понижает при прочих равных условиях КПД.\*

По этой причине имеют преимущества гиротроны с *дополнительными активными пучками*. В них помимо селекции мод возможно повышение и полезной мощности суммарного пучка.

\*Исключением является отмеченная в [4] возможность использования рекуперации.

Ниже приведены результаты экспериментов с гиротроном на второй гармонике гирочастоты с рабочей модой  $H_{031}$  ( $\lambda_p = 12$  мм,  $n_p = 2$ ), имеющим два активных пучка. Базовая конструкция прибора описана в [4]. При использовании однопучковой электронно-оптической системы (ЭОС) выходная мощность гиротрона, согласно [4], ограничивалась эффектами конкуренции со стороны паразитной моды  $H_{411}$  ( $n_n = 1$ ) и не превышала 0,5 МВт, несмотря на выполнение весьма жестких требований к стабильности магнитного поля и ускоряющего напряжения.

2. В двухлучевой ЭОС [7] (рис.1) ускоряющее напряжение  $U_0$  принималось равным 60 кВ, магнитная индукция в рабочем пространстве  $B_0 \simeq 0,5$  Т ( $\lambda_p = 12$  мм,  $n_p = 2$ ). Выбранная рабочая мода ( $H_{031}$ ) и длина волны определяют радиусы встрела электронных пучков  $R_0^{(1)} = 12,7$  мм,  $R_0^{(2)} = 5,85$  мм. В ЭОС типа рис.1 для выравнивания осцилляторных скоростей обоих винтовых пучков формирование внешнего пучка должно производиться при существенно больших углах наклона магнитного поля к поверхности эмиттера. Ввиду этого, внешний пучок оказывается ламинарным [8]. Дополнительный пучок является регулярно пересекающимся (рис.1). Расчетные параметры электронной пушки приведены в таблице, а результаты измерений — на рис.2.

Таблица

Параметр	пучок	пучок
	1 (основной)	2 (дополнительный)
Радиус катода $R_k^{(i)}$ , мм	34	15
Угол наклона эмиттера к продольной оси $\psi^{(i)0}$	35	10
Коэффициент перемagnитивания $\alpha^{(i)}$	7,2	6,6
Расстояние анод-катод $d^{(i)}$ , мм	24	44
Анодное напряжение $U_a^{(i)}$ , кВ	51	60
Напряженность электростатического поля на катоде $E_k^{(i)}$ , кВ/мм	3	2
Ленгмюровский ток $I_n^{(i)}$ , А	200	60
Расчетный ток $I^{(i)}$ (А) и $(t_j^{(i)} = I^{(i)}/I_n^{(i)})$	20(0,1)	6(0,1)
Относительная осцилляторная энергия $t_1^{(i)}(t_j)$	0,7(0,1)	0,65(0,1) 0,54(0,23)
Относительный скоростной разброс $\delta v_{\perp}(t_j)$ , %	15( $I/I_n = 0,1$ ) 10( $I = 0$ )	7(0,1) 31(0,23)

Измерения скоростного распределения проводились методом тормозящего поля [9] в моделирующих режимах при пониженных значениях тока и напряжения. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных (см.рис.2) учитывало также скоростной разброс, связанный с шероховатостью эмиттера и начальными скоростями электронов [10]. Последние в моделирующих режимах играют заметную роль. По оценкам сумма указанных величин для системы рис.1 составляла 10%. Зависимости  $\delta v_{\perp}^{(1)}$  и

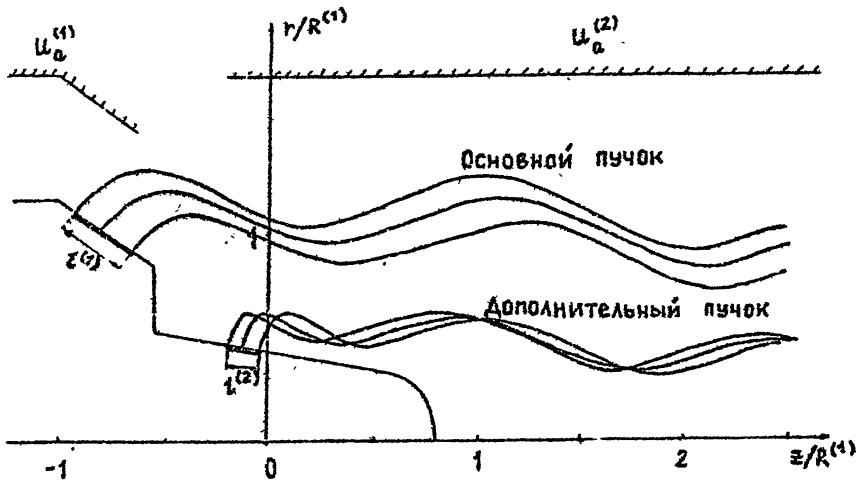


Рис.1. Форма электродов и электронные траектории в двухлучевой ЭОС гиروتрона.

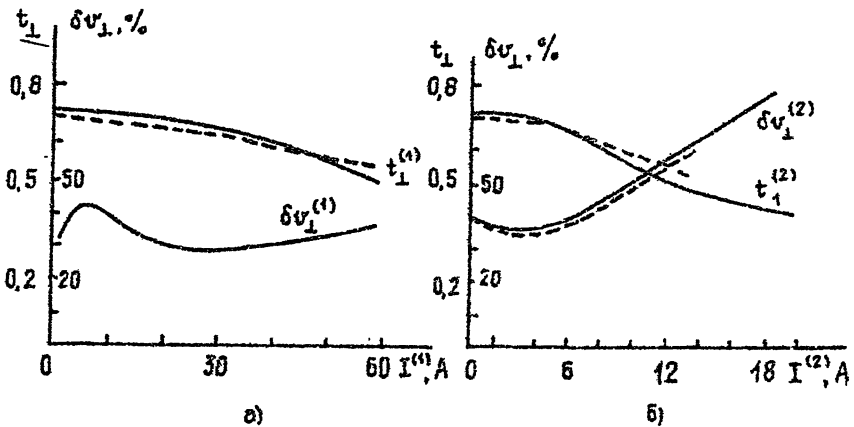


Рис.2. Теоретические (пунктир) и экспериментальные (сплошные линии) зависимости относительной осцилляторной энергии ( $t_{\perp}$ ) и скоростного разброса ( $\delta v_{\perp}$ ) от тока парциального пучка:  
а — основной пучок, б — дополнительный пучок.

$t_{\perp}^{(1)}$  от тока пучка изучались для эмиттеров, имеющих разную ширину. Наилучшие параметры пучков на максимальных токах получались при относительно малой ширине эмиттера.

Измерение параметров внутреннего пучка (см.рис.2б) удовлетворительно согласуется с приведенными выше результатами траекторного анализа, ток дополнительного пучка поддерживали на уровне до 12–15 А. Превышение этих значений приводило к резкому возрастанию скоростного разброса и снижению осцилляторной скорости (см.рис.2).

Конструкция катодного ула пушки предусматривала отдельный по-

догрев эмиттеров, что обеспечивало независимое управление токами обоих пучков. Потенциал на первый анод подавался с регулируемого высоковольтного делителя. Потенциал второго анода устанавливался равным потенциалу резонатора.

3. На рис.3 показаны выходная мощность и КПД генератора на рабочей моде  $H_{031}$  как функции полного тока при оптимизированной ширине основного эмиттера. Кривые 1 соответствуют одиночному *основному* пучку. Резкое падение выходной мощности при  $I > 22$  А обусловлено, как указано выше, конкуренцией со стороны паразитной моды  $H_{411}$  ( $n_H = 1$ ) (см. также [4]).

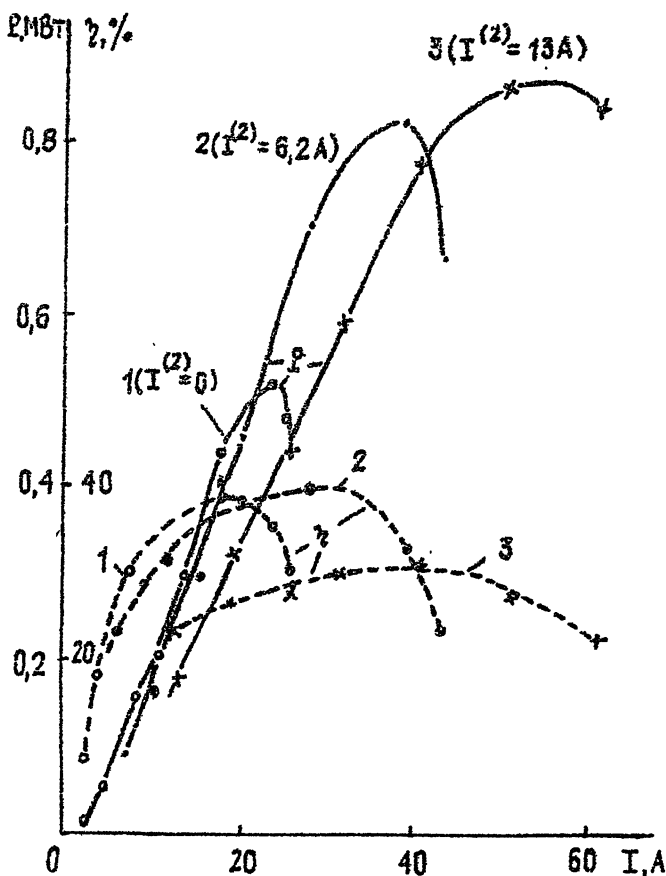


Рис.3. Зависимость выходной мощности и КПД от суммарного тока пучков:  
 1 — одиночный основной пучок;  
 2 — ток дополнительного пучка 6,2 А;  
 3 — ток дополнительного пучка 13 А.

При включении только дополнительного пучка имела место устойчивая генерация на рабочей моде. Выходная мощность достигала 200 кВт

при относительно большом токе ( $I^{(2)} \approx 15$  А,  $t_j^{(2)} \approx 0,3$ ). Отсутствие в этом случае эффектов конкуренции объясняется слабой связью дополнительного пучка с полем паразитной моды.

Кривые 2 и 3 на рис.3 соответствуют включению обоих пучков при двух значениях тока дополнительного пучка (6,2 А и 13 А). Напряжения  $U_0$  и  $U_a^{(1)}$  составляли 61 кВ и 57 кВ соответственно. Согласно рис.2 максимальный КПД, близкий к 40%, имел место при токе дополнительного пучка  $I^{(2)} = 6,2$  А, полном токе 30 А и выходной мощности 0,7 МВт. Максимальная достигнутая выходная мощность составила 0,87 МВт при  $\eta \approx 25\%$ ,  $I^{(2)} = 13$  А,  $I = I^{(1)} + I^{(2)} \approx 57$  А. Снижение КПД при увеличении тока дополнительного пучка от 6,2 до 13 А связано, как показали исследования, с ухудшением качества пучков.

В целом, согласно приведенным экспериментальным данным, использование дополнительного излучающего пучка позволило получить величины КПД и выходной мощности гиротронов на второй гармонике гирочастоты, типичные для гиротронов на основном циклотронном резонансе.

Результаты исследования позволяют считать двухлучевую ЭОС с обоими активными пучками, несмотря на определенное усложнение конструкции пушки, весьма перспективной и для мощных коротковолновых гиротронов на основном циклотронном резонансе. В двухлучевых гиротронах этого типа также реализуются устойчивые и высокоэффективные режимы, по-видимому, недостижимые для однолучевых систем. Отметим, что наличие второго активного пучка способствует снижению удельной мощности рассеяния на коллекторе при одинаковом с однолучевыми гиротронами уровне выходной мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.с.786677 СССР с приоритетом от 25.07.79. Мазер на циклотронном резонансе. / Запевалов В.Е. и др. Оpubл.в Б.И. 1989. N 7.
2. Wang Hui, Zho Jin-jin et al. // 10 th. Int.Conf. Infrared and Millimeter Waves. Orlando. USA. Dec.1985, conf Digest. P.265.
3. Запевалов В.Е., Цимринг Ш.Е. // Изв.вузов. Радиофизика. 1990. Т.33. N 11. С.1288.
4. Запевалов В.Е., Малыгин С.А., Цимринг Ш.Е. // Изв.вузов. Радиофизика.
5. Запевалов В.Е., Кораблев Г.С., Цимринг Ш.Е. // Радиотехника и электроника. 1977. Т.22. N 8. С.1661.
6. Антаков И.И., Запевалов В.Е., Панкратова Т.Б., Цимринг Ш.Е. — В кн.: Гиротрон. — Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С.192.
7. Запевалов В.Е., Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. // Изв.вузов. Радиофизика. 1991. Т.34. N 2. С.205.

8. Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. // Электронная техника. Электроника СВЧ. 1977. Вып.4. С.62.
9. Авдошья Е.Г., Гольденберг А.Л. // Изв.вузов. Радиофизика. 1973. Т.16. N 10. С.1605.
10. Цимринг Ш.Е. — В кн.: Лекции по электронике СВЧ: 3-я зимн.школа-семинар инженеров. — Саратов: Гос.ун-т, 1974. Кн.4. С.5.

Институт прикладной физики  
РАН

Поступила в редакцию  
29 июля 1992 г.

**POWERFUL TWO-BEAM GYROTRON  
AT THE CYCLOTRON SECOND HARMONIC**

*V.E.Zapevalov, V.N.Manuilov, O.V.Malygin,  
Sh.E.Jsimring*

The results of the experimental investigation of a gyrotron at the second harmonic of cyclotron frequency with two active electron beams are presented. The inner (additional) beam is weakly connected with a parasitic mode. Currents of both beams can be changed independently.

The dependence of output characteristics of the gyrotron versus beam's currents is given. It is shown that the additional beam increases essentially the stability of an operating mode and its output power. The output maximum power reaches 0,87 MW with efficiency 25%, beam's currents 57 and 13 A and accelerating voltage 60 kV. The maximum of efficiency was 40%.