

Неканонические гиротроны

Рассмотрен ряд гироприборов, отличающихся от канонической версии: секционированная активная среда или (и) пространство взаимодействия, нетрубчатый ВЭП, нецилиндрический (коаксиальный, квазиоптический, эшелеттный и т.д.) резонатор. Проведен обзор перспективных вариантов неканонических гиротронов (включая многолучевые и многоствольные) с точки зрения перестройки частоты и повышения селективности мод

Ключевые слова: Микроволновые технологии, гиротрон, винтовой электронный пучок, резонатор, магнитная система.

Научный поиск в 60-х годах минувшего века привел к созданию целого ряда гирорезонансных устройств, принцип действия которых основан на синхронном взаимодействии криволинейного электронного пучка и электромагнитной волны: совокупное действие релятивистских эффектов и неоднородности высокочастотного поля приводят к вынужденному циклотронному излучению на гирочастоте и ее гармониках [1-3]. Канонический гиротрон (КГ) содержит адиабатическую магнетронно-инжекторную электронную пушку (МИП), формирующую трубчатый винтовой электронный пучок (ВЭП), слабонерегулярный, сверхразмерный цилиндрический резонатор, систему вывода излучения и коллектор электронного пучка часто с рекуперацией (см.рис.1) [1-5].

Для производства канонических гиротронов благоприятны аксиальная симметрия и отсутствие мелкомасштабных элементов. За минувшие годы в созданы мощные высокоэффективные гиротроны от см до субмм диапазонов [1-5] и сформировался ряд фундаментальных научных направлений, успешное развитие которых прямо обусловлено наличием этих источников

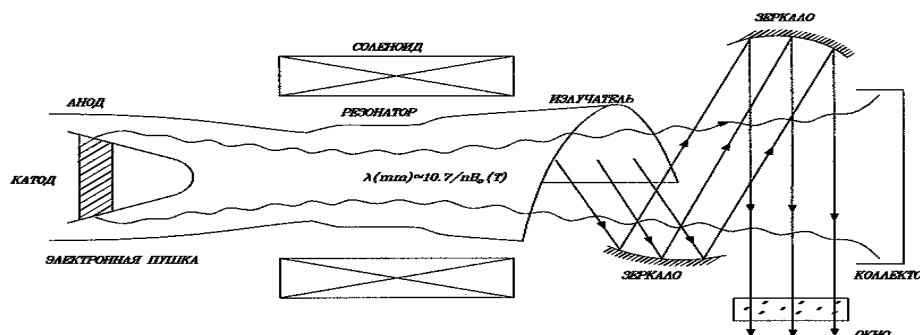


Рис. 1. Структурная схема гиротрона со встроенным преобразователем.

Для некоторых из приложений крайне востребована повышение частоты гиротронов и ее перестройка, но сложность задачи обостряется проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь, особенно в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты в субмм диапазоне [2-5]. Между тем в КГ весьма ограничены

возможности перестройки частоты и селекции мод при работе на гармониках. В процессе достижения максимальных энергетических характеристик, в силу разных причин, сошел с дистанции и оказался на обочине прогресса целый ряд гироприборов, которых отличали от канонической версии: секционированная активная среда или (и) пространство взаимодействия, нетрубчатый ВЭП, нецилиндрический (коаксиальный, квазиоптический, эшелеттный и.т.д.) резонатор. Далее проведен обзор перспективных вариантов неканонических гиротронов (включая многолучевые и многоствольные) с точки зрения перестройки частоты и повышения селекции мод.

1. Трубчатые и нетрубчатые ВЭП

Мощность и КПД гиротронов определяются известными выражениями [2-4]

$$P = \eta I U, \quad \eta = t_{\perp} \eta_{\perp} \eta_c \eta_w Q_{ohm} / (Q_{ohm} + Q_d),$$

где I и U - пучка гиротрона и ускоряющее напряжение, η_{\perp} и η_c поперечный КПД [2-4] и коэффициент преобразования встроенного преобразователя, t_{\perp} - отношение осцилляторной энергии электронов к полной, Q_d и Q_{ohm} - дифракционная и омическая добротности. Величины I и t_{\perp} - определяются системами формирования и транспортировки винтового электронного пучка (ВЭП). Ток $I = j \cdot s$ определяется плотностью тока j и площадью поперечного сечения s . Площадь поперечного сечения определяется условиями эффективного взаимодействия [2-4] и для трубчатого, ленточного и приосевого (в англоязычной литературе часто называемого «карандашный» - “pencil beam”) имеет вид ($2R_0$ максимальный размер пучка, $2r$ диаметр для цилиндрического, ширина для ленточного, λ - длина волны):

Трубчатый (цилиндрический) пучок:	$s_c = 2\pi R_0 \lambda / 6,$
Ленточный пучок:	$s_r = 2R_0 \lambda / 6,$
Приосевой (карандашный) пучок	$s_p = \pi \lambda^2 / 36.$

Очевидно, что использование нецилиндрических пучков при ограниченном размере катода и плотности тока ведет к снижению энергосодержания пучка, а при одинаковом КПД и выходной мощности.

2. Секционированная активная среда (многолучевые гиротроны)

В многолучевых гиротронах к основному пучку добавляется один или несколько винтовых электронных пучков. В зависимости от параметров (главным образом - величин осцилляторной и дрейфовой скоростей) дополнительные пучки могут быть излучающими и выполнять функцию электронных поглотителей [3, 6-8]. На рис. 3 приведена схема многолучевого гиротрона, фотография двухлучевой электронной пушки, формирующей два активных (излучающих) электронных пучка, а также зависимости выходной мощности от тока при разной величине тока дополнительного пучка [7].

Аналогично может быть построена схема двухлучевой электронной пушки, формирующей два электронных пучка - винтовой и прямолинейный. Эксперименты показали существенное повышение выходной мощности при наличии дополнительного поглощающего пучка [8]. Аналогично могут быть построены многолучевые гиротроны на основе тонких (карандашных) пучков, находящихся в одной или нескольких плоскостях [9] в сочетании с самыми разнообразными электродинамическими системами. Таким образом, по аналогии с приборами классической электроники, могут быть реализованы многомодульные (многоствольные) гироприборы.

3. Секционирование пространства взаимодействия

Продольное секционирование пространства взаимодействия является эффективным методом обеспечения селекции и повышения эффективности в приборах СВЧ. В giroприборах секционирование пространства взаимодействия представлено giroклистронами, двухрезонаторными giroтронами, giroтронами на связанных резонаторах (СР), giroумножителями и т.д. В связи с проблемой селекции мод могут представлять интерес связанные резонаторы с трансформацией мод (СРТМ) [10], схематически показанные на рис. 4. Взаимная трансформация мод в обоих резонаторах играет основную роль. Резонансное увеличение добротности нормальной моды и отношения амплитуд $|a_1|/|a_2|$ в СРТМ создает предпосылки для высокой селекции мод в этих системах, а резонансное снижение излучения на первой моде обеспечивает высокую модовую чистоту выходного излучения. СРТМ использовались в giroтронах на 1-3^й гармониках в широком диапазоне частот, мощностей и длительностей импульса. Типичные значения КПД, по меньшей мере, не уступают giroтронам с одиночным резонатором (giромонотронам).

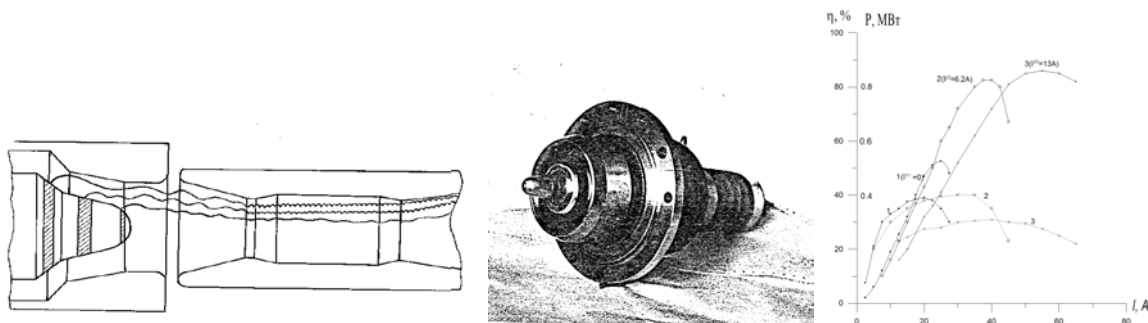


Рис. 3. Схема многолучевого giroтрона, фото электронной пушки, зависимости выходной мощности от тока при разной величине тока дополнительного пучка

Приведенные данные свидетельствуют о возможности реализации высокоэффективных giroтронных с электродинамической системой типа СРТМ. Еще более высокими селективными свойствами обладают многоступенчатые СРТМ. В качестве примера на рис. 5 приведены профиль и распределение ВЧ поля многоступенчатого СРТМ для giroтрона средней мощности, с частотой 420 ГГц, на третьей гармонике giroчастоты, а также расчетные зависимости мощности, КПД и омической нагрузки [11]. К недостаткам СРТМ относится необходимость высокой точности изготовления. Возможность заметной перестройки частоты для этих систем отсутствует.

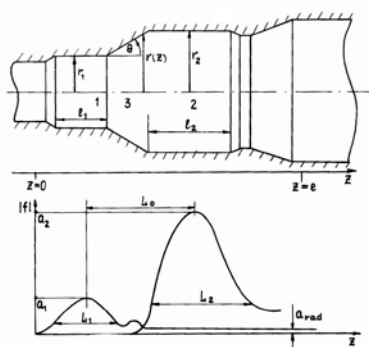


Рис. 4. СРТМ

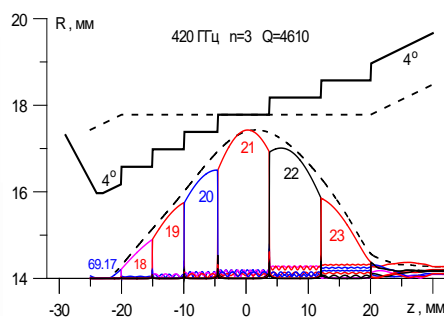
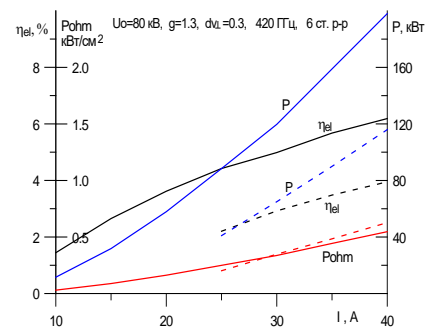


Рис. 5. Многоступенчатый СРТМ.



4. Другие нецилиндрические резонаторы.

Определенные возможности предоставляет переход от цилиндрического резонатора к более сложным вариантам. Рассмотрим некоторые из них.

Аксиально-симметричный эшелетный резонатор [12] в определенном смысле представляет собой развитие многоступенчатого резонатора [11] и обладает аналогичными достоинствами и недостатками. Он обладает высокими селективными свойствами и гиротроны в которых он использовался продемонстрировали в экспериментах хорошие выходные характеристики. Эшелетный гиротрон имеет большие перспективы, однако его расчет и технология изготовления встречают серьезные проблемы. Сложная структура выходного излучения требует разработки нового варианта преобразователя. Возможности перестройки частоты невелики.

Для некоторых приложений может представлять интерес двухзеркальная версия эшелетного гиротрона [12], показанная на рис. 6. В этом варианте имеются некоторые возможности перестройки частоты и упрощается система вывода излучения, но при использовании цилиндрического пучка неизбежно некоторое снижение КПД. Фактически эта схема является развитием гиротронов с квазоптическим резонатором [2, 5], с дополнительной селекцией за счет эшелетного зеркала.

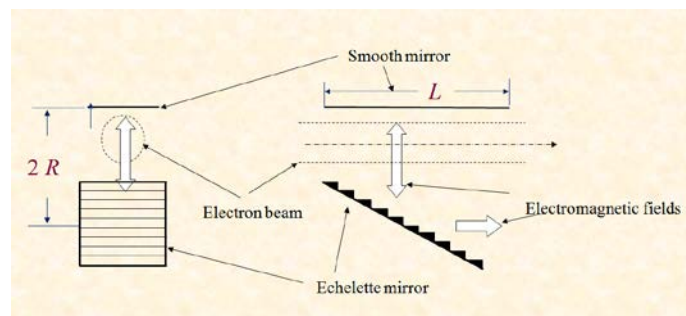


Рис. 6. Двухзеркальная версия эшелетного гиротрона.

Коаксиальный резонатор давно привлекает внимание разработчиков гироприборов, поскольку его применение перспективно для достижения высоких уровней мощности, чему благоприятствуют высокая селективность и отсутствие провисания потенциала пучка, возможность реализации естественной схемы рекуперации и перестройки частоты [13]. Дополнительные возможности селекции предоставляют профилирование внутренней стенки резонатора и коаксиальной вставки. Достигнутые уровни мощности коаксиальных гиротронов превышают 2 МВт на частотах до 170 ГГц. Использование коаксиальных гиротронов затрудняют технологические сложности, связанные с креплением, юстировкой и охлаждением коаксиальной вставки.

5. Гиротроны на высоких гармониках с приосевым пучком - ГБО

Большими перспективами при работе на гармониках циклотронной частоты обладают гиротроны в тонком приосевом пучком, часто называемые гиротронами с большой орбитой - ГБО. Так в ГБО с постоянным магнитом (поле около 1 Тл) была получена генерация [14] на следующих гармониках/ модах / на частоте/ при мощности/ КПД: $n=3/TE_{311}/84.88$ ГГц / 2,5 кВт / 6,25%; $n=4/TE_{411}/112.7$ ГГц / 0,47 кВт /КПД 0,96%. Наблюдалась также генерация на 5^й гармонике с частотой 138 ГГц.

В ГБО с импульсным магнитом [15, 16] были достигнуты мощность 2кВт на частоте около 0.6 ТГц ($n=2$) 2кВт и 0,3 кВт на частоте около 1 ТГц ($n=3$) на 2^й и 3^й циклотронной гармониках, соответственно.

Заключение

Проведен обзор перспективных вариантов неканонических гиротронов (включая многолучевые и многоствольные) с точки зрения перестройки частоты и повышения селекции мод. Выявлены преимущества и недостатки разных вариантов неканонических гироприборов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-42-02380 p_поволжье_a.

Библиографический список

1. G.S.Nusinovich, M.Thumm, M.I. Petelin. The Gyrotron at 50: Historical Overview. *J. Infrared Mm Thz Waves* (2014) 35:325–381.
2. G.S. Nusinovich. *Introduction to the Physics of Gyrotrons*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004.
3. Sh.E. Tsimring, *Electron beams and microwave vacuum electronics*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
4. V.E.Zapevalov., *Increasing Power and Efficiency of gyrotrons.*, *Fusion Science and Technology*, 2007, Vol.52, No2, pp 340-344.
5. M.Thumm. *State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers*. KIT Scientific Publishing, 2014.
6. Запевалов В.Е., Цимринг Ш.Е. Многолучевые гиротроны. *Изв. вузов, Радиофизика*, 1990, т.33, №11. с.1288-1295.
7. В.Е.Запевалов, В.Н.Мануилов, О.В.Малыгин, Ш.Е.Цимринг. Мощный двухлучевой гиротрон на второй гармонике циклотронной частоты. *Изв. ВУЗов, Радиофизика*, 1994, т.37, №3, с.387-392.
8. В.Е.Запевалов, С.А.Малыгин, Ш.Е.Цимринг. Мощные гиротроны на второй гармонике циклотронной частоты. *Изв. вузов, Радиофизика*, 1993, т.36, №6, с.543-552.
9. E. Jerby, A. Kesar, M. Korol et al., Cyclotron resonance maser array, *IEEE Trans. Plasma Sceince*, Vol. 27, pp. 445-455, 1999.
10. V.G.Pavelyev, Sh.E.Tsimring, V.E.Zapevalov, Coupled cavities with mode conversion in gyrotrons. *Int. J. Electronics*, 1987, v.63, №3, pp. 379-391.
11. С.Н.Власов, Н.А.Завольский, В.Е.Запевалов, и др. Аксиально-симметричные ступенчатые резонаторы. *Известия Вузов. Радиофизика*, 2009, т.ЛII, №5-6, с.716-729.
12. V. I. Belousov, S. N. Vlasov, N. A. Zavolsky et al. Research of the gyrotron with the echelette resonator. 9th International Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications Nizhny Novgorod – Perm – Nizhny Novgorod, Russia July 24 – 30, 2014 p.166-167.
13. V.A. Flyagin, V.I. Khizhnyak, V.N. Manuilov, V.E. Zapevalov, et al. “Investigation of advanced coaxial gyrotrons at IAP RAS” *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 24, No. 1, (2003), pp.2-17.
14. T. Idehara, I. Ogawa, S. Mitsudo, et al. A High Harmonic Gyrotron and with an Axis-Encircling Electron Beam and a Permanent Magnet. *IEEE Transaction on Plasma Science*. June 2004, v.32, n.3, pp.903-910.
15. V.Bratman, M.Glyavin, T.Idehara, et al. Review of Sub-Terahertz and Terahertz Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU. *Int. Journal IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 37, issue 1, pp. 36-43, (2009)2.
16. В.Л. Братман, А.Г.Литвак, Е.В.Суворов. Освоение терагерцевого диапазона: источники и приложения // *УФН*, 2011, 181, 867–874