УДК 621.385.69

НЕКАНОНИЧЕСКИЕ ГИРОТРОНЫ

В. Е. Запевалов*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Рассмотрен ряд гироприборов, отличающихся от канонических: с секционированной активной средой или/и пространством взаимодействия, нетрубчатым винтовым электронным пучком, нецилиндрическим (коаксиальным, квазиоптическим, эшелеттным и т. д.) резонатором. Проведён обзор перспективных вариантов неканонических гиротронов (включая многолучевые и многоствольные) с точки зрения перестройки частоты и повышения селекции мод.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные исследования, выполненные во второй половине прошлого века, привели к созданию целого ряда гирорезонансных устройств, принцип действия которых основан на синхронном взаимодействии криволинейного электронного пучка и электромагнитной волны: совокупное действие релятивистского эффекта и неоднородности высокочастотного поля приводит к вынужденному циклотронному излучению электронных осцилляторов на гирочастоте и её гармониках [1–5]. Гиротроны, наряду с лазерами на свободных электронах, являются наиболее значимыми достижениями классической электроники в обозначенном временно́м интервале [5–7].

Для эффективного взаимодействия должно удовлетворяться условие синхронизма винтового электронного пучка и электромагнитной волны в гиротроне:

$$\omega = n\omega_H + k_{\parallel} v_{\parallel},\tag{1}$$

где ω — частота излучения, n = 1, 2, 3, ... — номер синхронной с волной гармоники гирочастоты, $\omega_H = eB/(\gamma m_0)$ — релятивистская гирочастота электрона, e — элементарный заряд, m_0 — масса покоя электрона, γ — лоренц-фактор, k_{\parallel} — продольное (в направлении постоянного магнитного поля с индукцией B) волновое число, v_{\parallel} — продольная скорость электронов. В гиротронах для рабочих режимов выбираются условия с продольным волновым числом, близким к нулю (в волноводе это отвечает квазикритическому режиму), что позволяет минимизировать негативное влияние разброса скоростей.

Канонический гиротрон согласно [1] содержит адиабатическую магнетронно-инжекторную электронную пушку, формирующую трубчатый винтовой электронный пучок, сверхразмерный резонатор в виде отрезка слабонерегулярного цилиндрического волновода, систему вывода излучения и коллектор электронного пучка, часто с рекуперацией (см. рис. 1) [2–7]. Система вывода излучения в гиротронах высокого уровня мощности, как правило, включает в себя встроенный квазиоптический преобразователь рабочей моды в волновой пучок. Обычно, когда используется термин «гиротрон» без уточняющих пояснений, речь идёт именно о канонической версии гиротрона.

Изготовление канонических гиротронов облегчается присущей им аксиальной симметрией и отсутствием мелкомасштабных элементов, необходимых для функционирования других микроволновых приборов [5]. Подавляющее большинство современных промышленно выпускаемых и лабораторных гиротронов соответствует канонической схеме. Отметим, что возможности этих

^{*} zapev@appl.sci-nnov.ru



Рис. 1. Структурная схема гиротрона с встроенным преобразователем: 1 — катод, 2 — анод, 3 — электронная пушка, 4 — соленоид, 5 — резонатор, 6 — излучатель, 7 — зеркала, 8 — коллектор, 9 — окно

гиротронов в плане роста мощности и частоты при использовании соответствующих магнитных систем далеко не исчерпаны [6]. За минувшие годы в России и зарубежных странах созданы мощные высокоэффективные гиротроны от сантиметрового до субмиллиметрового диапазонов длин волн [2–7] и сформировался ряд фундаментальных научных направлений, успешное развитие которых прямо обусловлено наличием этих источников.

Для некоторых приложений необходимы повышение частоты гиротронов и её перестройка, но решение этой задачи осложняется конкуренцией мод и высоким уровнем омических потерь, особенно в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты в субмиллиметровом диапазоне длин волн [3–5]. Между тем в канонических гиротронах весьма ограничены возможности перестройки частоты и селекции мод при работе на гармониках. За прошедшие годы в силу разных причин оказался невостребованным целый ряд гироприборов, которые отличались от канонической версии. Ниже проведён обзор перспективных вариантов неканонических гиротронов (включая многолучевые и многоствольные) с точки зрения перестройки частоты и повышения селекции мод, особенно при работе на гармониках гирочастоты.

1. ТРУБЧАТЫЕ И НЕТРУБЧАТЫЕ ВИНТОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

Для начала сделаем несколько замечаний общего характера по поводу возможных конфигураций электронных пучков. Мощность P и коэффициент полезного действия (КПД) η гиротронов определяются известными выражениями [2–5]

$$P = \eta I U, \qquad \eta = t_{\perp} \eta_{\perp} \eta_{\rm c} \eta_{\rm w} Q_{\rm ohm} / (Q_{\rm ohm} + Q_{\rm d}), \tag{2}$$

где I и U — ток пучка гиротрона и ускоряющее напряжение, η_{\perp} и $\eta_{\rm c}$ — поперечный КПД [2–6] и коэффициент преобразования встроенного преобразователя, $\eta_{\rm w}$ — коэффициент пропускания вы-

306

ходного окна (его отличие от единицы характеризует потери в выходном окне), t_{\perp} — отношение осцилляторной энергии электронов к полной энергии, $Q_{\rm d}$ и $Q_{\rm ohm}$ — дифракционная и омическая добротности резонатора соответственно. Величины I и t_{\perp} определяются системами формирования и транспортировки винтового электронного пучка. Ток I = js определяется плотностью тока j и площадью поперечного сечения s. Основные типы электронных пучков, используемых



Рис. 2. Основные типы электронных пучков: *а* — цилиндрический, *б* — ленточный, *в* — «карандашный»

в гироприборах, показаны на рис. 2. Площадь поперечного сечения (по ведущим центрам отдельных электронов) определяется условиями эффективного взаимодействия [2–4] и равна

$$s_{\rm c} = 2\pi R_0 \lambda/6 \tag{3a}$$

для трубчатого (цилиндрического) пучка,

$$s_{\rm r} = 2R_0\lambda/6\tag{36}$$

для ленточного пучка,

$$s_{\rm p} = \pi \lambda^2 / 36 \tag{3B}$$

для приосевого («карандашного») пучка, где λ — длина волны, $2R_0$ — максимальный размер пучка (диаметр цилиндрического пучка или ширина ленточного пучка). Очевидно, что использование нецилиндрических пучков при ограниченном размере катода и плотности тока ведёт к снижению энергосодержания пучка, а при одинаковом КПД — и мощности выходного излучения (см. (2)). Указанное обстоятельство привело к абсолютному доминированию цилиндрических пучков в гироприборах высокой мощности. Обычно эти пучки формируются с помощью магнетронно-инжекторной пушки [5] и хорошо согласуются с аксиально-симметричной конфигурацией используемых магнитных систем. Формирование ленточных и приосевых пучков часто наталкивается на ряд серьёзных проблем и является весьма нетривиальной задачей [5], хотя имеются и примеры её успешного решения, о чём упоминается далее.

Нарушение аксиальной симметрии электродинамической системы или электронного пучка, как правило, приводит к снижению КПД, т. к. уменьшается средняя величина η_{\perp} вследствие неодинаковости условий взаимодействия электронов с высокочастотным полем [4]. Эффективность системы вывода в гироприборах (см. (2)) определяется величинами η_c и η_w , которые для канонических гиротронов в результате многолетней оптимизации доведены до величин, близких к единице [4, 5], в то время как для других разновидностей гироприборов эта работа ещё предстоит.

2. СЕКЦИОНИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОТОКИ (МНОГОЛУЧЕВЫЕ И МНОГОСТВОЛЬНЫЕ ГИРОТРОНЫ)

Секционирование электронных потоков давно применяется в электронных приборах пролётного типа [5], а в гироприборах (электронных мазерах на циклотронном резонансе) оно реализуется аналогично путём секционирования активной среды. Отметим, что концепция многолучевых и многоствольных приборов широко и успешно применяется для создания клистронов с



Рис. 3. Схема многолучевого гиротрона (*a*), фото электронной пушки (*б*), зависимости выходной мощности (сплошные линии) и КПД (пунктир) от полного тока при разной величине тока дополнительного пучка (*b*): 0 А (линия 1), 6,2 А (линия 2) и 13 А (линия 3)

рекордными характеристиками [8–10]. В многолучевых гиротронах к основному пучку добавляется один или несколько винтовых электронных пучков. В зависимости от параметров активной среды (главным образом осцилляторной и дрейфовой скоростей электронов) дополнительные пучки могут быть излучающими или выполнять функцию электронных поглотителей [5, 11–13]. На рис. 3 приведены схема многолучевого гиротрона, фотография двухлучевой электронной пушки, формирующей два активных (излучающих) электронных пучка, а также график зависимости мощности выходного излучения и КПД от полного тока при разных значениях тока дополнительного пучка [12]. Многолучевая схема может быть использована и для многочастотной генерации при взаимодействии разных пучков с разными модами соответственно. Указанная многочастотная генерация может быть организована последовательно при изменении циклотронной частоты (т. е. магнитного поля или ускоряющего напряжения) или одновременно, когда при фиксированном магнитном поле электроны в пучках имеют разную энергию (см. (1)) и находятся в резонансе с разными модами на разной частоте. В статье [14] приводятся первые экспериментальные результаты исследования нового двухлучевого гиротрона терагерцового диапазона частот на вто-

В. Е. Запевалов

308

рой гармонике циклотронной частоты. Гиротрон продемонстрировал стабильную одномодовую генерацию с параметрами (мощность выходного излучения 10 Вт на частоте 0,79 ТГц), которые представляют интерес для динамической ядерной поляризации в магнитно-резонансных спектрометрах следующего поколения с частотой 1,2 ГГц. Помимо проектной рабочей моды TE_{8,5}, в экспериментах наблюдалось возбуждение целого ряда других мод на первой и второй гармониках. Это делает новый гиротрон уникальным многочастотным источником излучения, который может быть использован и для других приложений.

Подобным образом может быть реализована и конструкция двухлучевой электронной пушки, формирующей два электронных пучка — винтовой и прямолинейный (поглощающий). Проведённые эксперименты показали существенное повышение мощности выходного излучения при наличии дополнительного поглощающего пучка [13].

Многолучевые гиротроны могут быть построены и на основе тонких («карандашных») пучков, находящихся в одной или нескольких плоскостях, что было успешно продемонстрировано в эксперименте [15].

Многолучевые системы из пучков разных типов могут сочетаться с самыми разнообразными электродинамическими системами. Таким образом, по аналогии с приборами классической электроники, могут быть созданы многоствольные (многомодульные) гироприборы, в которых реализуются самые разнообразные динамические и стохастические режимы генерации при различной энергии и питч-факторах пучков и разной связи между резонаторами. Некоторая техническая сложность построения таких систем может компенсироваться их уникальными характеристиками.

3. СЕКЦИОНИРОВАННИЕ ПРОСТРАНСТВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Продольное секционирование пространства взаимодействия является эффективным методом обеспечения селекции мод и повышения эффективности генерации в сверхвысокочастотных приборах. В гироприборах секционирование пространства взаимодействия осуществлено в гироклистронах, двухрезонаторных гиротронах, гиротронах на связанных резонаторах, гироумножителях и т. д. [4]. В связи с проблемой селекции мод могут представить интерес связанные резонаторы с трансформацией мод [16–18], 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 резонаторах такого типа создаёт предпосылки для эффективной селекции мод в этих системах, а резонансное снижение излучения на первой моде обеспечивает выходное излу-



Рис. 4. Связанный резонатор с трансформацией мод (*a*) и структура электрического поля в нём (*б*)

чение преимущественно на одной моде. Связанные резонаторы с трансформацией мод использовались в гиротронах на 1-й, 2-й и 3-й гармониках в широком диапазоне частот, мощностей и длительностей импульса [18]. Типичные значения КПД по меньшей мере не уступают гиротронам с одиночным резонатором (гиромонотронам). Дальнейшим развитием связанных резонаторов с



Рис. 5. Многоступенчатый связанный резонатор с трансформацией мод с излучением на частоте 420 ГГц: профиль для n = 3 и добротности 4 610 (*a*) и графики зависимостей электронного КПД $\eta_{\rm e}$ (линия 1), мощности омических потерь $P_{\rm ohm}$ (2) и мощности выходного излучения P (3) от тока I при ускоряющем напряжении 80 кВ, питч-факторе 1,3 и разбросе поперечных скоростей 0,3 (δ)

трансформацией мод является схема многоступенчатого резонатора [19], показанного, для примера, в 6-ступенчатой версии на рис. 5. На этом же рисунке приведены расчётные характеристики гиротрона с таким резонатором. Отметим, что возможности перестойки частоты в связанных резонаторах с трансформацией мод практически отсутствуют, за исключением особых случаев.

4. ДРУГИЕ НЕЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ



Рис. 6. Двухзеркальная версия эшелеттного гиротрона: 1 — электронный пучок, 2 — гладкое зеркало, 3 — эшелеттное зеркало, 4 — электромагнитное излучение

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

Аксиально-симметричный эшелеттный резонатор [20–22] в определённом смысле представляет собой развитие многоступенчатого резонатора [19] и обладает аналогичными достоинствами и недостатками. Этот резонатор обладает высокими селективными свойствами, и гиротроны, в которых он использовался, продемонстрировали хорошие выходные характеристики в экспериментах. Эшелеттный гиротрон имеет больши́е

перспективы применения, однако его расчёт и технология изготовления связаны с серьёзными проблемами. Сложная структура выходного излучения требует разработки нового варианта преобразователя. Возможности перестройки частоты есть [22], но для аксиально-симметричной версии они сравнительно невелики.

Для некоторых приложений может представлять интерес двухзеркальная версия эшелеттного гиротрона [21] (см. рис. 6). В этом варианте имеются некоторые возможности перестройки частоты и упрощается система вывода излучения, но при использовании цилиндрического пучка неизбежно некоторое снижение КПД. Эта схема является развитием гиротронов с квазоптическим резонатором [4, 7, 16, 17] с дополнительной селекцией мод за счёт эшелеттного зеркала, обладающего ярко выраженными дисперсионными свойствами.



Рис. 7. Резонатор коаксиального гиротрона (справа показано увеличенное сечение коаксиальной вставки)

Коаксиальный резонатор [4, 5, 7, 16, 23] (см. рис. 7) давно привлекает внимание разработчиков гироприборов, т. к. его применение перспективно для достижения высоких уровней мощности, чему благоприятствуют высокая селективность и отсутствие «провисания» потенциала пучка, возможность реализации естественной схемы рекуперации и быстрой перестройки частоты путём изменения напряжения на коаксиальной вставке. На рис. 8 приведена экспериментально полученная зависимость мощности выходного излучения и частоты от напряжения на коаксиальной вставке [23]. Дополнительные возможности селекции мод предоставляет профилирование внутренней стенки резонатора и коаксиальной вставки. Достигнутые уровни мощ-



Рис. 8. Зависимость мощности выходного излучения от напряжения на коаксиальной вставке; точки 1, 2, 3 соответствуют длинам волн 2,107; 2,140 и 2,195 мм; внешнее магнитное поле равно 5,68 Тл, напряжение на катоде составляет 65 кВ

ности коаксиальных гиротронов превышают 2 МВт на частотах до 170 ГГц. Использование коаксиальных гиротронов затрудняют технологические сложности, связанные с креплением, юстировкой и охлаждением коаксиальной вставки.

Перспективные варианты квазиоптических гиротронов [4, 7, 16, 17] весьма многочисленны, и их детальное обсуждение требует отдельной публикации. Упомянем только некоторые из них. Так, в настоящее время интенсивно разрабатываются разновидности гироприборов с ленточным электронным пучком и поперечным дифракционным выводом излучения (так же, как и с продольным выводом) как в нашей стране, так и за рубежом [24]. Варианты квазиоптических гиротронов с многозеркальными резонаторами и несколькими ленточными пучками предложены в книге [25]. В этих приборах есть возможность эффективной электродинамической селекции мод и плавной перестройки частоты путём подстройки положения зеркал, однако их техническая реализация очень сложна.

5. ГИРОТРОНЫ НА ВЫСОКИХ ГАРМОНИКАХ С ПРИОСЕВЫМ ПУЧКОМ

Больши́ми перспективами при работе на гармониках циклотронной частоты обладают гиротроны с тонким приосевым пучком, часто называемые гиротронами с большой орбитой. Высокая



Рис. 9. Схема гиротрона с приосевым пучком (*a*): 1 — электронная пушка, 2 — постоянный магнит, 3 — резонатор, 4 — коллектор, 5 — окно; фотография магнитной системы (*б*) и зависимость мощности выходного излучения от ускоряющего напряжения U и гирочастоты f_c (*b*) при различных значениях тока подмагничивающей катушки: 12 A (линия 1), 11 A (2), 10 A (3), 9 A (4), 7 A (5), 3 A (*b*) и 0 A (7)

степень селекции мод в этих гиротронах объясняется тем, что для приосевого положения электронного пучка обеспечивается взаимодействие только с теми модами (TE_{mp}), азимутальный индекс которых равен номеру циклотронной гармоники (m = n) [26]. Наиболее успешные результаты к настоящему времени достигнуты в системах с обычными резонаторами. Так, в гиротронах с большой орбитой с постоянным магнитом (магнитное поле около 1 Тл) [27] была получена генерация со следующими параметрами:

1) n = 3, мода TE₃₁₁, частота излучения 84,88 ГГц, мощность 2,5 кВт, КПД 6,25 %;

2) n = 4, мода TE₄₁₁, частота излучения 112,7 ГГц, мощность 0,47 кВт, КПД 0,96 %.

Наблюдалась также генерация на 5-й гармонике с частотой 138 ГГц. На рис. 9 приведены схема гиротрона с приосевым пучком, фотография магнитной системы и зависимость мощности выходного излучения от ускоряющего напряжения и гирочастоты для n = 4.

В гиротронах с большой орбитой с импульсным магнитным полем [28–30] на 2-й и 3-й циклотронных гармониках были достигнуты следующие уровни мощности: 2 кВт на частоте около 0,6 ТГц (n = 2) и 0,3 кВт на частоте около 1 ТГц (n = 3). Отметим, что в значительной мере эти результаты обусловлены тщательной оптимизацией электронно-оптической системы, формирующей приосевой винтовой электронный пучок высокого качества. Таким образом, в гиротронах с большой орбитой имеется высокая степень электронной селекции, возможности перестройки частоты определяются электродинамической системой, но уровни предельной достижимой мощности заметно ниже, чем для канонических гиротронов (в соответствии с (3)). Продолжаются разработки гиротронов с большой орбитой с непрерывным режимом генерации для спектроско-пических приложений.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён обзор вариантов неканонических гиротронов с различными электродинамическими и электронно-оптическими системами (включая многолучевые и многоствольные варианты), перспективных с точки зрения перестройки частоты и повышения селекции мод. Выяснены преимущества и недостатки разных вариантов неканонических гироприборов.

2018

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-02-00832).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. А.с. 223931 СССР. МКИ H01J25/00. Прибор для генерирования электромагнитных колебаний в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн / Гапонов А.В., Гольденберг А.Л., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Заявл. 24.03.67; опубл. 25.03.76.
- 2. Nusinovich G.S., Thumm M., Petelin M.I. // J. Infrared Mm THz Waves. 2014. V. 35. P. 325.
- 3. Запевалов В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 559.
- 4. Nusinovich G. S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004. 352 p.
- 5. Tsimring Sh. E. Electron beams and microwave vacuum electronics. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2007. 573 p.
- 6. Zapevalov V. E. // Fusion Sci. Technology. 2007. V. 52, No. 2. P. 340.
- 7. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. Karlsruhe: KIT Sci. Publ. 2014. 179 p.
- Freydovich I. A., Nevsky P. V., Vorobyev M. Y., et al. // IVEC/IVESC 2006 Proceedings. California, 25–27 April 2006. P. 307.
- 9. Konnov A. V. // 10th Int. Vacuum Electronics Conf. IVEC 2009 Proceedings. Italy, 28–30 April 2009. P. 363.
- 10. Борисов Л. М., Гельвич Э. А., Жарый Е. В. и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1993. Вып. 1. С. 12.
- 11. Запевалов В. Е., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33, № 11. С. 1288.
- 12. Запевалов В. Е., Мануилов В. Н., Малыгин О. В., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 3. С. 387.
- 13. Запевалов В. Е., Малыгин С. А., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1993. Т. 36, № 6. С. 543.
- 14. Idehara T., Glyavin M., Kuleshov A., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. Art. no. 094708.
- 15. Jerby E., Kesar A., Korol M., et al.// IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. P. 445.
- Gaponov A.V., Flyagin V.A., Gol'denberg A.L., et al. // Int. J. Electron. 1981. V.51, No. 4. P. 277.
- 17. Kim K. J., Read M. E., Baird J. M., et al. // Int. J. Electron. 1981. V. 51, No. 4. P. 427.
- 18. Pavelyev V.G., Tsimring Sh.E., Zapevalov V.E. // Int. J. Electron. 1987. V.63, No. 3. P. 379.
- Власов С. Н., Завольский Н. А., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 7. С. 716.
- 20. Белоусов В.И., Власов С.Н., Завольский Н.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 6. С. 497.
- Belousov V. I., Vlasov S. N., Zavolsky N. A., et al. // 9th Int. Workshop Strong Microwaves and THz Waves: Sources and Applications. Nizhny Novgorod—Perm—Nizhny Novgorod, July 24–30, 2014. P. 166.
- 22. Агапов Л. Н., Богданов С. Д., Венедиктов Н. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 7. С. 489.
- 23. Flyagin V.A., Khizhnyak V.I., Manuilov V.N., et al. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2003. V.24, No. 1. P.2.
- 24. Ginsburg N. S., Zotova L. Y., Sergeev A. S., et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. Art. no. 105101.
- 25. Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ: Методы анализа и оптимизации параметров. М.: Радио и связь, 1986. 208 с.

- 26. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Федотов А. Э. // ЖТФ. 1998. Т. 68, № 10. С. 91.
- 27. Idehara T., Ogawa I., Mitsudo S., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 3. P. 903.
- Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N. // Phys. Rev. Lett. 2009. V.102, No. 24. Art. no. 245101.
- 29. Bratman V., Glyavin M., Idehara T., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37, No. 1. P. 36.
- 30. Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В. // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181. С. 867.

Поступила в редакцию 2 ноября 2017 г.; принята в печать 26 апреля 2018 г.

NON-CANONICAL GYROTRONS

V. E. Zapevalov

We consider some gyrodevices, which differ from the gyrotron canon, in particular, devices with sectioned active media and/or interaction spaces, and non-tubular helical electron beams, and non-cylindrical (coaxial, quasioptical, echelett, etc.) cavities. Promising variants of non-canonical gyrotrons, including multi-beam and multi-barrel tubes, are considered from the viewpoint of frequency tuning and mode selection enhancement.