

*Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Зуев А.С., Седов А.С.
Институт прикладной физики РАН*

Многочастотные субтерагерцовые гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы

В докладе рассмотрены два проекта частотно-перестраиваемых гиротронов для работы в интервале частот 0.2-0.26 ТГц с различным уровнем выходной мощности (200 Вт и 200 кВт). Исследована возможность дискретной перестройки частоты генерируемого излучения при помощи изменения магнитного поля и возможность плавной перестройки за счёт изменения радиуса резонатора, путём контролируемого изменения его температуры. В данных гиротронах планируется также использовать и рабочие моды с большим числом продольных вариаций, и переход с одной рабочей моды на другую для увеличения диапазона плавной перестройки частоты.

Ключевые слова: терагерцовые волны, гиротроны, спектроскопия, диагностика плазмы, перестройка частоты

В последнее время в связи с потребностями спектроскопии и активной диагностики плазмы, а также целого ряда других проблем, усилился интерес к разработке субтерагерцовых и терагерцовых источников непрерывного излучения малой (10-1000 Вт), средней (1-100 кВт) и большой (более 100 кВт) мощности. Ключевым фактором для ряда приложений также является возможность частотной перестройки таких источников. Одним из перспективных источников в указанном диапазоне с возможностью плавной или ступенчатой перестройки частоты является многочастотный гиротрон [1-3]. Появление и быстрый прогресс «сухих» (не требующих заливки криогенными жидкостями) сверхпроводящих магнитных систем делает разработку таких гиротронов весьма привлекательной.

Далее рассмотрены два варианта таких гиротронов для работы в интервале частот 0.2-0.26 ТГц с выходной мощностью 200 Вт и 200 кВт с учётом приемлемой удельной нагрузки на стенки резонатора. В качестве рабочей моды выбрана мода $H_{19,8}$. Гиротроны проектировались для работы с криомагнитом JASTEC-10T100, имеющим максимальное магнитное поле 10 Тл и проходное отверстие 100 мм [4]. Расчёты проведены на основе теории с фиксированной [5] и нефиксированной (самосогласованной) [5] продольной структурой высокочастотного поля и с учетом реальных омических потерь в резонаторе. В качестве фиксированной продольной структуры высокочастотного поля выбрана функция гаусса $f = \exp(-2z^2/L^2)$, хорошо соответствующая реальной ситуации. Для такой структуры максимальное значение поперечного КПД составляет более 70% [5]. Аппроксимация продольной структуры высокочастотного поля в виде синуса существенно не меняет результаты.

Основные трудности при расчете параметров гиротрона с выходной мощностью 200 кВт, связаны с большой удельной нагрузкой в режиме оптимального выходного КПД. Пожертвовав КПД, удаётся добиться понижения тепловой нагрузки на стенки резонатора. Таким образом, рабочая точка выбиралась по наибольшему КПД при приемлемой удельной нагрузке (до 2,5 кВт/см²). Были получены следующие параметры данного гиротрона: $U = 55$ кВ, $I = 10$ А, $L = 10$ мм. Заметим, что в случае гиротрона с выходной мощностью

200 кВт отношение омической добротности к дифракционной достаточно велико и омические потери несущественно влияют на уменьшение выходного КПД.

При оптимизации параметров гиротрона исследовались зависимости стартового тока от магнитного поля и проанализирован режим жёсткого возбуждения, типичный для области высоких КПД. Стартовый ток для гауссового продольного распределения ВЧ-поля рассчитывался по известной формуле [6]:

$$I_{\text{ст}} = 5.35 \cdot 10^3 \frac{\exp\left(\frac{(\mu\Delta)^2}{8}\right) \mu^{2(2-n)}}{\left(\frac{\mu^2\Delta}{4} - n\right) QG} (\pi g)^{2(n-3)} \left(\frac{2^n n!}{n^n}\right)^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^{2n-5},$$

где $I_{\text{ст}}$ – стартовый ток пучка в амперах, $\mu = \pi \frac{\beta_{\perp}^2 L}{\beta_{\parallel} \lambda}$ – параметр неизохронности, β_{\perp} и β_{\parallel} – поперечная и продольная скорости электронов, отнесенные к скорости света, $\Delta = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \left[1 - \frac{n\omega_H}{\omega}\right]$ – нормированная расстройка между циклотронной частотой и выходной частотой, Q – полная добротность резонатора, $g = \frac{\beta_{\perp}}{\beta_{\parallel}}$ – питч-фактор, G – структурный фактор, определяющий связь пучка и моды [6], зависящий от R_0 – радиуса пучка.

Рассмотрены возможные стартовые сценарии, обеспечивающие установление режима стабильной одномодовой генерации в данном гиротроне. На рисунке 1 изображена расчётная область работы (зоны генерации) как зависимость тока (в амперах) от нормированной расстройки (пропорциональной магнитному полю). Сплошной линией обозначены зоны самовозбуждения мод, вычисленные по линейной теории. Штрих-пунктиром обозначены границы устойчивости жёстких режимов. Прерывистой линией обозначен оптимальный по КПД режим. Кружочком отмечен режим с максимальным КПД для основной моды. Отметим, что рабочая точка находится недалеко от границы режимов мягкого и жёсткого возбуждения, в отличие от маломощного варианта гиротрона.

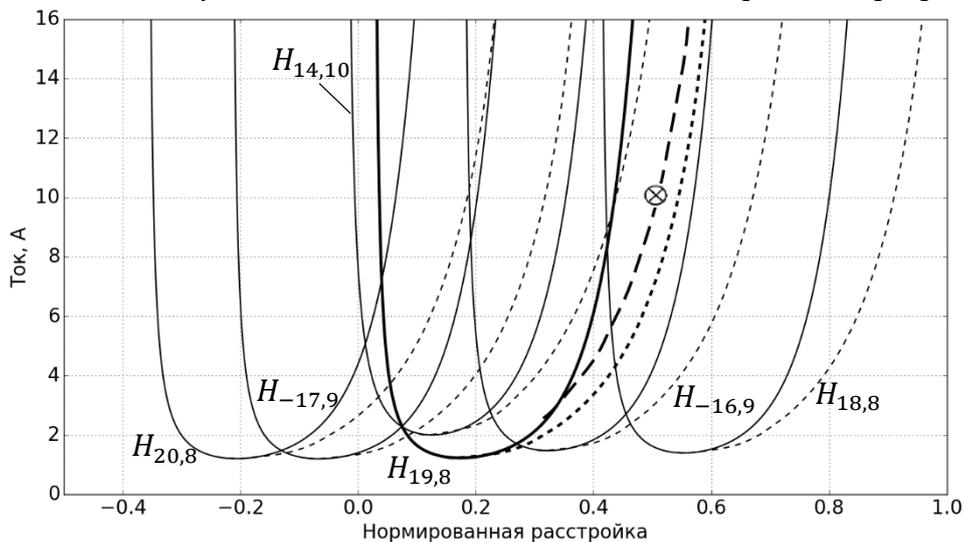


Рисунок 1. Зависимость стартовых токов основной моды $TE_{19,8}$ и соседних мод от нормированной расстройки для варианта гиротрона мощностью 200 кВт

В случае оптимизации маломощного гиротрона (гиротрона с выходной мощностью 200 Вт) наблюдается существенное смещение значений безразмерных параметров тока и длины, отвечающих максимальному значению выходного КПД, от оптимальных значений параметров для поперечного КПД. Выходной КПД в этом случае сильно ограничен относительно высокими интегральными омическими потерями в резонаторе и минимальным ускоряющим напряжением. В качестве рабочей точки выбрана точка с

максимальным КПД: найдены соответствующие ей параметры маломощного гиротрона: $U = 10$ кВ, $I = 0.8$ А, $L = 29$ мм.

Характерные значения оптимизированного КПД двух рассматриваемых вариантов гиротрона: 20% и 36% для гиротронов с выходной мощностью 200 Вт и 200 кВт, соответственно, при этом электронные КПД (доля мощности, отбираемая у пучка) принимали значения 32% и 40%.

В этих гиротронах исследована возможность ступенчатой перестройки частоты при помощи изменения магнитного поля путем использования последовательности рабочих мод резонатора со сходной структурой. Возможность перестройки рассматривалась для гиротрона с рабочими модами: $H_{16,6}$ (203 ГГц), $H_{18,7}$ (235,5 ГГц), $H_{19,8}$ (260 ГГц), $H_{21,9}$ (292 ГГц), $H_{22,10}$ (317 ГГц), частота соседней моды от основной отличается на 9%. Чтобы сместиться в более коротковолновый диапазон длин волн от основной моды $H_{19,8}$ требуется криомагнит с магнитным полем большим, чем 10 Тл. Рассмотрена возможность использования рабочих мод с большим числом продольных вариаций для перестройки частоты, а также, учтено влияние паразитных мод с такой структурой. Показано, что возбуждение соседних мод и переход на рабочие моды с большим числом продольных вариаций позволяет увеличить диапазон плавной перестройки частоты (рис. 2). Рассмотрена дополнительная подстройка частоты, осуществляемая при помощи управления температурой резонатора (порядка 3-4 МГц/градус [7]). Данный способ применим только для маломощных гиротронов, где отсутствует проблема с удельной тепловой нагрузкой на стенки резонатора.

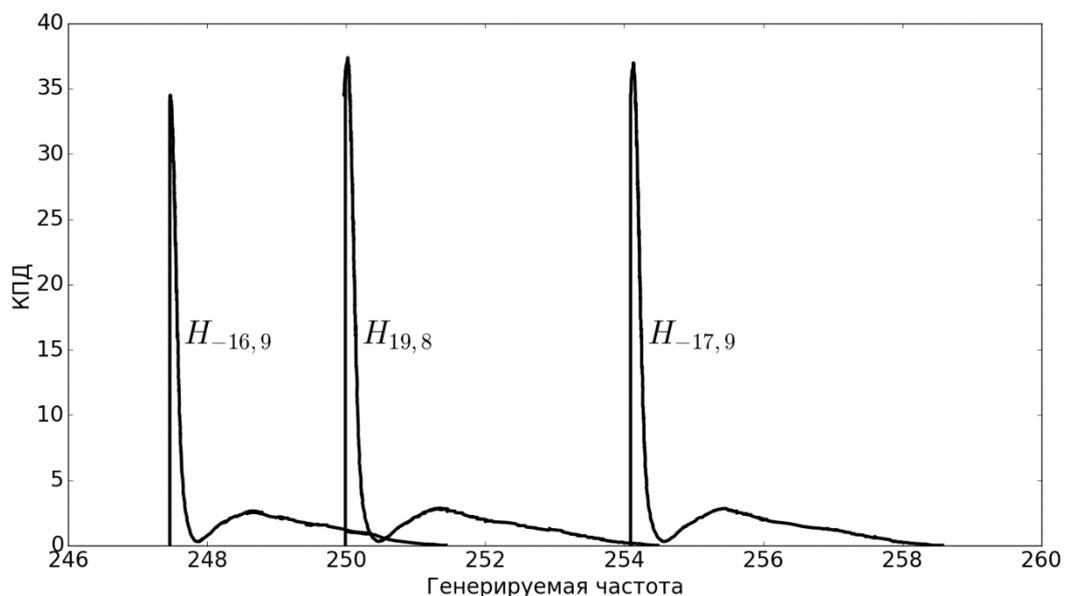


Рисунок 2. Зависимость выходного КПД от генерируемой частоты для основной моды $H_{19,8}$ и двух соседних ($H_{-16,9}$ и $H_{-17,9}$), полученная на основе теории с нефиксированной продольной структурой высокочастотного поля для 200 кВт варианта гиротрона.

При проектировании многочастотных гиротронов приходится решать проблему вывода излучения через вакуумное окно. Предполагается, что рабочая мода преобразована внутренним преобразователем в волновой пучок [8]. Были рассмотрены коэффициенты отражения от различных типов выходного окна при нормальном падении Н-волны. Требуемое пропускание для нескольких частот можно получить при прохождении через однодисковое окно, но это приемлемо не для всех рассмотренных выше частот, поскольку недостаточно полос пропускания. Меньшее значение коэффициента отражения для всего

рассматриваемого диапазона частот можно получить при помощи добавления просветляющей пластинки, но только на малом уровне мощности. При помощи двухдискового окна можно получить больше полос пропускания, к тому же спектр этих полос уже не эквидистантный. Наиболее широкополосным является Брюстеровское окно, но его реализация наталкивается на ряд технических сложностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке регионального гранта РФФИ 15-42-02380 р_поволжье_а.

Библиографический список

1. А.В. Гапонов, М.И. Петелин, В.К. Юлпатов. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике. - Изв.вузов. Радиофизика, 1967, т.10, №9-10, с.1414.
2. В.Е Запелалов, А.А. Богдашов, Г.Г. Денисов, А.Н. Куфтин, В.К. Лыгин, М.А. Моисеев, А.В. Чирков Разработка прототипа многочастотного мегаваттного гиротрона в диапазоне 105-156 ГГц. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. XLVII, № 5-6. С. 443-452.
3. M. Thumm, A. Arnold, E. Borie, O. Braz, G. Dammertz, O. Dumbrajs, K. Koppenburg, M. Kuntze, G. Michel, B. Piosczyk. Frequency step-tunable megawatt gyrotrons for plasma physics applications. // Fusion Eng. and Design. 2001. V. 53. P. 407-421.
4. M.Yu. Glyavin, A.V.Chirkov, G.G.Denisov, A.P.Fokin, V.V.Kholoptsev, A.N.Kuftin, A.G.Luchinin, G.Yu.Golubyatnikov, V.I.Malygin, M.V.Morozkin, V.N.Manuilov, M.D.Proyavin, A.S.Sedov, E.V.Sokolov, E.M.Tai, A.I.Tsvetkov, V.E.Zapevalov Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media, Rev. Sci. Instr., 86(5), 054705, 2015
5. Г.С. Нусинович, Р.Э. Эрм. К.П.Д. МЦР-монотрона с гауссовым продольным распределением высокочастотного поля. // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1972. № 8. С. 55-60.
6. G.S. Nusinovich. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004.
7. Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запелалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цало-лихин В.И. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике гирочастоты для спектроскопии динамически поляризованных ядер. Изв. ВУЗов Радиофизика, 2010, 53, 4, 260-268
8. Vlasov S.N., Orlova I.M. // Radio Physics and Quantum Electronics, vol. 17, 1974, pp. 115-119.