

Повышение рабочей частоты гиротронов

В.Е. Запевалов

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: Рассмотрены современное состояние разработок терагерцовых гиротронов и тенденции их дальнейшего развития в плане повышения частоты генерации при работе в стационарном и в импульсном магнитном поле. Обозначены основные факторы препятствующие повышению частоты и возможные пути преодоления проблем, обусловленных указанными факторами.

Ключевые слова: микроволны, магнит, гиротрон, резонатор, УТС, ЯМР-спектрометр.

1. Введение

Гиротрон был создан во второй половине прошлого века на основе целого ряда предшествующих работ [1, 2]. Его принцип действия основан на синхронном взаимодействии винтового электронного пучка (ВЭП) и электромагнитной волны [2-9]. Для эффективного взаимодействия должно удовлетворяться условие синхронизма электронных осцилляторов с электромагнитной волной на гирочастоте или ее гармониках.

$$\omega \approx n\omega_H, \quad (1)$$

где ω_H - циклотронная частота (гирочастота), n -номер циклотронной гармоники. Для реализации условия циклотронного резонанса в ТГц диапазоне частот гиротроны либо должны работать при наличии очень сильных магнитных полей, либо на гармониках циклотронной частоты электронов.

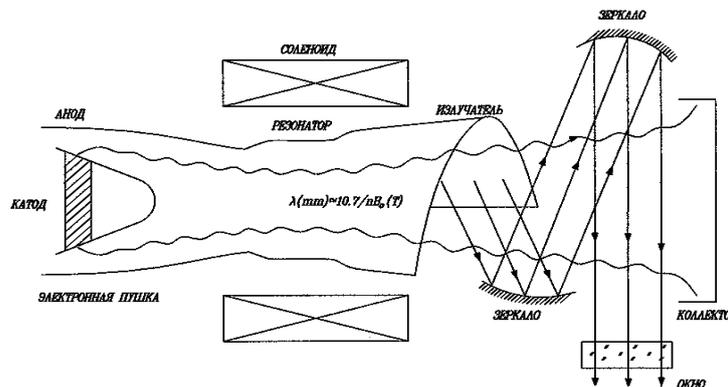


Рисунок 1. Общая схема гиротрона

За минувшие годы в России и зарубежных странах созданы мощные высокоэффективные гиротроны от см до субмм диапазонов [2-9] и сформировался ряд фундаментальных научных направлений, успешное развитие которых обусловлено наличием этих источников [4, 9, 10, 11]. Мощность и КПД гиротронов определяются известными выражениями [4, 5, 8]

$$P = \eta I U, \quad \eta = t_{\perp} \eta_{\perp} \eta_c \eta_w k_t Q_{ohm} / (Q_{ohm} + Q_d), \quad (2)$$

где I и U – ток пучка гиротрона и ускоряющее напряжение, η_{\perp} и η_c поперечный КПД

[4-8] и коэффициент преобразования встроенного преобразователя, t_{\perp} - отношение осцилляторной энергии электронов к полной, Q_d и Q_{ohm} - дифракционная и омическая добротности, k_r - определяется совокупностью возмущающих факторов и для идеализированной модели равен 1. Величины I и t_{\perp} - определяются системами формирования и транспортировки винтового электронного пучка (ВЭП), и, как правило, уменьшаются с ростом частоты. Для некоторых приложений нужны повышение частоты и мощности гиротронов, но сложность задачи обостряется техническими возможностями современных магнитных систем [10], проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь, особенно в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты в субмм диапазоне [3-8]. В этой связи рассмотрены варианты импульсных магнитных систем для гиротронов, позволяющих производить дальнейшее наращивание магнитной индукции и связанные с этим возможности повышения частоты. Обсуждаются проблемы, возникающие при повышении частоты гиротронов с импульсным магнитным полем. В процессе разработки требуется учет как физических факторов (конкуренция мод, омические потери и др.), так и конструктивных особенностей основных подсистем (магнитной, электроннооптической и электродинамической, а также вывода и транспортировки ВЧ мощности), ограничивающих мощность и эффективность таких гиротронов с ростом частоты.

2. Стационарное магнитное поле

Среди основных приложений гиротронов, работающих в непрерывном (или длинноимпульсном) режиме в стационарном магнитном поле, как правило, отмечают воздействие на плазму (управление параметрами и активная диагностика) в установках УТС (токамаки, стеллараторы и др.), спектроскопические приложения (ДНП ЯМР, нелинейная спектроскопия и др.), технологические приложения. Первые два из этих приложений основаны на резонансном воздействии на объект, и можно констатировать устойчивую тенденцию к повышению требуемых рабочих частот гиротронов.

Успешное использование гиротронов на токамаках: T-10, DIII-D, ASDEX-Upgrade, стеллараторах: W-7AS, LHD и др, привело к разработке гиротронных ЭЦР комплексов нового поколения для международного токамака ITER и стелларатора W-7X. Проектируется гиротронный комплекс для токамака следующего поколения DEMO. Рабочие частоты гиротронов при этом потребовалось увеличить до 110, 140 и 170 ГГц, а для DEMO до 230-250 ГГц, при сохранении мощности единичного гиротрона на уровне 1 МВт в непрерывном режиме. Для работы всех этих гиротронов необходимы соответствующие криомагниты с требуемой величиной магнитного поля (от 5 до 10 Тл) и проходным отверстием от 160 до 240 мм, как правило «сухие» (т.е. без использования сжиженных газов).

Другим важным и быстро прогрессирующим применением гиротронов является динамическая поляризация ядер (ДПЯ), позволяющая резко повысить чувствительность ЯМР спектрометров. Требуемая мощность сравнительно не велика (40-100 Вт), но требуется крайне высокая стабильность параметров во времени и требование конкретных рабочих частот, иногда требуется небольшая подстройка частоты. Основной производитель гиротронных комплексов для ДПЯ фирма Брукер (Bruker) в кооперации с СиПиАй (CPI), США, которая выпустила более 20 установок за последние годы с частотами от 0,26 до 0.59 ТГц. В ИПФ РАН также были разработаны установки такого назначения с частотами от 0.26 и 0.52 ТГц [11]. Продвижение к более высоким частотам для ДПЯ продолжается. В этой связи перспективными представляются гиротроны с приосевым пучком [11] и

многоствольные гиротроны, где имеются предпосылки для эффективной селекции мод.

3. Импульсные поля

В плане максимального продвижения к высоким частотам значительные перспективы представляет использование для гиротронов импульсных магнитных систем. Успешное применение таких систем (см. рис. 2) уже позволило продемонстрировать рекордные значения частоты и мощности, недоступные для других приборов [11] и новые разнообразные приложения мощного субмиллиметрового излучения впервые были успешно реализованы. Развитие за прошедшие годы новых технологий, материалов, коммутирующих и накопительных систем, позволяет продвинуться далее по уровню частот и мощностей. В недавних экспериментах ИПФ использование специально разработанного импульсного соленоида с магнитным полем до 50 Тл позволило получить генерацию на основном циклотронном резонансе в одиночных импульсах длительностью 50 мкс на рекордных частотах 1-1,3 ТГц с мощностью 5-0.5 кВт [11].

В ИПФ развивается технология, которая обеспечит создание достаточно простых импульсных соленоидов с индукцией магнитного поля до 30 Тл и частотой повторения импульсов до 0,1 Гц. Это позволит реализовать традиционные гиротроны на основном циклотронном резонансе и второй гармонике с частотой генерации до 0,8—1,6 ТГц при пиковой мощности в несколько сотен киловатт и средней мощности порядка 1 Вт. В качестве одного из перспективных приложений подобных гиротронов рассматривается дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения [11]. Для реализации этого метода разработан гиротрон с рабочей частотой 0.67 ТГц и мощностью до 300 кВт, который может быть использован для расстояний поиска источников в несколько десятков метров.

Корпус лампы и резонатор в виде проводящих металлических оболочек обладают свойствами экранирования переменного магнитного поля [12-14], кроме того возникают большие силовые нагрузки на эти оболочки [12, 13]. Для ослабления этого эффекта корпус может быть изготовлен из материала с низкой электропроводностью – сплава, керамики или композитного материала. Для резонатора такое решение неприемлемо по причине резкого возрастания омических потерь. Варианты – изготовление из материала с низкой проводимостью с нанесением тонкого хорошо проводящего слоя. Для уменьшения экранирования также могут использоваться многозеркальные варианты резонаторов, в которых нет замкнутых токов, однако наведенные напряжения могут вызвать пробойные явления.

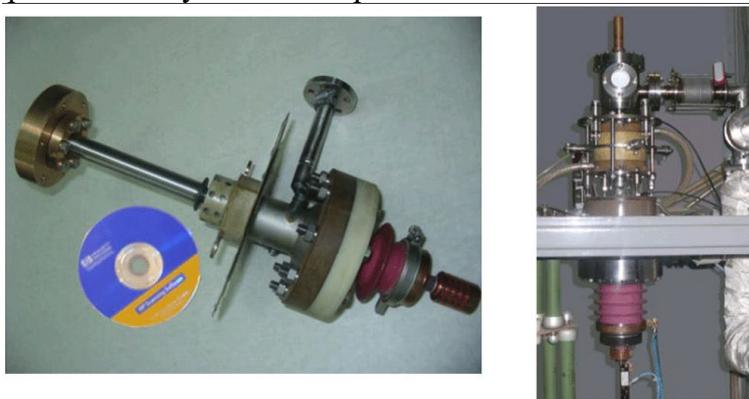


Рисунок 2. Примеры гиротронов с импульсным магнитным полем.

Одним из наиболее известных конструктивных вариантов для получения сильных магнитных полей в импульсном режиме является магнит Фонера [13]., схематически показанный на рисунке 3. Фотография такого магнита показана на том же рисунке. В магните Фонера плотность тока является неравномерной, как и в магните Биттера [12]., который используется для получения сильных магнитных полей в стационарных режимах. В силу сходства в литературе часто оба этих магнита называют магнитами Биттера. Некоторые варианты магнита Фонера с характеристиками системы питания приведены в [13].

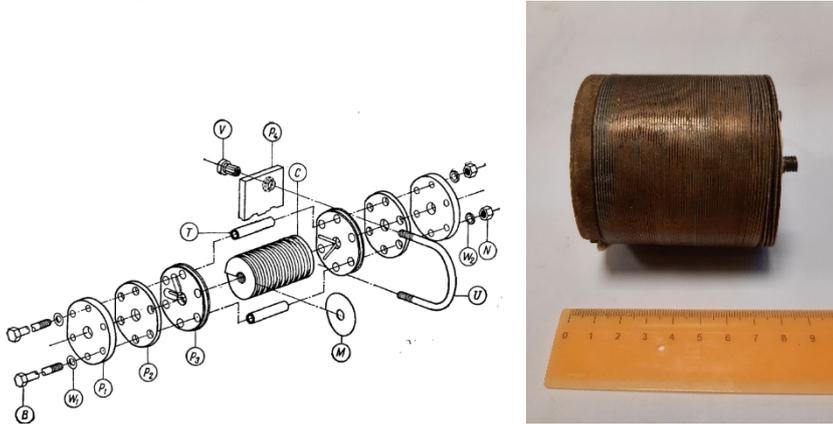


Рисунок 3. Магнит Фонера (схема и фото).

Вариантом кардинального решения проблемы экранировки является размещение магнитной системы, например, магнита Фонера, внутри вакуумного объема и совмещение поверхности резонатора с внутренней поверхностью магнита. Слабая неоднородность профиля резонатора практически не влияет на свойства магнита, который используется для организации взаимодействия в резонаторе, а также для формирования и транспортировки винтового электронного пучка (ВЭП). Отметим, что магнитное поле на краях магнита снижается примерно вдвое, что приводит к увеличению ведущего радиуса ВЭП R_0 примерно в $2^{1/2}$ раз. Это обстоятельство накладывает ограничение на выбор рабочих мод TE_{mp} в резонаторе радиусом $R_c = v\lambda/2\pi$. Поскольку $R_0 < R_c/2^{1/2}$, отсюда следует $m < v/2^{1/2}$. С учетом конечной толщины пучка величина R_0 и m должны быть еще меньше. Поскольку токи в таких резонаторах поперечные, то возмущение поля сравнительно невелико, однако путем подбора профиля витков и зазора можно в определенных пределах повысить селективность резонатора и влиять на модовый состав выходного излучения.

Рассмотрим конкретный пример гиротрона с частотой 1 ТГц, рабочая мода $TE_{31,9}$ ($\nu = 67.334$) с использованием в качестве прототипа магнитной системы катушки из [13] таблицы 1: внутренний диаметр 6,3 мм, наружный 25 мм, длина 20 мм, максимальное поле 70 Тл, рабочее около 38.4 Тл. Профиль резонатора и распределение ВЧ поля приведены на рисунке 4, частота $f = 1001,1$ ГГц, полная добротность $Q = 9697$, дифракционная $Q_d = 15636$, омическая $Q_{ohm} = 32640$. На рисунке 4 приведены профиль электродов ЭОС, магнитная система и траектории электронов и функция распределения в ВЭП по поперечным скоростям. При параметрах пучка $U_0 = 50$ кВ, $I = 20.3$ А, $t_1 = 0.6$, ($g = 1.2$), $R_0 = 1.55$ мм, получаем $\eta = 17.8\%$, $P = 180,3$ кВт. Расчеты проведены с помощью программного комплекса ANGEL [15].

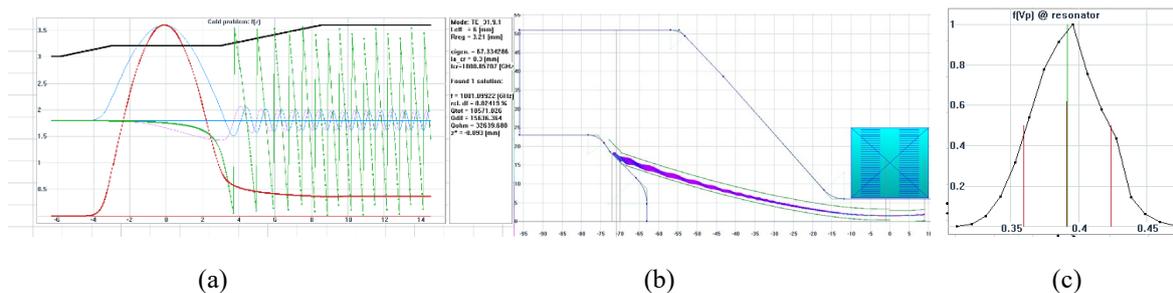


Рисунок 4. Профиль резонатора (а). ЭОС гиротрона (б), функция распределения ВЭП (с)

Аналогично был спроектирован гиротрон с частотой 1.5 ТГц, рабочая мода $TE_{47,13}$ ($\nu = 101.18$) с использованием в качестве прототипа той же магнитной системы катушки из [13], рабочее около 58 Тл. Профиль резонатора и распределение ВЧ поля приведены на рисунке 8, частота $f = 1504,3$ ГГц, полная добротность $Q = 10572$, дифракционная $Q_d = 14492$, омическая $Q_{ohm} = 29310$, $U_0 = 50$ кВ, $I = 8.3$ А, $t_{\perp} = 0.6$, ($g = 1.2$), $R_0 = 1.55$ мм, $\eta = 11.3\%$, $P = 46,8$ кВт.

Самые высокие воспроизводимые значения магнитного поля в настоящее время достигнуты на основе одновиткового соленоида [12, 13]. Некоторые варианты одновитковых магнитов с полями до 350 Тл с характеристиками системы питания приведены в [13], Ясно, что при работе на полях заметно меньших предельного магнит сможет работать достаточно долго и надежно. На основе такого одновиткового соленоида также могут быть разработаны гирорезонансные приборы. Резонатор, совмещенный с внутренней поверхностью такого магнита, обладает очевидным сходством с двухзеркальным резонатором [4]. Поскольку моды этого резонатора не вращаются, то при азимутально однородной эмиссии КПД гиротрона снижается ($k_t < 0.67$), но имеются методы ослабления этого эффекта [4]. Предварительные оценки показывают, что могут быть созданы мощные гиротроны с частотой до 3 ТГц и более.

Заключение

Проведен обзор перспективных вариантов гиротронов с точки зрения повышения частоты при использовании стационарных и импульсных магнитных полей. Выявлены преимущества и недостатки разных вариантов гироприборов с повышением частоты. Работа выполнена при поддержке госзадания ИФФ РАН Проект № 0030-2021-0027.

Список литературы

1. Гапонов А.В., Гольденберг А.Л., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Прибор для генерации электромагнитных колебаний в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн: А.С. 223931 (СССР). Заявл. 24.03.67, опубл. 25.03.76
2. G.S.Nusinovich, M.Thumm, M.I. Petelin. The Gyrotron at 50: Historical Overview. J. Infrared Mm THz Waves (2014) 35:325–381.
3. В.Е.Запечалов. Эволюция гиротронов. Изв. вузов, Радиофизика, 2011, т.54, №8-9, с.559-572.
4. G.S.Nusinovich. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004.
5. Sh.E.Tsimring, Electron beams and microwave vacuum electronics, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
6. M.V.Kartikyan, E.Borie, and M.K.A.Thumm, Gyrotrons—High Power Microwave and Millimeter Wave Technology, Springer, Berlin (2004).
7. C. J. Edgcombe, ed., Gyrotron Oscillators: Their Principles and Practice, Taylor and Francis, London (1993).
8. V.E.Zapevalov, Increasing Power and Efficiency of gyrotrons., Fusion Science and Technology, 2007, Vol.52, No2, pp. 340-344.

9. M.Thumm. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. KIT Scientific Publishing, 2018. “
10. Applications of High-Power Microwaves. ed. By A. V. Gaponov-Grekhov and V. L. Granatstein, Artech House, Norwood, MA, 1994.
11. Glyavin M.Yu, Sabchevski, S., Idehara, T., et al. Novel and Emerging Applications of the Gyrotrons Worldwide: Current Status and Prospects. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2021, vol. 42, P. 1-27
12. Монтгомери Д.Б. Получение сильных магнитных полей: с помощью соленоидов. Изд-во «Мир», 1972
13. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Изд-во «Мир», 1972.
14. В.В. Васильев, Л.Л. Коленский, Ю.А. Медведев, Б.М. Степанов. Проводящие оболочки в импульсном электромагнитном поле. М., Энергоатомиздат, 1982.
15. Semenov E., Zapevalov V., Zuev A. Methods for Simulation the Nonlinear Dynamics of Gyrotrons. In: Balandin D., Barkalov K., Gergel V., Meyerov I. (eds) Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies. MMST 2020. Communications in Computer and Information Science, vol. 1413, 49-62. 2021. Springer, Cham.