

Оптимизация многоствольного гиротрона терагерцового диапазона

В.Е. Запечалов, А.С. Зуев, О.П. Планкин, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Аннотация: представлен проект многоствольного гиротрона (МСГ) с возможностью генерации на частотах 263 ГГц, 395 ГГц, 526 ГГц и 593 ГГц, востребованных в ДПЯ/ЯМР-установках с основными частотами (по протонам ^1H) 400 МГц, 600 МГц, 800 МГц и 900 МГц, соответственно. Рассмотрены особенности проектирования электронно-оптической системы МСГ терагерцового диапазона. Наряду с обычной схемой вывода излучения в сторону коллектора рассматривается перспективность схемы МСГ с выводом излучения в сторону электронной пушки (гирос-ЛОВ).

Ключевые слова: ЯМР, ДПЯ, спектроскопия, терагерцовое излучение, гиротрон, гармоники циклотронной частоты, криомагнит, электронные пучки

1. Введение

В настоящее время спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектроскопия) стала важным инструментом исследований в физике, химии, биологии, медицине, междисциплинарных и технологических работах [1]. Использование методов динамической поляризации ядер (ДПЯ) позволяет существенно повысить возможности ЯМР спектрометров в плане точности, надежности и скорости измерений [1]. В крупных научных центрах зачастую одновременно используются несколько ЯМР установок с разными частотами, размещенных в одном здании, что делает желательным и наличие соответствующих ДПЯ источников микроволнового излучения с разными частотами. Для ДПЯ/ЯМР спектроскопии с частотами 400 МГц, 600 МГц, 800 МГц и 900 МГц (по ^1H) требуются источники микроволнового и терагерцового излучения мощностью 10–100 Вт с частотами 263 ГГц, 395 ГГц, 526 ГГц и 594 ГГц, соответственно. Одними из наиболее пригодных для таких целей приборов высокочастотной вакуумной электроники больших мощностей являются гиротроны [2]. В настоящее время в разных научных центрах успешно используется несколько десятков гиротронов с указанными выше частотами. Все эти гиротроны работают в криомагнитах, обеспечивающих требуемую величину магнитного поля B_0 для работы на частоте f в условиях циклотронного резонанса на n -й гармонике при ускоряющем напряжении U_0

$$f[\text{ГГц}] \approx 28 \cdot \frac{nB_0[\text{Тл}]}{1 + U_0[\text{кВ}]/511} \quad (1)$$

Заметим, что магнитные системы гиротрона и ЯМР-спектрометра должны быть расположены таким образом, чтобы их рассеянные поля не влияли на работу друг друга (характерная величина допустимых рассеянных полей около 5 Гс). Привлекательные возможности в плане снижения требуемых магнитных полей (и стоимости магнитов) открывает работа на гармониках гирочастоты. К сожалению, существенным недостатком канонического гиротрона при переходе к работе на высоких циклотронных гармониках является обострение проблемы конкуренции со стороны мод, работающих на более низких гармониках. В этой связи растет интерес к неканоническим вариантам гиротронов [3] и одним из привлекательных представляется многоствольный гиротрон (МСГ) [4].

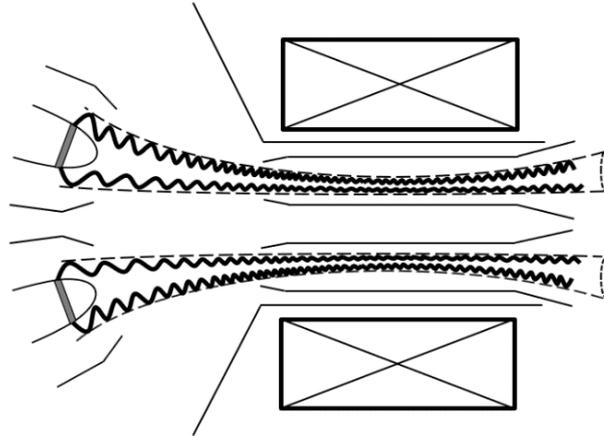


Рисунок 1. Пример схемы реализации многоствольного гиротрона с двумя стволами.

Пример схемы реализации многоствольного гиротрона с несколькими магнетронно-инжекторными пушками (МИП) показан на рисунке 1. Перспективный вариант МСГ включает систему формирования нескольких винтовых электронных пучков (ВЭП); резонаторную систему, состоящую из нескольких стволов (резонаторов), каждый из которых расположен соосно электронному пучку; и систему вывода излучения через выходное окно.

В предлагаемом варианте МСГ каждый из резонаторов работает с приосевым электронным пучком аналогично гиротрону с большой орбитой (ГБО) [5]. В разработанном устройстве предлагается использование адиабатической магнетронно-инжекторной пушки (МИП) с секционированной эмиссией, в отличие от методов формирования ВЭП, обычных для ГБО (см. рисунок 2). Магнитная система в этом случае такая же, как для обычных гиротронов, что существенно упрощает процесс её разработки и снижает стоимость. Представляется, что многоствольный гиротрон является перспективным источником терагерцового излучения для ДПЯ/ЯМР и микроволновой спектроскопии высокого разрешения и активной диагностики плазмы.

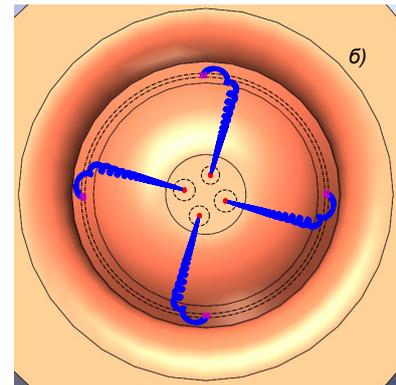
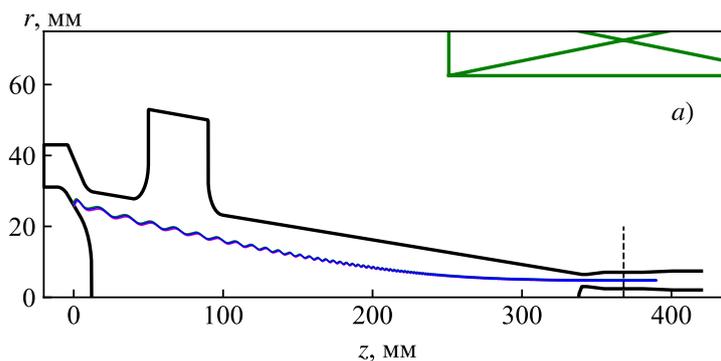


Рисунок 2. (а) Геометрия многолучевой пушки для многоствольного гиротрона на плоскости (r, z) ; (б) вид электронной пушки в координатах r, φ в цилиндрической системе координат.

2. Многоствольный гиротрон с одновременной генерацией излучения на кратных частотах

Рассмотрим, далее, каким образом может быть реализован вариант многоствольного гиротрона с одновременным или последовательным возбуждением мод на кратных друг к другу частотах, например, на частотах 263 ГГц ($n = 2$), 395 ГГц

($n = 3$) и 526 ГГц ($n = 4$), для случая работы гиротрона на высоких гармониках в одномодовом режиме (в соответствующем стволе электродинамической системы). Кроме того, схему многоствольного гиротрона можно дополнить и четвертым резонатором, оптимизированным для генерации излучения на частоте 594 ГГц. Указанные частоты, как указывалось выше являются востребованными в ДПЯ/ЯМР. Для генерации в МСГ излучения на заданных частотах выбрано ускоряющее напряжение $U_0 = 80$ кВ. В этом случае рабочие магнитные поля близки к 5,4 Тл при работе на частотах 263 ГГц, 395 ГГц, 526 ГГц и к 8,1 Тл в случае генерации излучения на частоте 594 ГГц ($n = 3$).

Выбор четырехствольной схемы прибора определен, прежде всего, возможностью использования широко распространенного криомагнита JASTEC-10T100 с диаметром проходного отверстия 100 мм и максимальным полем 10 Тл или его аналогом (в том числе заметно более доступными версиями с максимальным полем до 8 Тл). Такая многоствольная система с четырьмя резонаторами может быть использована вместо набора отдельных гиротронов с аналогичными выходными характеристиками, что позволяет снизить собственные размеры гиротронной установки, и привлекательна не только экономией на магнитных системах, но и площади в ЯМР комплексах.

3. Проектирование электронной пушки для многоствольного гиротрона

Проектирование многоствольного гиротрона терагерцового диапазона целесообразно начать с построения электронно-оптической системы (ЭОС), что позволит определить достижимые параметры винтовых пучков (ВЭП) для МСГ. Выбранная схема формирования ВЭП значительно ограничивает рабочий ток, которого может быть недостаточно для работы на высоких гармониках. Следовательно, необходима оптимизация МИП с целью получения наибольшего рабочего тока каждого парциального пучка при ограничении его поперечных размеров. Траекторный анализ многолучевой МИП выполнен с учетом аксиально-несимметричной эмиссии электронов в программе «ANGEL-TA-S3D». Двумерный аналог алгоритма описан в [6]. Конфигурация электронно-оптической системы показана на рисунке 2.

Для эффективного электронно-волнового взаимодействия требуется тонкий ВЭП с током не менее 0,15 А и питч фактором $g=1,4$, со смещением центров электронных орбит от оси соответствующего резонатора не более $0,2\lambda$. Следовательно, при работе на частоте 526 ГГц ($n = 4$) смещение центров орбит не должно превышать 0,1 мм. Для простоты исследования рассматривается прямоугольная форма сектора эмиссии. Для формирования ВЭП выбраны расположенные на одном кольцевом пояске сектора с размерами 1,3 мм \times 0,8 мм — соответственно размер в плоскости (R, Z) и размер по азимуту, при этом коэффициент заполнения составил 2%.

В гиротронах производства ИПФ РАН и НПП ГИКОМ обычно используются эмиттеры на основе LaV₆ с плотностью токоотбора до 5 А/см². В нашей системе такой уровень плотности тока не позволяет получить достаточный для гарантированной генерации рабочий ток. С другой стороны, успешно используются металлопористые катоды, плотность тока эмиссии которых может составлять более 15 А/см² [7]. При токоотборе 14,1 А/см² доступный уровень рабочего тока с учётом приемлемых размеров электронного пучка в пространстве взаимодействия составил 150 мА. Расчетные параметры электронного пучка приведены на рисунке 3 (питч-фактор g (квадраты), ток парциального пучка (звёзды), отражённый ток I_{ref} в % (круги), скоростной разброс с отсечками по уровням 10% и 90% dV_p (треугольники), полный скоростной разброс $dV_{p,max}$ (треугольники)) в зависимости от плотности эмиссии для МСГ с четырьмя пучками (заполненные маркеры) и для случая симметричной эмиссии со всего кольцевого пояска (полые маркеры) при поле 5,4 Тл.

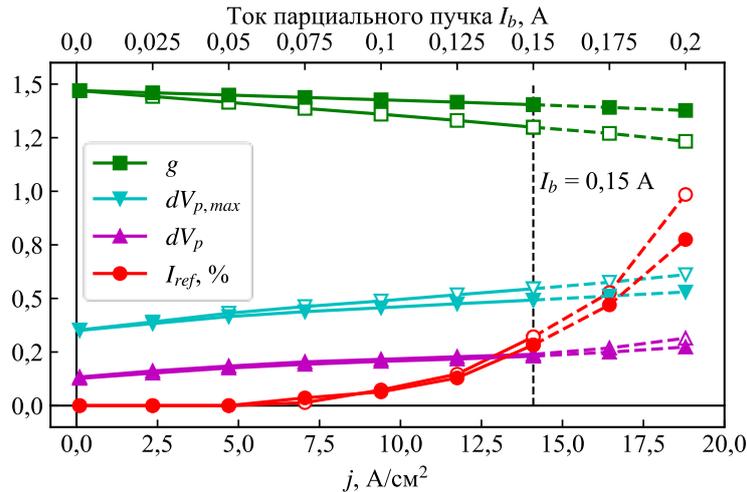


Рисунок 3. Параметры электронного пучка в зависимости от плотности эмиссии для МСГ с четырьмя пучками (заполненные маркеры) и для случая симметричной эмиссии со всего кольцевого пояса (полые маркеры).

4. Электронно-волновое взаимодействие в МСГ на высоких гармониках

Обозначим стволы электродинамической системы для работы на частотах 263 ГГц, 395 ГГц, 526 ГГц и 594 ГГц как резонаторы № 1, № 2, № 3 и № 4 соответственно. На первом этапе расчётов геометрия каждого ствола резонаторной системы оптимизировалась отдельно и по разным критериям. В случае резонатора № 3 ставилась цель достижения наибольшего КПД (возбуждение в гиротроне моды на $n = 4$, является весьма сложной задачей). В остальных случаях целью являлось наибольшая полоса непрерывной перестройки (такой подход позволяет расширить частотные возможности прибора и увеличить количество потенциальных приложений). Результаты расчета приведены на рисунке 4 (заполненные маркеры).

При одновременной генерации на частотах 263, 395 и 526 ГГц выходная мощность составила 88, 64 и 42 Вт соответственно. В режиме работы на $n = 4$ (526 ГГц) электронный КПД системы составляет 2,21% (расчётный волновой КПД равен 0,35%). Низкий электронный КПД обусловлен как слабоэффективным (мультипольным) электронно-волновым взаимодействием, так и малой добротностью рабочей моды. В рассматриваемой системе дифракционная добротность значительно больше омической добротности. Это приводит к высокой доле омических потерь, которая составляет в данном случае около 84%. Волновой КПД системы может быть увеличен при помощи повышения ускоряющего напряжения и/или среднего пичч-фактора электронного пучка. Максимальная расчётная мощность выходного излучения на частоте 594 ГГц ($n = 3$) в одночастотном режиме составила около 200 Вт.

В предложенной выше схеме МСГ помимо вывода излучения в сторону коллектора, в качестве альтернативы, рассмотрен вариант с выводом излучения в сторону электронной пушки (гиро-ЛОВ). Для анализа перспективности этого подхода выполнены расчёты для генерации излучения на частотах 263, 395 и 526 ГГц. На рисунке 4 показаны зависимости мощности выходного излучения от магнитного поля для резонаторов 1–3. Во всех случаях наибольшая мощность для gyro-ЛОВ уступает соответствующим вариантам обычного гиротрона. В случае gyro-ЛОВ с частотой 526 ГГц более эффективным становится режим работы на третьей продольной моде, хотя для обычной электродинамической системы оптимальным остается режим на первой продольной моде. Гиро-ЛОВ позволяет увеличить диапазон непрерывной перестройки на 0,08 ГГц (на 27%), увеличив средний уровень мощности излучения и

значительно уменьшив изрезанность зоны генерации (рис. 4).

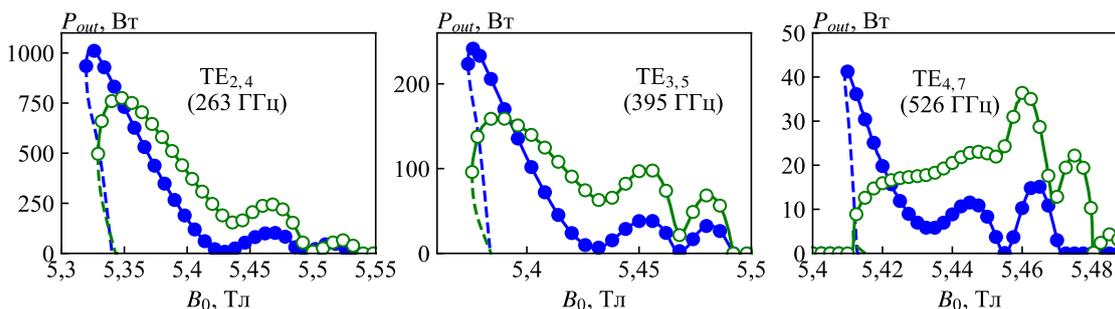


Рисунок 4. Зависимость выходной мощности от магнитного поля при выводе излучения в сторону коллектора (заполненные маркеры) и в сторону эл. пушки (полые маркеры).

5. Заключение

В МСГ терагерцового диапазона существенно ограничен ток каждого электронного пучка системы, что снижает уровень мощности выходного излучения. Тем не менее, для многих приложений требуются частотно-перестраиваемые источники излучения терагерцового диапазона с мощностью порядка 10–100 Вт и даже менее. Как показали исследования, такой уровень мощности заведомо достижим в рассматриваемых приборах. Одна МСГ установка может удовлетворить потребности целого комплекса ЯМР/ДПЯ спектрометров с разными частотами.

Очевидным преимуществом МСГ по сравнению с набором отдельных гиротронов является использование одной магнитной системы, что уменьшает стоимость гиротронной установки и упрощает её. Предложенная схема объединяет преимущества как канонического гиротрона (формирование ВЭП), так и ГБО (эффективная селекция мод). Многоствольные гиротроны перспективны для увеличения диапазона перестройки частоты и для продвижения в терагерцовый диапазон (работа на высоких циклотронных гармониках), а также могут быть использованы для одновременной генерации на кратных частотах или последовательной в широком интервале частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ИПФ РАН № FFUF-2021-0001.

Список литературы

1. Rosay M., et al. Solid-state dynamic nuclear polarization at 263 GHz: spectrometer design and experimental results //Phys Chem Chem Phys. – 2010. – Т. 12. – С. 5850–5860.
2. Blank M., Felch K. L. Millimeter-wave sources for DNP-NMR //eMagRes. – 2018. – Т. 7. – №. 4 – С. 152–166.
3. Запевалов В. Е. Неканонические гиротроны //Известия вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61. – №. 4. – С. 305-314.
4. Запевалов В. Е., Зуев А. С. Многоствольный гиротрон. – Россия. – Патент 2755826. – 22.09.2021. – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук" (ИПФ РАН) (RU)
5. Братман, В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н. Субтерагерцовые и терагерцовые гиротроны с большой орбитой //Известия вузов. Радиофизика – 2009. – Т. 52. – №. 7. – С. 525–535.
6. Семенов Е. С., Планкин О. П., Розенталь Р. М. Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии //Известия вузов. ПНД. – 2015. – Т. 23. – №. 3. – С. 94-105.
7. Дюбуа Б. Ч, Королев А. Н. Современные эффективные катоды //Электровакуумные приборы. 2011. – №. 1 (508). – С. 5–24.