

Многолучевой терагерцовый гиротрон на второй гармонике для ЯМР/ДПЯ спектроскопии

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

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация. В работе исследуется перспективность многолучевой схемы в терагерцовом гиротроне на второй гармонике гирочастоты. Для примера рассматривается разрабатываемый в ИПФ РАН гиротрон с рабочей частотой 780 ГГц. Дополнительный электронный пучок в систему вводится с целью повысить мощность выходного излучения с учетом ограничений, вызванных конкуренцией со стороны паразитных мод, взаимодействующих с пучком на основном циклотронном резонансе.

Ключевые слова: ЯМР, ДПЯ, спектроскопия, гиротрон, высокая циклотронная гармоника, терагерцовое излучение, электронные пучки

1. Введение

Одним из направлений развития гиротронов является увеличение частоты излучения вплоть до 1 ТГц и выше [1]. Такие непрерывные источники излучения с мощностью десятки ватт востребованы в спектроскопических, биологических, медицинских и других приложениях [2]. В гиротронах терагерцового диапазона используются специальные магнитные системы со сверхпроводящим соленоидом, охлаждаемым жидким гелием. В настоящее время коммерчески доступны такие магнитные системы с полем до 15 Тл, что ограничивает частоту выходного излучения гиротрона до 400 ГГц при работе на первой гармонике гирочастоты или до 800 ГГц в случае второй циклотронной гармонике. Переход к работе на высокой гармонике гирочастоты сопровождается усугублением проблемы конкуренции мод. Для решения этой проблемы используются дополнительные методы селекции, перспективным из которых является введение одного или нескольких дополнительных электронных пучков. Дополнительный электронный пучок может выполнять роль поглотителя, подавляя паразитные колебания в резонаторе гиротрона, или быть излучающим (активным), эффективно взаимодействующим с рабочей модой.

Впервые многолучевые гиротроны были предложены ещё в 80-е годы [3], и в настоящее время прослеживается рост интереса к ним [4, 5]. Проект многолучевого гиротрона развивается как вариант модификации электронно-оптической подсистемы разрабатываемого в ИПФ РАН однолучевого гиротрона с рабочей частотой 780 ГГц. Такой источник излучения востребован в ЯМР-спектроскопии для динамической поляризации ядер. Гиротрон оптимизируется для работы на моде цилиндрического волновода $TE_{10,7}$ на второй гармонике гирочастоты с криомагнитом JMTD-15T52 с полем до 15 Тл.

2. Выбор оптимальных радиусов электронных пучков в резонаторе

Структурный фактор, характеризующий связь электронного пучка с рабочей модой в резонаторе, определяется соотношением:

$$G_{m,p,n} = \frac{J_{m-n}^2 \left(v_{m,p} \cdot \frac{R_{1,2}}{R_c} \right)}{(v_{m,p}^2 - m^2) \cdot J_m^2(v_{m,p})} \quad (1)$$

Здесь m, p – азимутальный и радиальный индексы поперечной моды, n — номер гармоники гирочастоты, R_1, R_2 — радиусы внутреннего и внешнего электронных пучков в пространстве взаимодействия, R_c — радиус регулярного участка резонатора; $\nu_{m,p}$ — p -ый корень производной функции Бесселя J_m .

Поперечная структура рабочей моды в резонаторе определяет радиусы электронных пучков, предпочтительные для эффективного электронно-волнового взаимодействия. В частности, для двухлучевого гиротрона с частотой излучения 780 ГГц в случае поперечной моды $TE_{10,7}$ оптимальные радиусы пучков в пространстве взаимодействия составили 0,59 мм и 0,86 мм, что соответствуют первому и второму максимумам структурного фактора.

При оптимизации параметров гиротрона необходимо учитывать проблему конкуренции мод. На рисунке 1 приведены структурные факторы в зависимости от радиуса пучка для рабочей моды и основных конкурентных мод. В случае внутреннего пучка сильным конкурентом является мода $TE_{-2,5}$ на основном циклотронном резонансе, отстоящая от рабочей моды по критической частоте, деленной на номер гармоники, на $-3,4\%$. В случае внешнего пучка со средним радиусом 0,86 мм сильную связь с электронным пучком имеет паразитная мода $TE_{7,3}$, также взаимодействующая с пучком на первой циклотронной гармонике, отстоящая спектрально на $-2,3\%$. Основываясь на анализе спектра мод оптимальный ток внутреннего пучка должен быть почти вдвое больше, чем ток внешнего пучка.

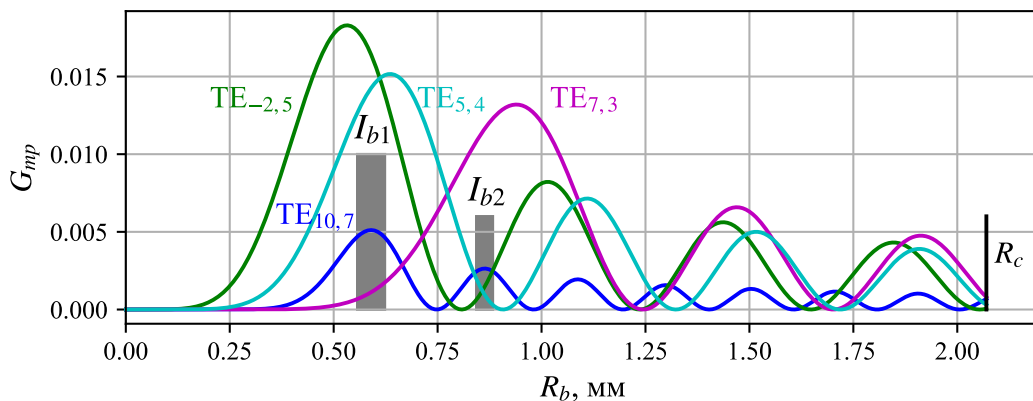


Рисунок 1. Структурный фактор рабочей моды и основных конкурентов в зависимости от радиуса пучка. Серыми прямоугольниками обозначены электронные пучки

3. Моделирование электронно-оптической системы

Для выбранных радиусов R_1, R_2 внутреннего и внешнего электронных пучков оптимизирована электронно-оптическая система (ЭОС). Общий вид конфигурации электронно-оптической системы представлен на рисунке 2. Конфигурация катодного узла оптимизировалась для формирования электронных пучков со средним питч-фактором 1,4. Форма катода выбрана в виде простого конуса с двумя эмиттерными поясками разного радиуса. Анод выбран в форме простого цилиндра с радиусом 19 мм с целью снизить влияние возможных смещений катода вдоль центральной оси, вызванных, например, тепловым смещением катодного узла.

Внутренний пучок играет ключевую роль, поэтому катод был размещен в оптимальном для него положении. Радиус центра первого эмиттера составил 4,3 мм. Угол наклона эмиттера к оси выбран небольшим, чтобы уменьшить радиальный разброс пучка в резонаторе, и составил 28 градусов. Угол образующей второго эмиттера был увеличен до 37 градусов с целью снизить средний питч-фактор до выбранного значения 1,4. Радиус второго эмиттера составил 6,35 мм. Ширина первого эмиттера составила 1 мм, а второго — 0,4 мм, в этом случае ток внутреннего пучка в

1,7 раза превышает ток внешнего. Основные параметры двухлучевой ЭОС представлены в таблице 1. Моделирование выполнено при ускоряющем напряжении 24 кВ и анодном напряжении 21,6 кВ. Как показали результаты траекторного анализа, выполненные при помощи пакета программ ANGEL [6], выбранная конфигурация ЭОС позволяет работать с суммарным током до 2 А.

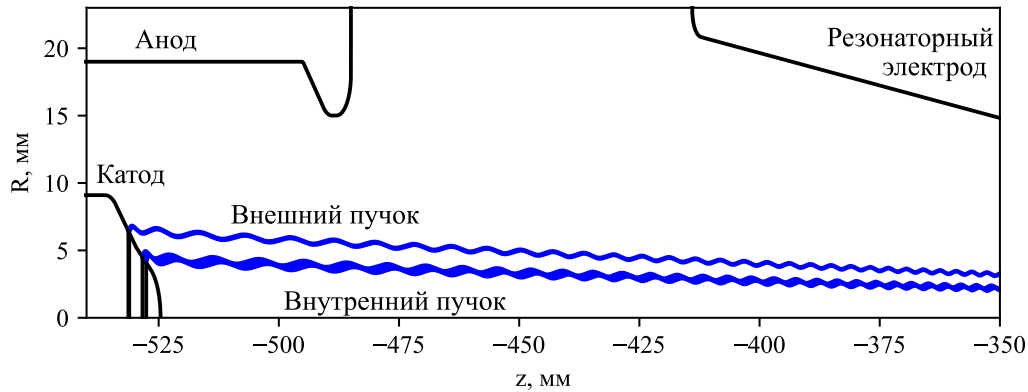


Рисунок 2. Конфигурация двухлучевой ЭОС

Таблица 1. Основные параметры двухлучевой ЭОС

| | Внутренний пучок | Внешний пучок |
|--|------------------|---------------|
| Радиус встрела, мм | 0,59 | 0,86 |
| Центральный радиус эмиттера, мм | 4,3 | 6,35 |
| Расстояние от эмиттера до центра магнита, мм | 528 | 531,1 |
| Угол наклона образующей эмиттера, градусы | 28 | 37 |
| Ширина эмиттера, мм | 1 | 0,4 |
| Средний пич-фактор при суммарном токе $I_{\Sigma} = 0,4$ А | 1,42 | 1,41 |
| Разброс осцилляторных скоростей при суммарном токе $I_{\Sigma} = 0,4$ А, % | 17,4 | 15,1 |

4. Моделирование электронно-волнового взаимодействия

При моделировании электронно-волнового взаимодействия использовались токи 0,25 А для внутреннего пучка и 0,15 А для внешнего. Моделирование выполнено при помощи разработанного в ИПФ РАН комплекса программ ANGEL [7]. На рисунке 3 представлены полученные зависимости для вариантов ЭОС с одним (внутренним) пучком и ЭОС с двумя пучками при пич-факторе 1,3 и скоростном разбросе осцилляторных скоростей 30%. При добавлении второго электронного пучка возникает зона генерации паразитной моды $TE_{7,3}$ на первой гармонике гирочастоты. Она расположена в области меньших магнитных полей относительно зоны генерации моды $TE_{10,7}$. При этом в области параметров, соответствующих режиму работы на моде $TE_{10,7}$ при суммарном токе $I_{\Sigma} = 0,4$ А, проблема конкуренции мод не усугубляется.

В результате введения второго излучающего пучка расчётная мощность выходного излучения при работе на моде $TE_{10,7}$ на частоте 780 ГГц увеличивается практически вдвое: с 140 Вт до 270 Вт, а волновой КПД гиротрона увеличивается с 2,3% до 2,8%.

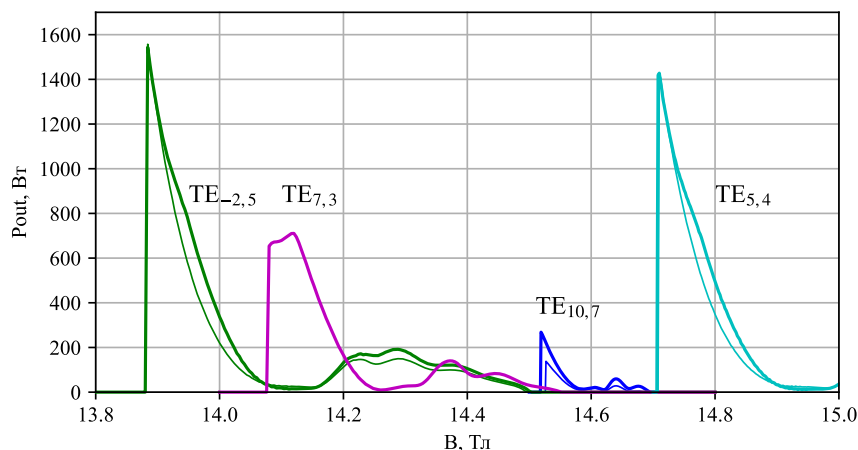


Рисунок 3. Мощность выходного излучения в зависимости от магнитного поля для основной моды $TE_{10,7}$ и паразитных мод $TE_{-2,5}$, $TE_{7,3}$, $TE_{5,4}$ при одном (внутреннем) пучке (тонкие линии) и двух пучках (жирные линии).

6. Заключение

Представлен проект двухлучевого гиротрона с частотой излучения 780 ГГц. Введение второго излучающего электронного пучка позволяет значительно, практически в два раза, поднять мощность выходного излучения, при этом проблема конкуренции мод не усугубляется. Недостатком такого подхода является усложнение конструкции электронно-оптической системы по сравнению с вариантом ЭОС с одним электронным пучком. Но, с другой стороны, упрощается коллекторная подсистема гиротрона.

Работа выполнена в рамках проекта ИФ РАН FFUF-2022-0007.

Список литературы

1. Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y. Russian gyrotrons: Achievements and trends. // IEEE Journal of Microwaves. – 2021. – V. 1. – No. 1. – P. 260-268.
2. Глявин М. Ю. и др. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред. // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186. – №. 6. – С. 667-677.
3. Запевалов В.Е., Цимринг Ш.Е. Многолучевые гиротроны. // Известия вузов. Радиофизика. — 1990. — Т. 33, № 11. — С. 1288–1295.
4. Idehara T., Glyavin M. et al. A Novel THz-Band Double-Beam Gyrotron for High-Field DNP-NMR Spectroscopy // Review of Scientific Instruments. — 2017. — V. 88. P. 094708.
5. Chen X. et al. A 1.2 THz third-harmonic gyrotron with novel azimuthally segmented electron beam // Physics of Plasmas. – 2025. – Vol. 32. – №. 4.
6. Планкин О. П., Семенов Е. С. Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона. // Вестник НГУ, серия «Физика». – 2013. – Т. 8. – №. 2. – С. 44-54.
7. Семёнов Е. С. и др. Анализ режимов генерации в технологическом гиротроне с магнитоэкранированной системой в среде ANGEL // Изв. вузов. Радиофизика. – 2023. – Т. 66. – №. 7-8. – С. 645-663.