

Многоствольный гиротрон для ДПЯ/ЯМР спектроскопии высокого разрешения

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

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в работе рассмотрен перспективный вариант многоствольного гиротрона, предназначенный для ДПЯ/ЯМР спектроскопии. Обсуждается возможность одновременной генерации нескольких частот, востребованных для ДПЯ, при использовании резонанса на разных циклотронных гармониках в разных стволах гиротрона.

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

1. Введение

Для динамической поляризации ядер (ДПЯ) широко используемой для повышения чувствительности спектрометров ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектрометров) необходимы источники субтерагерцового и терагерцового диапазонов с мощностью непрерывного излучения до нескольких десятков ватт. Одним из наиболее востребованных для этой цели из всех приборов высокочастотной вакуумной электроники больших мощностей является гиротрон [1, 2]. Комплекс на основе данного прибора является достаточно дорогостоящим, в том числе из-за необходимости использования криомагнитной системы. Одним из важнейших направлений развития гиротронов на сегодняшний день является повышение частоты излучения. Для терагерцовых гиротронов стоимость магнитной системы может составлять до половины от стоимости всего гиротронного комплекса и растет с повышением требуемого магнитного поля.

Переход на высокие гармоники при работе с тем же уровнем магнитного поля позволяет повысить частоту излучения в n раз (n – номер гармоники циклотронного резонанса). Наиболее существенным недостатком канонического гиротрона при работе на высоких циклотронных гармониках в терагерцовом диапазоне является обострение проблемы конкуренции со стороны мод, работающих на более низких гармониках. В настоящее время, в связи с ростом потенциальных приложений и требований к современным гиротронам всё больший интерес представляют неканонические варианты таких приборов [3], в частности, многоствольные гиротроны (МСГ), специфика которых благоприятна для работы на высоких гармониках гирочастоты [4].

2. Простейшая схема многоствольного гиротрона

Одна из простых разновидностей многоствольного гиротрона представляет собой прибор с несколькими резонаторами, расположенными параллельно друг другу в едином корпусе большого диаметра [4] (см. рис.1). При этом каждый из резонаторов имеет свой приосевой винтовой электронный пучок, т. е. фактически работает в режиме подобном гиротрону с большой орбитой (ГБО) [5]. Существенно, что магнитная система в случае МСГ не отличается от магнитных систем обычных гиротронов. В таком многоствольном гиротроне в качестве системы формирования винтовых электронных пучков может быть использована магнетронно-инжекторная

пушка с секционированной эмиссией. В частности, в работе рассматривается случай равномерного по азимутальному углу расположения секторов эмиссии на одном кольцевом пояске.

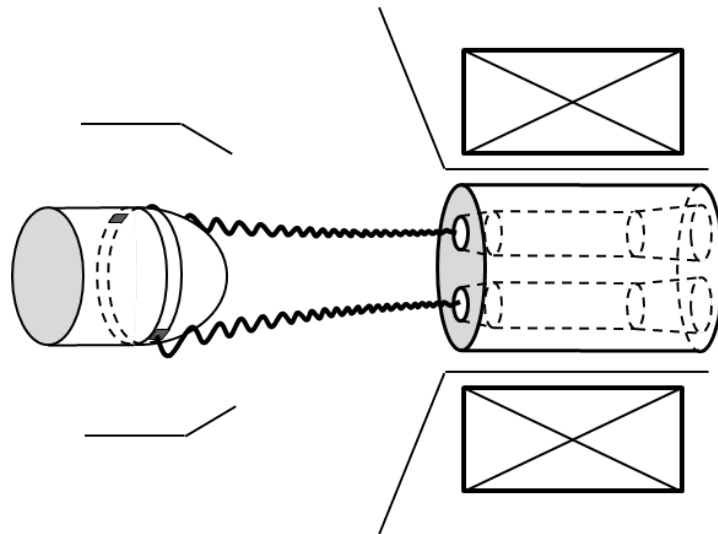


Рисунок 1. Схема многоствольного гиротрона

В таких многоствольных гиротронах важную роль играет азимутальный дрейф электронного пучка, вызванный движением электронов под действием скрещенных полей. Для исследования данного эффекта рассмотрены несколько гиротронов, работающих в разных частотных диапазонах и с разной энергией электронного пучка [6]. Выяснено, что прослеживается явная тенденция уменьшения величины азимутального дрейфа электронного пучка по мере роста рабочего магнитного поля, т.е. и частоты генерации. Это обстоятельство облегчает построение многоствольных систем в терагерцовом диапазоне. С другой стороны, схема МСГ позволяет использовать преимущества гиротронов с большой орбитой, что делает перспективной реализацию многоствольного гиротрона для работы на высоких циклотронных гармониках.

3. Многоствольный гиротрон с одновременной многочастотной генерацией

Рассмотренная схема многоствольного гиротрона может быть использована для построения прибора с одновременным или последовательным излучением на кратных друг к другу частотах, необходимых для ДПЯ. В частности, реализуем многоствольный гиротрон с одновременным излучением на частотах 263 ГГц ($n=2$), 394,5 ГГц ($n=3$) и 526 ГГц ($n=4$), в случае его работы на второй, третьей и четвертой гармониках гирочастоты в соответствующем стволе электродинамической системы. Указанные частоты являются востребованными в ДПЯ/ЯМР спектроскопии высокого разрешения [7].

В качестве рабочих мод выбраны моды $TE_{2,4}$, $TE_{3,5}$ и $TE_{4,7}$ для работы гиротрона на второй, третьей и четвертой циклотронных гармониках соответственно. Численное моделирование электронно-волнового взаимодействия выполнено при ускоряющем напряжении 80 кВ, силе тока электронного пучка 150 мА и среднем пич-факторе (отношение поперечной и продольной скоростей в пространстве взаимодействия) 1,2. Расчётная мощность выходного излучения в режиме работы с одновременной многочастотной генерации превысила 20 Вт для всех указанных частот (см. табл. 1). Магнитное поле оптимизировалось для достижения наибольшего выходного КПД при работе на четвертой циклотронной гармонике, при этом моды $TE_{2,4}$ и $TE_{3,5}$ работали не в оптимальном по магнитному полю режиме (см. рис. 2).

Работы с разнопотенциальными (изолированными) пучками и использование магнетронно-инжекторных пушек с отдельным подогревом каждого сектора эмиссии является перспективным для повышения эффективности работы каждого отдельного ствола. Такой подход позволит осуществить независимую генерацию излучения на указанных частотах. Задание разных анодных и ускоряющих напряжений для формирования каждого парциального электронного пучка позволяет дополнительно управлять их параметрами. В этом случае положение каждого пучка в пространстве взаимодействия может быть дополнительно скорректировано, а эффективность взаимодействия значительно увеличена. Так, для работы на второй циклотронной гармонике на частоте 263 ГГц, выходная мощность может быть увеличена более чем в 10 раз до 800 Вт при изменении ускоряющего напряжения с 80 до 90 кВ. При этом азимутальный дрейф пучка практически не изменится, а питч-фактор увеличится с 1,2 до 1,4, что не является критичным.

Таблица 1. Расчётные параметры многоствольного гиротрона для ДПЯ/ЯМР спектроскопии.

	Рабочая мода	Номер гармоники	Магнитное поле, Тл	Частота генерации, ГГц	Выходная мощность, Вт
Резонатор №1	$TE_{2,4}$	2	5,41	263,0	54
Резонатор №2	$TE_{3,5}$	3	5,41	394,5	30
Резонатор №3	$TE_{4,7}$	4	5,41	526,0	20

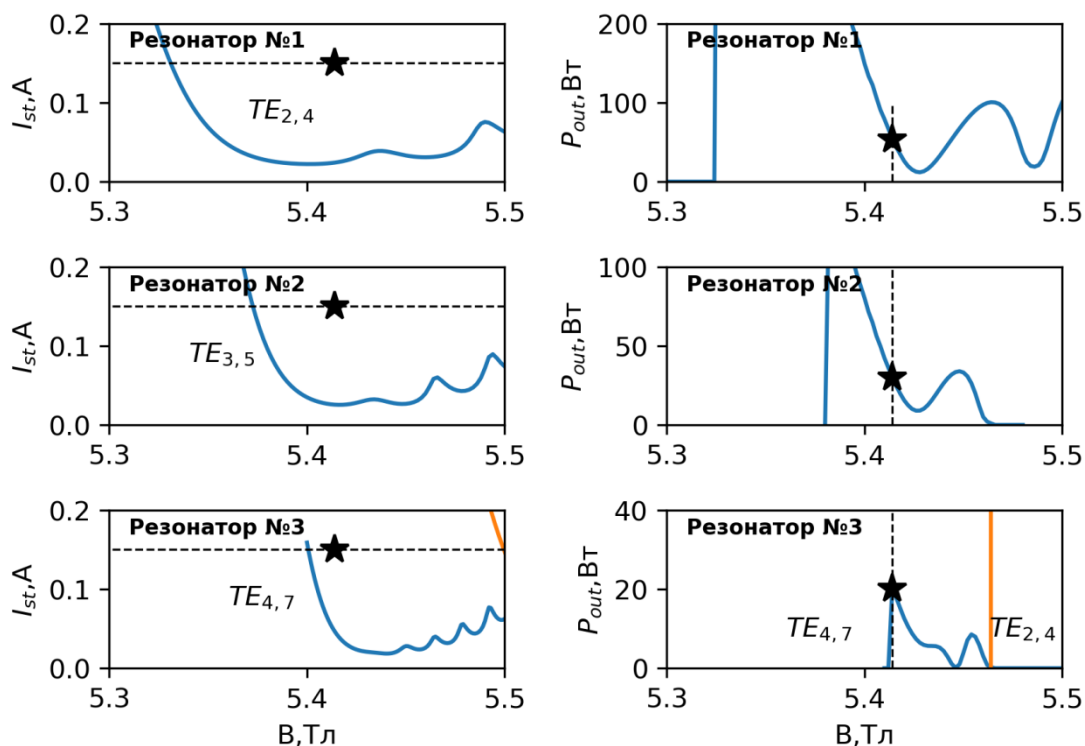


Рисунок 2. Зависимости стартового тока и мощности выходного излучения от магнитного поля. Звездой указан режим одновременной многочастотной генерации на кратных друг к другу частотах.

Для каждого резонатора многоствольной системы рассматривается прямая система вывода излучения и выходное окно из нитрида бора. Использование выходного окна с некоторым отражением на рабочей частоте позволит дополнительно увеличить мощность выходного излучения. В частности, при работе на четвёртой

циклотронной гармонике при введении в систему отражения 40% по мощности выходная мощность может быть увеличена почти вдвое до 35 ватт.

4. Заключение

Многоствольные гиротроны являются перспективными приборами вакуумной электроники для продвижения в терагерцовый диапазон. Многократное уменьшение стоимости прибора за счёт использования одной магнитной системы при возможности последовательной или одновременной генерации на разных частотах выгодно отличает данный прибор по сравнению с другими разновидностями гиротронов. Схема многоствольного гиротрона проста в реализации и включает в себя преимущества как канонического гиротрона (система формирования винтовых электронных пучков), так и ГБО (эффективная селекция мод, синхронных с высокими гармониками гирочастоты). Возможные трудности реализации данного прибора компенсируются его уникальными характеристиками.

Работа выполнена при поддержке **Российского научного фонда (проект № 19-79-30071)**.

Список литературы

1. Гольденберг А.Л. и др. Мазеры на циклотронном резонансе: состояние и проблемы // Известия вузов. Радиофизика. – 1996. – Т. 39. – № 6. – С. 635-669.
2. Глявин М.Ю. и др. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред // Успехи физ. наук. – 2016. – Т. 186. – № 6. – С. 667-677.
3. Запевалов В.Е. Неканонические гиротроны // Известия вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61. – № 4. – С. 305-314.
4. Запевалов В.Е. и др. Многоствольные гиротроны // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – № 2. – С. 105-114.
5. Братман В.Л. и др. Субтерагерцовые и терагерцовые гиротроны с большой орбитой // Известия вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52. – № 7. – С. 525-535.
6. Запевалов В.Е. и др. Проектирование электронно-оптической системы многоствольного гиротрона // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – № 8. – С. 703-713.
7. Blank M., Felch K.L. Millimeter-wave sources for DNP-NMR // eMagRes. – 2018. – V. 7. - № 4. – P. 155-165.