

Оценка перспектив широкополосной перестройки частоты в гиротронах на гармониках

А.С. Зуев, А.П. Фокин, Е.С. Семенов

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в работе представлены теоретические оценки возможностей широкополосной перестройки частоты в гиротронах малой мощности, работающих на гармониках циклотронной частоты. В качестве основного объекта исследований рассматривается гиротрон, работающий на второй циклотронной гармонике, на частоте до 527 ГГц с мощностью выходного излучения до 250 Вт.

Ключевые слова: гиротрон, микроволновое излучение, терагерцовое излучение, электронная пушка, перестройка частоты, гармоники циклотронной частоты

1. Введение

Гиротроны малой мощности (от единиц до нескольких сотен ватт) находят свое применение в задачах спектроскопии, диагностики различных сред, терагерцового видения [1,2]. При этом дальнейшее их развитие зачастую направлено не на повышение мощности выходного излучения, а на увеличение стабильности и расширение диапазона перестройки частоты. При этом существенного расширения полосы перестройки можно добиться при возбуждении мод на различных гармониках циклотронной частоты. Так, в [3] описан гиротрон с полосой перестройки 150-600 ГГц, при этом рассматривались моды, синхронные с первой или второй циклотронной гармоникой. Измеренная в эксперименте выходная мощность составила менее ватта для высокочастотных мод при токе электронного пучка 75 мА и ускоряющем напряжении 10 кВ.

В данной работе рассматриваются перспективы такого метода расширения диапазона перестройки частоты на примере разработанного в ИПФ РАН гиротрона, работающего на второй гармонике с рабочей частотой 527 ГГц [4]. Рассмотрены ограничения, налагаемые конструкцией и параметрами магнетронно-инжекторной пушки и представлены результаты численного моделирования процессов электронно-волнового взаимодействия.

2. Выбор рабочих мод

Гиротрон, параметры которого использованы для теоретических оценок, разработан для работы с криомагнитом Jastec JMTD 10T100 с максимальным магнитным полем 10 Тл и проходным отверстием 100 мм. Система формирования электронного пучка представляет собой триодную магнетронно-инжекторную пушку. Радиус пучка в резонаторе составляет $R_b = 0.87$ мм, питч-фактор (соотношение вращательной и поступательной скоростей электрона) – $g = 1.3$. Эмиттер установлен на расстоянии 374 мм от центра криомагнита, что соответствует магнитному полю 0,297 Тл. Резонатор гиротрона имеет радиус 1,988 мм и длину однородного участка 20 мм, оптимизированную для эффективного возбуждения моды $TE_{6,5}$ на второй гармонике гирочастоты. Данный гиротрон работает с ускоряющим напряжением $U_0 = 15$ кВ и силой тока электронного пучка I_0 до 600 мА.

По аналогии с процедурой выбора рабочих мод для дискретной перестройки частоты в мощном гиротроне на первой гармонике [5, 6], необходимо сначала

определить собственные частоты и оптимальные радиусы ведущих центров электронного пучка для мод на первой и второй гармониках циклотронной частоты. Далее последовательно накладываются ограничения, связанные с электронной оптикой. Так, на рисунке 1 приведены собственные частоты и оптимальные радиусы ведущих центров, а также штрих-пунктирными линиями ограничены возможные радиусы пучка при использовании дополнительной катодной катушки с максимальным полем 0,06 Тл.

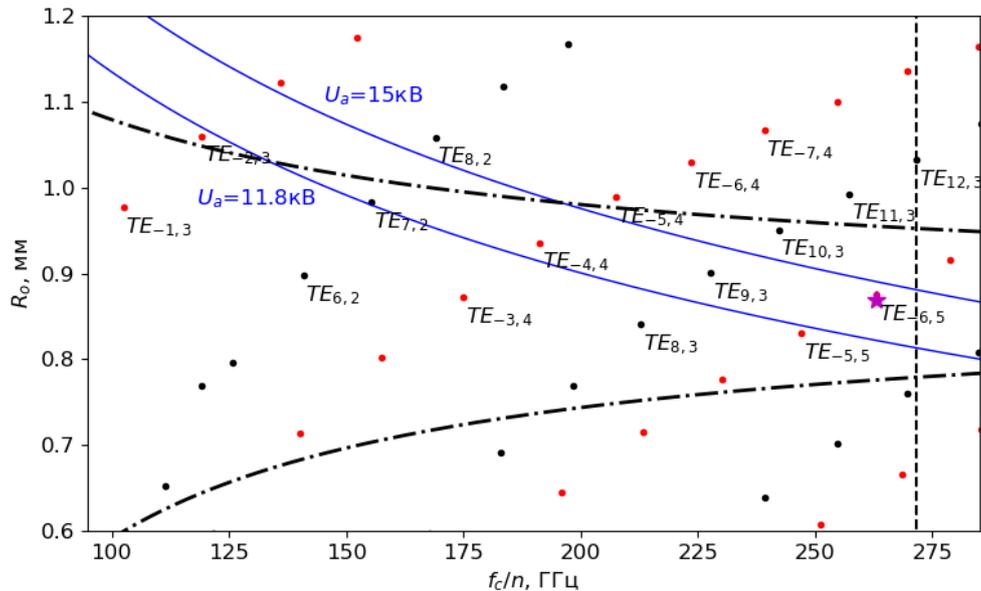


Рисунок 1. Собственные частоты и оптимальные радиусы электронного пучка. Моды, направление азимутального вращения которых совпадает с вращением электронов, отмечены черным цветом, моды с противоположным вращением – красным. Штрих-пунктирные линии ограничивают возможности коррекции радиуса пучка при помощи дополнительной катушки с полем до 0,06 Тл.

Триодная конструкция электронной пушки позволяет дополнительно управлять параметрами пучка при помощи анодного напряжения. На рисунке 1 сплошными синими линиями (получены в рамках адиабатической модели [7]) ограничена область работы гиротрона с анодным напряжением от 11,8 до 15 кВ при постоянном значении питч-фактора. По мере уменьшения анодного напряжения растёт влияние пространственного заряда, который снижает качество электронного пучка и приводит к росту отраженного тока. Согласно траекторному анализу типичных магнетронно-инжекторных пушек, используемых в гиротронах, влияние пространственного заряда на формирование электронного пучка является существенным при параметре t_j (отношение тока пучка к току Чайлда-Ленгмюра) равном 0,2, которому соответствует анодное напряжение в размере 11,8 кВ.

Далее, после отсева рабочих мод исходя из возможностей формирования пучка, рассчитываются стартовые токи в рамках самосогласованной модели с нефиксированной продольной структурой поля [8]. На рисунке 2 приведены зависимости стартовых токов от магнитного поля для мод на первой (зеленые линии) и второй (синие линии) гармониках.

Так как стартовые токи мод на первой гармонике существенно ниже стартовых токов мод на второй гармонике, то для эффективного возбуждения высокочастотных мод требуется применение дополнительных методов селекции колебаний. Более того, необходимость сохранения возможности работы с высоким КПД на первой гармонике обуславливает нежелательность применения электродинамических методов селекции, так как их сложно или невозможно включать и выключать в процессе работы прибора.

Таким образом, для селекции высокочастотных колебаний представляется перспективным использование методов электронной селекции, например, дополнительных излучающих или поглощающих пучков.

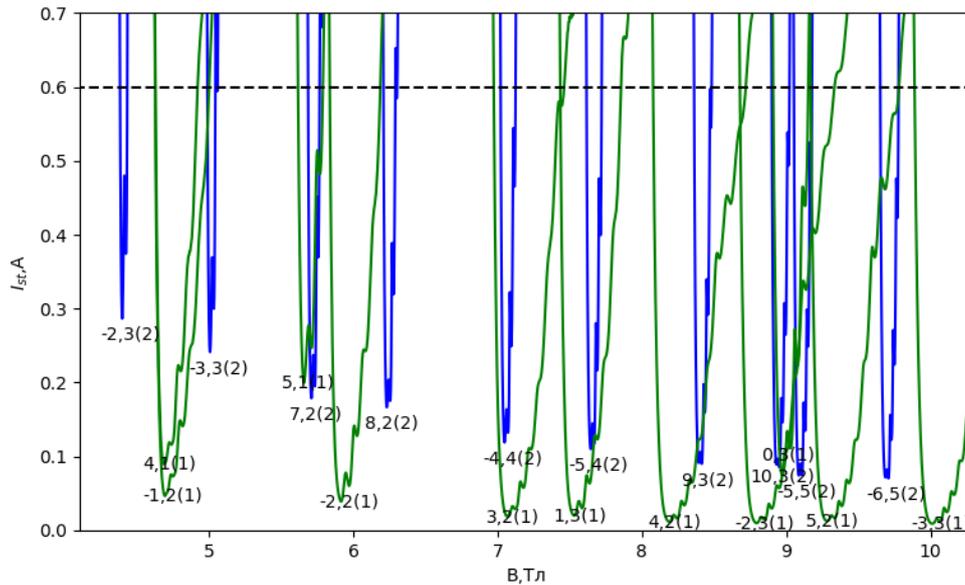


Рисунок 2. Стартовые токи мод на первой (зеленые линии) и второй (синие линии) гармониках циклотронной частоты.

3. Заключение

В работе представлены оценки возможности широкополосной перестройки частоты в гиротронах за счет возбуждения мод на первой и второй гармониках циклотронной частоты. На основе гиротрона на второй гармонике с рабочей частотой 527 ГГц рассмотрены ограничения на рабочие моды, связанные с электронно-оптической системой, и выполнено моделирование стартовых токов.

Работа поддержана грантом Президента РФ (номер гранта МК-3413.2021.1.2).

Список литературы

1. Idehara T. et al. The Gyrotrons as Promising Radiation Sources for THz Sensing and Imaging // Appl. Sci. MDPI AG, 2020. Vol. 10, № 3. P. 980.
2. Rosay M., Blank M., Engelke F. Instrumentation for solid-state dynamic nuclear polarization with magic angle spinning NMR // J. Magn. Reson. Elsevier Inc., 2016. Vol. 264. P. 88–98.
3. Hong K.D., Brand G.F., Idehara T. A 150–600 GHz step-tunable gyrotron // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74, № 8. P. 5250–5258.
4. Glyavin M.Y. et al. A 250-Watts, 0.5-THz Continuous-Wave Second-Harmonic Gyrotron // IEEE Electron Device Lett. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. Vol. 42, № 11. P. 1666–1669.
5. Зуев А.С., Запечалов В.Е., Планкин О.П., Семенов Е.С. Оптимизация перестраиваемого в широком диапазоне частот субтерагерцового гиротрона высокой мощности при ограничениях, налагаемых магнитной системой // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 4. С. 309–318.
6. Zuev A.S. et al. Realization of an Octave Frequency Step-Tuning of Sub-terahertz Gyrotron for Advanced Fusion Research // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. Springer, 2021. Vol. 42, № 11–12. P. 1131–1141.
7. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород, : ИПФ РАН, 2012. 576 p.
8. Запечалов В.Е., Зуев А.С., Паршин В.В., Семенов Е.С., Серов Е.А. Снижение омических потерь в резонаторах терагерцовых гиротронов малой мощности // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 4. С. 265–275.