

Анализ возможности широкополосной перестройки частоты в мощном субтерагерцовом гиротроне

А.С. Зуев, А.П. Фокин, В.Е. Запевалов

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в работе рассматривается возможность дискретной перестройки частоты в созданном в ИПФ РАН гиротроне, работающем на частоте 250 ГГц с мощностью выходного излучения до 330 кВт. Описаны основные подходы, используемые для реализации дискретной перестройки в гиротроне. Рассматривается перспективность использования корректирующих катодных катушек для увеличения диапазона дискретной перестройки частоты.

Ключевые слова: гиротрон, микроволновое излучение, терагерцовое излучение, перестройка частоты, винтовой электронный пучок, магнетронно-инжекторная пушка, широкополосное окно.

1. Введение

Для ряда приложений требуются мощные частотно-перестраиваемые источники в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах [1]. Для этих целей может быть использован наиболее мощный и эффективный прибор вакуумной микроволновой электроники – гиротрон [2]. Как известно, в гиротроне возможна как дискретная, так непрерывная перестройка частоты. Непрерывная перестройка может быть реализована при помощи последовательного возбуждения серии мод с одинаковыми поперечными индексами (гиротрон работает на одной из собственных магнитных мод $TE_{m,p}$ круглого волновода вблизи границы его полосы пропускания), но с различными продольными индексами. При этом перестройка частоты осуществляется посредством изменения ведущего магнитного поля, управления потенциалами электронно-оптической системы (ускоряющего напряжения, потенциала модулирующего анода) или при помощи изменения температурного режима резонатора гиротрона. Однако, диапазон такой перестройки весьма ограничен. Как правило, полоса непрерывной перестройки в гиротроне не превышает нескольких процентов от средней рабочей частоты, что сужает круг возможных приложений.

Вместе с тем, в гиротроне возможна работа на соседних поперечных модах, последовательное возбуждение которых позволяет значительно расширить диапазон дискретной перестройки частоты [3]. Это особенно актуально в случае работы гиротрона со сверхразмерным резонатором с высокими поперечными индексами рабочих мод. В этом случае резонатор гиротрона имеет плотный спектр квазикритических мод, что позволяет лучше освоить рабочий диапазон частот за счёт возбуждения большего числа мод. Последовательное возбуждение целой серии мод с разными поперечными индексами в гиротроне неоднократно наблюдалось ранее (см. например, [4–6]).

В данной работе рассматривается реализуемость дискретной перестройки частоты в имеющемся в ИПФ РАН гиротронном комплексе с частотой генерации 250 ГГц и мощностью выходного излучения до 330 кВт [7], предназначенном для нагрева плазмы и исследования томсоновского рассеяния в установках управляемого термоядерного синтеза.

2. Выбор мод резонатора

Рассматриваемый гиротрон работает на моде $TE_{19,8}$ с ускоряющим напряжением 55 кВ и рабочим током пучка до 12,5 А. С целью анализа возможности широкополосной дискретной перестройки рассматривались моды как с попутным (вращение моды волновода совпадает с направлением вращения электронов в магнитном поле), так и с обратным вращением. Собственные частоты f и оптимальные радиусы ведущих центров электронных орбит R_0 для базовой моды $TE_{19,8}$ и для соседних мод приведены на рисунке 1. Положение электронного пучка в пространстве взаимодействия с целью эффективного возбуждения соседних мод может быть изменено при помощи дополнительной корректирующей катушки, расположенной вблизи катода. На рисунке звездой указан режим работы гиротрона на моде $TE_{19,8}$ без учета магнитного поля корректирующей катушки, штрих-пунктирными кривыми показаны границы области использования корректирующих катушек с магнитным полем в области эмиттера 0,03 Тл и 0,06 Тл со-направленным или встречным основному магнитному полю.

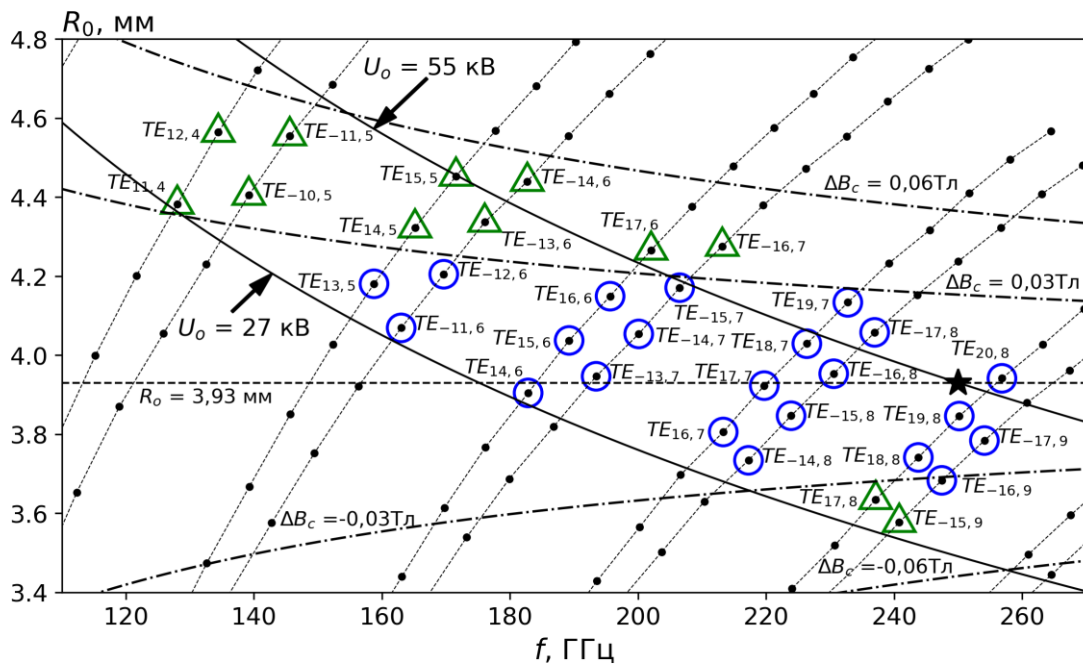


Рисунок 1. Собственные частоты и оптимальные радиусы ведущих центров электронных орбит рабочих мод. Звездой указан номинальный режим моды $TE_{19,8}$ без корректирующей катушки. Кругами отмечены выбранные моды, для возбуждения которых достаточно использование катушки с магнитного поля до 0,03 Тл, треугольниками – моды, для возбуждения которых требуется использование корректирующей катушки с полем до 0,06 Тл.

Изменение положения пучка в рабочем пространстве при помощи дополнительной катодной катушки меняет отношение электрического и магнитного полей E/V вблизи катода, что, разумеется, влияет на питч-фактор электронного пучка ($g = v_{\perp}/v_{\parallel}$). Для корректировки параметров электронного пучка в рассматриваемом примере возможно изменение только ускоряющего напряжения, поскольку в гиротроне использована диодная магнетронно-инжекторная пушка. Это, однако, приводит к выходу из режима с наибольшим КПД и к уменьшению мощности выходного излучения для отдельных мод.

Сплошные линии на рисунке 1, полученные в рамках адиабатической теории [8], ограничивают область устойчивой работы гиротрона [7] в диодном режиме с ускоряющим напряжением от 27 кВ до 55 кВ при постоянном значении питч-фактора $g = 1.1$. При понижении напряжения заметную роль начинает играть

пространственный заряд, растёт параметр t_j , равный отношению тока пучка к току Чайльда-Ленгмюра (см., напр., [8]). Согласно оценкам, при напряжении 27 кВ параметр t_j приближается к значению 0,2, которое было выбрано как максимально допустимое. При увеличении напряжения (выше 55 кВ) растёт тепловая нагрузка на стенки резонатора. Поэтому для работы на модах, расположенных на рисунке 1 выше линии с напряжением 55 кВ, ускоряющее напряжение задавалось равным 55 кВ, при этом пич-фактор определялся адиабатической теорией и был ниже оптимального.

Пересечение области, ограниченной возможностями корректирующей катушки, и области, где требуемое ускоряющее напряжение находится в диапазоне от 27 кВ до 55 кВ при оптимальной закрутке электронного пучка, определяет перечень мод для анализа дискретной перестройки (см. рис. 1). Кроме того, диапазон перестройки ограничен магнитной системой (в эксперименте используется криомагнит JASTEC-10T100 с максимальным полем 10 Тл). В работе, в качестве примера, рассматривается целесообразность использования корректирующих катодных катушек с максимальным полем 0,03 Тл и 0,06 Тл. Кругами на рисунке обозначены моды, выбранные для анализа дискретной перестройки частоты при использовании катодной катушки с 0,03 Тл, треугольниками – моды, которые дополнительно учтены в случае использования корректирующей катушки с максимальным полем 0,06 Тл.

3. Результаты численного моделирования

Расчётная зависимость максимальной мощности выходного излучения от частоты генерации для двух вариантов гиротрона с разными корректирующими катушками представлена на рисунке 2. Расчёты электронно-волнового взаимодействия проведены в рамках самосогласованной расчётной модели [9]. Параметры электронного пучка в резонаторе гиротрона определялись при помощи адиабатической теории магнетронно-инжекторной пушки [8]. Согласно расчётам, при использовании корректирующей катодной катушки с максимальным полем 0,03 Тл и 0,06 Тл возможна перестройка частоты в диапазонах 158,5-256,5 ГГц и 128-256,5 ГГц соответственно. При этом «коэффициент заполненности» полосы перестройки по уровню 20 кВт, равный отношению суммарного интервала перестройки ко всему рабочему диапазону, составил 5,2% и 5,5%. Дополнительно расширить диапазон перестройки можно при помощи использования магнитной системы с максимальным полем более 10 Тл.

В работе рассматривался лишь случай оптимального положения электронного пучка в пространстве взаимодействия, при этом не учитывались моды, для которых оптимальный радиус электронного пучка орбит не достигим. За счёт возбуждения мод, взаимодействующих с электронным пучком с неоптимальным для них радиусом «встрела», «коэффициент заполненности» может быть дополнительно увеличен.

Рисунок 2 показывает максимально достижимые мощности излучения с учетом возможностей электронно-оптической и магнитной систем гиротронного комплекса [7], но без учёта системы вывода излучения. В гиротроне в качестве выходного окна используется однодисковое окно из нитрида бора с толщиной 3,13 мм, которое имеет минимальные отражения для выходного пучка на рабочей частоте 250 ГГц. Как видно на рисунке 3, данное окно не является прозрачным для всех рассматриваемых мод. Снизить коэффициент отражения для данных мод можно, например, при помощи использования просветляющей пластины или широкополосного профилированного окна [10]. Альтернативным вариантом является размещение выходного окна под углом Брюстера к направлению распространения пучка, но при этом требуются использование окон большого размера. Для транспортировки волнового пучка мод с попутным и обратным вращением к выходному окну может быть использован двухзаходный квазиоптический преобразователь [11].

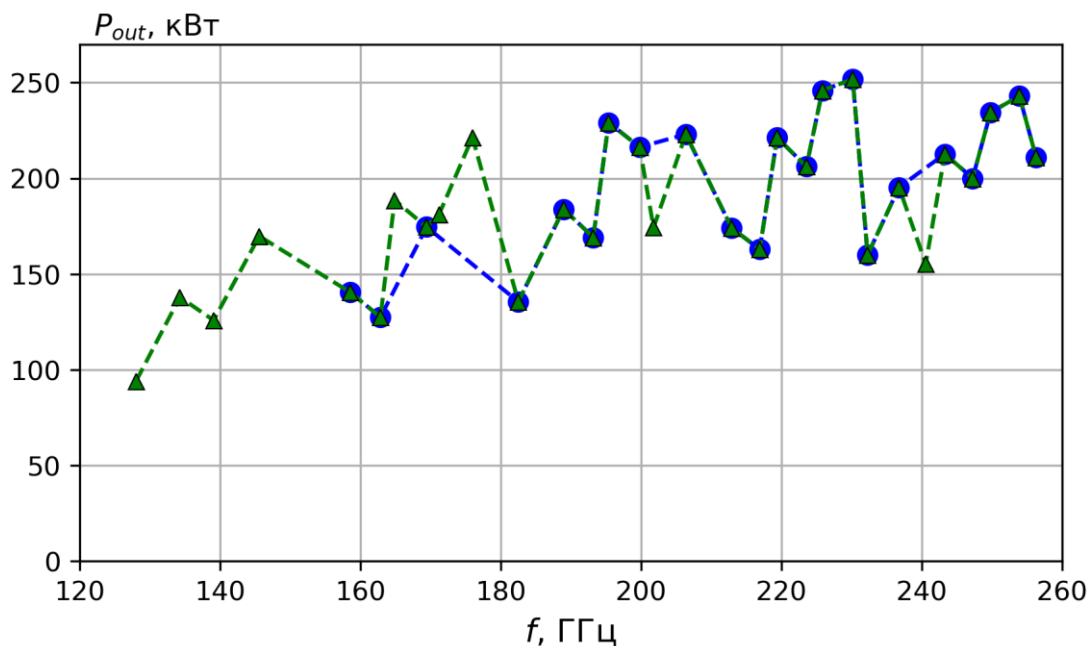


Рисунок 2. Расчётные зависимости максимальной мощности выбранных мод от частоты генерации для варианта с катодной катушкой с максимальным полем 0,03 и 0,06 Тл.

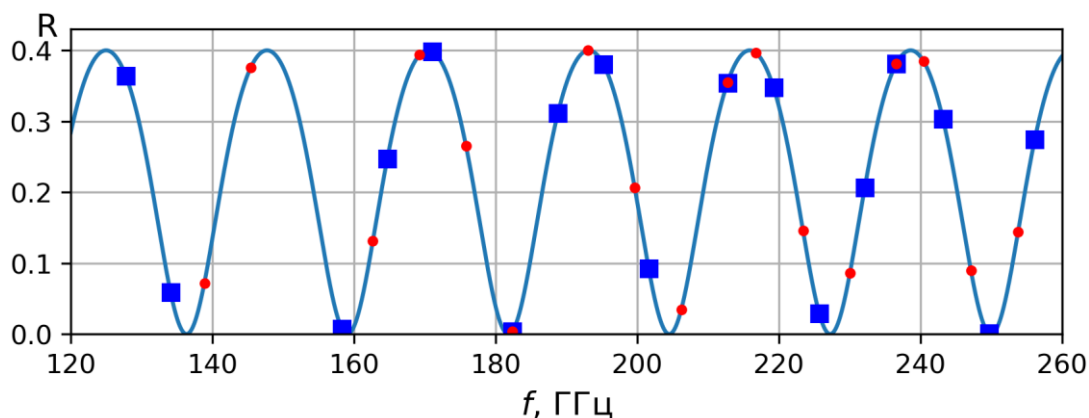


Рисунок 3. Зависимость коэффициента отражения по мощности однодискового окна из нитрида бора от частоты выходящего излучения. Синими квадратами указаны моды с попутным вращением, красными точками – с обратным вращением относительно электронного пучка.

4. Заключение

Рассмотрена возможность реализации широкополосной дискретной перестройки частоты в существующем гиротроне с рабочей частотой 250 ГГц. Определены рабочие моды и соответствующие им параметры электронно-оптической и магнитной систем гиротронного комплекса, выполнено численное моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия. Простые оценки показывают возможность реализации дискретной перестройки частоты в диапазоне 128-256,5 ГГц с уровнем мощности свыше 20 кВт.

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

Список литературы

1. 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.
2. Nusinovich G. S. et al. The Gyrotron at 50: Historical Overview //Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2014. - Т. 35. - №. 4. – С. 325–381.
3. Запевалов В. Е. и др. Разработка прототипа многочастотного мегаваттного гиротрона в диапазоне 105-156 ГГц //Известия вузов. Радиофизика. – 2004. - Т. 27. - №. 2. – С. 340–354.
4. Brand G. F. et al. Tuneable millimeter-wave gyrotrons //International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1982. - Т. 3. - №. 5. – С. 725–734.
5. Idehara T. et al. Development of frequency tunable, medium power gyrotrons (Gyrotron FU series) as submillimeter wave radiation sources //IEEE Transactions on Plasma Science. – 1999. - Т. 27. - №. 2. – С. 340–354.
6. Чирков А. В. и др. Многочастотный гиротрон с высокоэффективным синтезированным волновым преобразователем //Письма в ЖТФ. – 2007. - Т. 33. - №. 8. С. 71–76.
7. Denisov G. G. et al. First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics //Review of Scientific Instruments. – 2018. - Т. 89. - №. 8. – С. 084702.
8. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. - Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012.
9. Moiseev M. A. et al. Efficiency Enhancement of the Relativistic Gyrotron //International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2001. - Т. 22. - №. 6. – С. 813-833.
10. Власов С. Н. и Копосова Е. В. Об одной возможности просветления границ диэлектрика для нормально падающей волны независимо от её поляризации //Известия вузов. Радиофизика. – 2009. - Т. 52. - №. 10. – С. 804–808.
11. Chirkov A. V. et al. Perspective gyrotron with mode converter for co- and counter-rotation operating modes //Applied Physics Letters. – 2015. - Т. 106. - №. 26. – С. 263501.