

**Запевалов В.Е., Зуев А.С., Седов А.С.,
Фокин А.П.**

Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики РАН

Применение многолучевых систем для разработки частотно перестраиваемых терагерцевых гиротронов

Представлены результаты теоретических и численных исследований возможности использования двухлучевых систем для разработки частотно-перестраиваемых гиротронов терагерцового диапазона частот. Данный принцип разобран на примере гиротрона средней мощности, работающего в интервале частот 243-265 ГГц, также обсуждаются возможности использования различных электродинамических систем для увеличения диапазона перестройки частоты

Ключевые слова: гиротроны, многолучевые системы, перестройка частоты, терагерцовый диапазон

В настоящее время существует потребность в источниках когерентного электромагнитного излучения диапазона частот вплоть до 1 ТГц с выходной мощностью порядка несколько десятков Ватт [1]. Терагерцевый диапазон частот (0,1 - 10 ТГц) обладает рядом специфических особенностей, делающих его весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины. Терагерцевые волны перспективны для диагностики и спектроскопии различных сред, включая развитие методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения [2]. Мощное терагерцевое излучение может быть использовано для создания плотной плазмы и управления её параметрами (управляемый термоядерный синтез, "точечные" плазменные источники рентгеновского излучения, дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения), а также для ряда технологических и медицинских приложений. Одним из перспективных вариантов источников излучения в указанной области параметров являются гиротроны [3]. Основным преимуществом терагерцевых гиротронов является достаточно высокий уровень КПД и выходной мощности в данном диапазоне [4]. Однако для ряда перечисленных приложений требуется непрерывная или ступенчатая перестройка частоты в достаточно широких пределах. Одним из способов обеспечения такой перестройки является последовательное возбуждение мод со сходной поперечной структурой за счёт изменения внешнего магнитного поля [5]. Для данного способа перестройки требуется достаточно плотный спектр собственных мод в резонаторе, то есть работу гиротрона на пространственно-развитых модах. При этом радиус резонатора, определяющий рабочую моду, ограничен реальными размерами теплового отверстия сверхпроводящего магнита. Одним из способов лучшего освоения субтерагерцового частотного диапазона является использование дополнительного электронного пучка для возбуждения рабочих мод в резонаторе. Ранее подобные многолучевые системы использовались для повышения выходной мощности гиротрона [6] и для селекции рабочего типа колебаний [7].

Рассмотрим основной принцип реализации предложенной схемы на примере гиротрона, работающего в интервале частот 243-265 ГГц. Радиусы ведущих центров

электронных пучков (так называемые радиусы «встрела») выбраны таким образом, чтобы собственные частоты возбуждаемых мод были квазиэквидистантны. Кроме этого, они должны быть достаточно разнесены в пространстве взаимодействия. В итоге были выбраны радиусы «встрела» 3.65 и 4.86 мм, являющиеся оптимальными радиусами для мод $TE_{18,8}$ и $TE_{25,6}$. На рис.1 приведены зависимости структурных факторов связи пучка для двух выбранных радиусов. Несмотря на то, что спектр для каждого отдельного пучка достаточно плотный, этого недостаточно для непрерывного освоения указанного диапазона. Использование же дополнительного пучка в гиротроне позволяет возбудить большее количество мод, имеющих хорошую связь с тем или иным электронным пучком и, тем самым, лучше «перекрыть» указанный частотный диапазон.

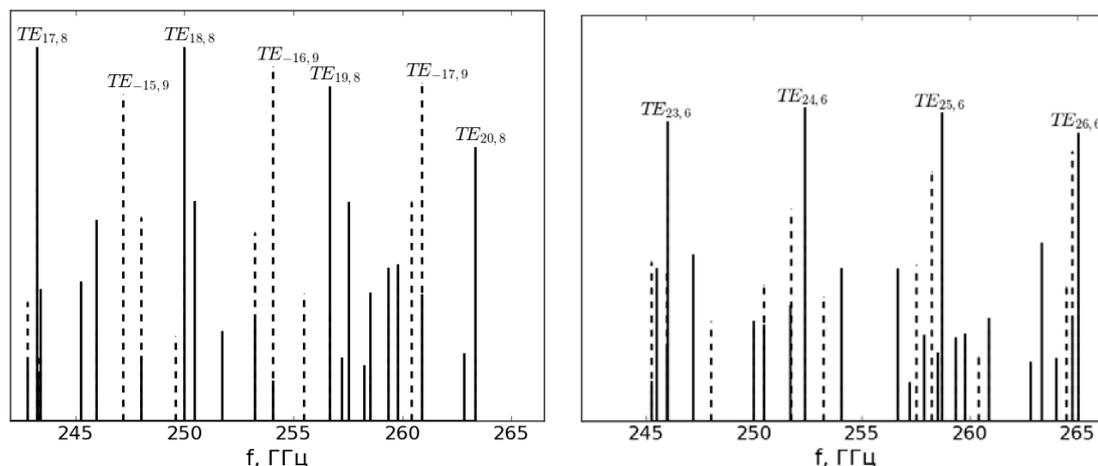


Рис.1 Нормированные структурные факторы связи пучка и собственных мод резонатора для двух радиусов пучка: 3.65 мм (левый рисунок) и 4.86 мм (правый рисунок).

Данные соображения были подтверждены расчетами электронно-волнового взаимодействия по модели с нефиксированной структурой ВЧ-поля (Рис.2). Для расчетов брались следующие параметры электронного пучка: ток каждого пучка 1 А, ускоряющее напряжение 20 кВ, питч-фактор каждого пучка 1.3. Как видно, из результатов расчета при рассматриваемых значениях магнитного поля происходит генерация с КПД не менее 3 %. Основным недостатком данной системы является то, что изменение частоты при переходе с одной рабочей моды на другую происходит скачкообразно. Для уменьшения данной скачкообразности необходимо увеличить диапазон перестройки частоты в пределах зоны генерации каждой моды.

Осуществление режимов генерации с несколькими продольными вариациями ВЧ-поля в резонаторе осложняется из-за конкуренции с соседними рабочими модами. Эффективную селекцию моды с двумя продольными вариациями ВЧ-поля можно осуществить за счёт изменения электродинамической системы. Такой системой может быть резонатор с кольцевой диафрагмы. Кольцевая диафрагма небольших размеров, расположенная в центре резонатора, может эффективно подавить моды с одной продольной вариацией, при этом, почти не повлияв на моды с несколькими продольными вариациями. Подобный способ селекции предлагался ранее, например, в работе [8], и был применён в гиротроне работающем на второй гармонике гирочастоты для подавления мод, генерирующих на основной циклотронной гармонике. На рисунке 3 приведены зоны генерации одной из используемых мод для случаев традиционного резонатора и для случая резонатора с диафрагмой. Добавление кольцевой диафрагмы не только подавляет моды с одной продольной вариацией, но и повышает эффективность работы гиротрона на моде со второй продольной вариацией. Кроме этого, существенно растёт мощность излучения в

области между зонами генерации мод с различной продольной структурой, что является очень важным для многих приложений

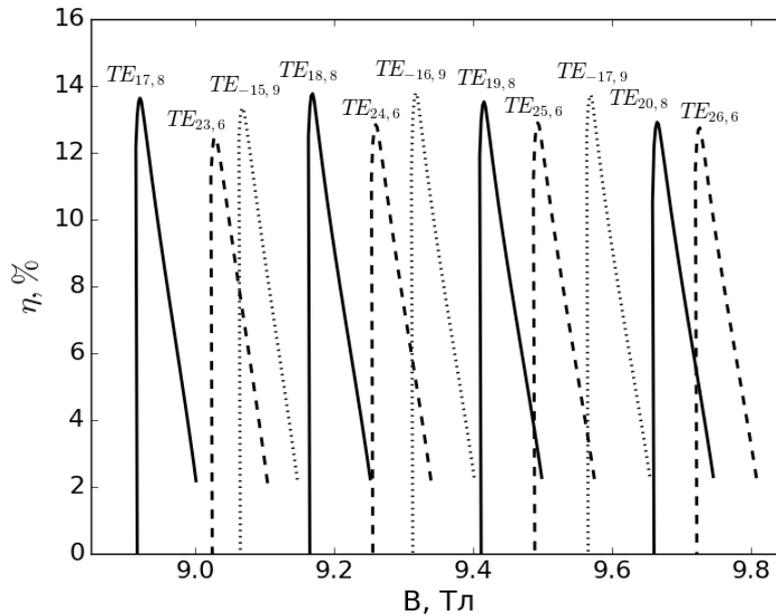


Рис.2 Зоны генерации рабочих мод в гиротроне, работающего в интервале частот 243-265 ГГц, для обоих электронных пучков.

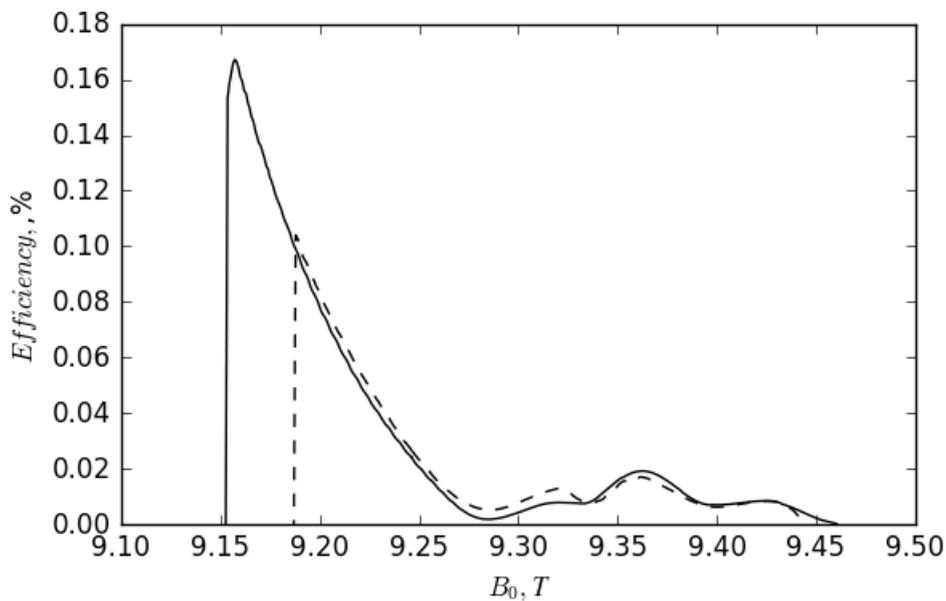


Рис.3. Зоны генерации для моды $TE_{19,8}$ при использовании традиционной электродинамической системы (сплошная кривая) и при использовании резонатора с диафрагмой в середине резонатора (пунктирная кривая)

Другим перспективным способом возбуждения мод с несколькими продольными вариациями является использование слабо конусных резонаторов. В случае слабо расширяющейся регулярной части резонатора при росте наклона регулярной части дифракционная добротность моды с несколькими продольными вариациями падает медленнее, чем добротность моды с одной продольной вариацией, что позволяет

эффективно возбуждать моды с разными продольными вариациями в условиях их конкуренции. В случае сужающейся регулярной части резонатора вместе с ростом добротностей мод с разными продольными структурами падают их стартовые токи, что облегчает возбуждение этих мод.

Таким образом, использование двухлучевой электронно-оптической системы перспективно для создания широкополосных источников когерентного излучения среднего уровня мощности в терагерцовом диапазоне.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-32-00132).

Библиографический список

1. В. Л. Братман, А. Г. Литвак, и Е. В. Суворов, «Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения», Успехи физических наук, т. 181, вып. 8, с. 867, 2011.
2. Denysenkov V., Prandolini M.J., Gafurov M. et al. // Phys.Chem. Chem. Phys.2010. V. 12. №22. P. 5786.
3. V. A. Flyagin, A. V. Gaponov, M. I. Petelin, и V. K. Yulpatov, «The Gyrotron», IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, вып. 6, с. 514, 1977.
4. М. Ю. Глявин, Г. Г. Денисов, В. Е. Запевалов, М. А. Кошелев, М. Ю. Третьяков, и А. И. Цветков, «Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред», Успехи физических наук, т. 186, вып. 6, с. 667, 2016.
5. А.В.Чирков, Г.Г.Денисов, А.Н.Куфтин, В.Е.Запевалов, В.И.Малыгин, М.А.Моисеев, С.Ю.Корнишин Многочастотный гиротрон с высокоэффективным синтезированным волноводным преобразователем // ПЖТФ, 2007, 33, 8, с.71
6. Zapevalov V.E., Manuilov V.N., Tsimring Sh.E. // Proc. 20 th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Lake Buena Vista (Orlando).11-14 Dec. 1995. N.Y.IEEE, 1995. P.203.
7. Glyavin M., Manuilov V., Idehara T. // Physics of Plasmas, 2013, 20, 123303
8. V. Bandurkin, M. Y. Glyavin, S. V. Kuzikov, P. B. Makhlov, I. V. Osharin, и A. V. Savilov, «Method of Providing the High Cyclotron Harmonic Operation Selectivity in a Gyrotron With a Spatially Developed Operating Mode», IEEE Transactions on Electron Devices, V. 64, №. 9, pp. 3893–3897, sen. 2017.