

10;12

Многочастотный гиротрон с высокоэффективным синтезированным волноводным преобразователем

© А.В. Чирков, Г.Г. Денисов, А.Н. Куфтин, В.Е. Запевалов,
В.И. Малыгин, М.А. Моисеев, С.Ю. Корнишин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
E-mail: chirkov@appl.sci-nnov.ru

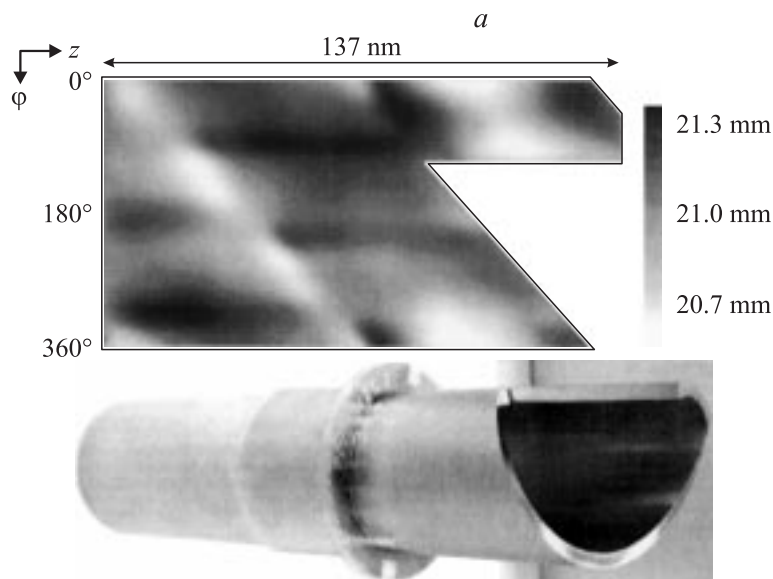
Поступило в Редакцию 26 сентября 2006 г.

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования прототипа мегаваттного многочастотного гиротрона для установок управляемого термоядерного синтеза. Выполненный эксперимент демонстрирует работу прибора на 6 частотах в диапазоне 105–152 GHz при малых дифракционных потерях во внутренней квазиоптической системе гиротрона и высоком содержании гауссовой моды в выходном волновом пучке.

PACS: 84.40.lk

В последние годы активно ведутся работы по созданию источника энергии на базе термоядерной реакции в водородной плазме, удерживаемой магнитным полем тороидальной геометрии (см., например, [1]). Получение необходимых высоких температур плазмы обеспечивается, в частности, ее нагревом на электронно-циклотронном резонансе, что требует применения мощных СВЧ-источников диапазона миллиметровых длин волн. В настоящее время для использования в этих целях среди источников нет альтернативы гиротрону [2], обеспечивающему мощность излучения около 1 MW на частотах 100–170 GHz в импульсах длительностью сотни секунд.

В существующих установках и разрабатываемом международном проекте токамака ITER для системы электронно-циклотронных волн выбраны фиксированные частоты, которые являются компромиссом между поглощением в центральных и периферических областях плазмы. Например, для ITER эта частота составляет 170 GHz, а для токамака ASDEX U_p — 140 GHz. Вместе с тем уже сделанные расчеты показывают [3], что системы электронно-циклотронных волн могут быть

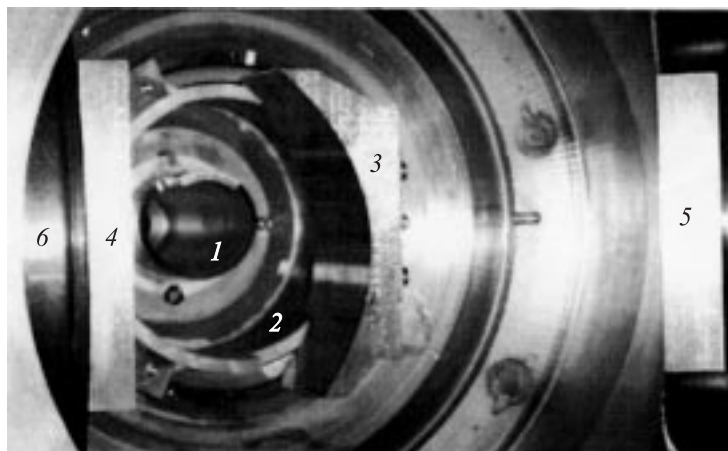


Элементы электродинамической системы гиротрона: *a* — синтезированная поверхность излучателя $R(\varphi, z)$ в цилиндрических координатах и его фотография (вместе с резонатором); *b* — фотография квазиоптического преобразователя: 1 — излучатель; 2 — цилиндрическое зеркало; 3 — квазипараболическое зеркало; 4, 5 — пара синтезированных зеркал; 6 — обечайка выходного окна.

значительно эффективнее, если в используемых гиротронах возможна перестройка частоты или, другими словами, генерация различных мод при изменении основного магнитного поля прибора.

Разработка многочастотных гиротронов активно начата около пяти лет назад, однако их параметры (например, энергия выходного импульса) еще значительно уступают параметрам одночастотных приборов. Для создания многочастотного мегаваттного гиротрона необходимо решить следующие ключевые задачи:

- 1) обеспечить возможность эффективного и селективного взаимодействия мощного винтового электронного потока с несколькими wybranными модами резонатора гиротрона;
- 2) разработать квазиоптический преобразователь рабочих мод гиротрона, отличающихся сложной пространственной структурой, в гауссо-

b*Продолжение рисунка.*













вы волновые пучки, причем допустимый уровень дифракционных потерь для непрерывных приборов не должен превышать нескольких процентов от генерируемой мощности;

3) разработать широкополосное или перестраиваемое выходное окно.

Решению первой задачи посвящены работы [4,5]. В данной работе на основе испытаний короткоимпульсного ($100 \mu s$) прототипа многочастотного гиротрона показана возможность решения второй из перечисленных принципиальных задач. Решение задачи разработки выходного окна выходит за рамки проведенного короткоимпульсного эксперимента, в котором использовалось кварцевое брюстеровское окно.

Квазиоптическая система гиротрона состоит из: излучателя рабочей волны гиротрона в свободное пространство, цилиндрического зеркала — повторителя [6], квазипараболического зеркала [7] и пары синтезированных зеркал [8] (см. рисунок). Основным элементом квазиоптического преобразователя является излучатель, в котором должна выполняться группировка поля в волновой пучок, имеющий малую амплитуду на краях излучателя и соответственно малое дифракционное рассеяние [9]. К сожалению, при высоких радиальных индексах, в силу

Выходные параметры гиротрона

Частота, GHz	Рабочая мода	Мощность, kW	Распределения интенсивности поля на расстоянии 280 mm от окна гиротрона		Измеренные дифракционные потери, %	Расчетное содержание TEM ₀₀ моды, %
			измеренные	рассчитанные		
105.01	TE _{17,6}	1049			3.6	98.6
117.51	TE _{18,7}	1182			2.6	98.5
124.05	TE _{20,7}	1130			1.2	98.7
127.32	TE _{21,7}	1158			1.6	98.4
140.05	TE _{22,8}	1194			1.0	99.1
152.44	TE _{23,9}	1152			1.2	97.2

конструктивных ограничений, накладываемых на длину излучателя, не всегда удается использовать известные решения [10,11] для преобразователей высших волноводных мод в собственные волны открытых зеркальных линий. На основе скалярного подхода, изложенного в [12], были разработаны быстрые методы анализа и синтеза поля бегущей волны в цилиндрическом сверхразмерном волноводе с плавной и неглубокой деформацией стенок с учетом дифракции на несимметричном конце волновода [13]. Новые методы позволили синтезировать излучатели более короткие и, как следствие, более широкополосные по сравнению с известными.

Результаты нового эксперимента с многочастотным гиротроном приведены в таблице. Исследуемый гиротрон рассчитан на работу с электронным пучком с энергией частиц до 70–80 keV током до 35–40 А. Перестройка рабочей моды (частоты) производилась сменой величины основного магнитного поля криомагнита, а управление параметрами электронного пучка в резонаторе осуществлялось изменением магнитного поля катодной катушки [5]. При переходе с одной частоты на другую изменяется радиус каустики рабочей моды и, как следствие, изменяется угол волнового пучка в поперечном сечении гиротрона. „Качание“ волнового пучка приводит к перемещению его центра по корректирующим зеркалам, искажениям распределения поля на зеркалах и несовпадению центра волнового пучка с центром окна. Поскольку на выходе нового излучателя уже сформирован гауссов пучок с заданными параметрами, „качание“ не ведет к снижению эффективности квазиоптической системы гиротрона (см. таблицу).

В эксперименте уровень выходной мощности гиротрона 1 MW был достигнут на всех шести рабочих модах. Для всех мод измеренные дифракционные потери имеют приемлемый уровень 1.0–3.6%, а содержание гауссовой компоненты в выходном пучке составляет 97.2–99.1%. Полученные параметры дают возможность использовать квазиоптический преобразователь в непрерывном мегаваттном приборе.

Список литературы

- [1] *Ereckmann V., Gasparino U.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 1994. V. 36. P. 1869.
- [2] *Gantenbein G., Zohm H., Giruzzi G.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. P. 1242.

- [3] *Zohm H., Thumm M.* // Journal of Physics Conf. Series. 2005. V. 25. P. 274.
- [4] *Thumm M., Arnold A., Borie E., Braz O., Dammerts G., Dumbrajs O., Koppenburg K., Kuntze M., Michel G., Piosczyk B.* // Fus. Eng. and Design. 2001. V. 53. P. 407.
- [5] *Запевалов В.Е., Богдашов А.А., Денисов Г.Г., Куфтин А.Н., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Чирков А.В.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47. № 5–6. С. 443.
- [6] *Власов С.Н., Лукин К.М.* // Гиротроны: сборник научных трудов. Горький, 1980. С. 125.
- [7] *Власов С.Н., Орлова И.М.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17. № 17. С. 115.
- [8] *Bogdashov A.A., Chirkov A.V., Denisov G.G., Vinogradov D.V., Kuftin A.N., Malygin V.I., Zapevalov V.E.* // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16. N 4. P. 735.
- [9] *Denisov G.G. et al.* // Int. J. of Electronics. 1992. V. 72. P. 1079.
- [10] *Denisov G.G., Petelin M.I., Vinogradov D.V.* // WO90/0780 HO1P1/16, PCT Gazette, 1990. N 16. P. 47.
- [11] *Богдашов А.А., Денисов Г.Г.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47. № 4. С. 319.
- [12] *Вайнштейн Л.А.* Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966.
- [13] *Чирков А.В., Денисов Г.Г., Кулыгин М.Л., Малыгин В.И., Малыгин С.А., Павельев А.Б., Солуянова Е.А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 59. № 5. С. 381.