

УДК 537.86:539.1

ГИРОТРОНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

А. Н. Куфтин, В. Н. Мануилов, Б. В. Райский, В. А. Флягин, Ш. Е. Цимринг

1. Гиротроны пока занимают монопольное положение как источники большой энергии в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Помимо традиционного применения - нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза - складываются новые, и в том числе - технология новых материалов. В связи с этим одной из актуальных задач является выбор экономичных схем питания и управления. Использование криомагнитных соленоидов и обычных "теплых" соленоидов не является, по-видимому, лучшим вариантом. Ниже рассматривается в качестве альтернативы возможность создания гиротронов на постоянных магнитах.

2. Известен ряд перспективных материалов для постоянных магнитов, обладающих значительной коэрцитивной силой и большой удельной энергией. Среди них, по-видимому, наилучшими являются соединения самария с кобальтом. Кольцевые магниты, как показывают оценки, позволяют получить в объемах, необходимых для гиротронов умеренной мощности, магнитные поля с индукцией 5 - 8 кГс. Этого в принципе достаточно для гиромонотронов на второй гармонике

гирочастоты с длинами волн $\lambda > 7,5$ мм. Указанные магнитные материалы обладают достаточной временной и температурной стабильностью. Их недостатком является высокая стоимость. Не исключено, однако, что стоимость будет в дальнейшем снижаться и появятся другие, равноценные по параметрам, но более дешевые материалы.

Имеется и проблема другого рода: какой вообще должна быть схема гиротрона на постоянных магнитах, учитывая специфику распределения магнитного поля в подобных системах? На рис. 1а изображено типичное распределение осевого поля кольцевого магнита, намагниченного вдоль оси. Как видно, в центральной части системы создается квазиоднородное поле и эту часть можно совместить с рабочим пространством гиротрона. Однако, по обеим сторонам магнитное поле меняет знак. При этом максимальная магнитная индукция в областях реверса достигает почти половины от поля в центральной части и возникают две трудности, усложняющие формирование винтового электронного пучка и проектирование коллектора:

- близкая к однородному участку область реверса магнитного поля;

- быстрое изменение магнитного поля по обеим сторонам реверса.

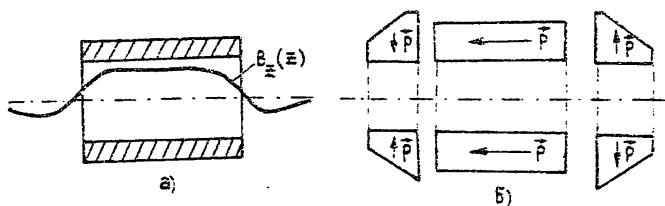


Рис. 1.

а) распределение осевого поля в кольцевом магните;
б) магнитная система гиротрона.

Компенсация реверса магнитного поля с помощью токовых катушек, как показывают расчеты, нецелесообразна, так как мощность питания катушек оказывается одного порядка с той, которая потребовалась бы для формирования полного магнитного поля гиротрона. По-видимому, некоторые возможности создает использование боковых дополнительных секций с радиальным намагничиванием (рис. 1б). Таким образом, удается реализовать некоторое смещение реверсивных участков на периферию системы. Ниже представлены результаты расчета пушки и коллектора для конфигурации магнитной системы рис 1б.

3. Магнитная система (рис. 1б), как показывают расчеты, содержит область нарастающего магнитного поля (примыкающую к

однородному участку магнитного поля), где удовлетворяются условия адиабатичности и где можно поместить магнетронно-инжекторную пушку. В таблице приведены оценочные значения параметров МИП, выполненные по адиабатической теории [1], и оптимизированные параметры, полученные в результате траекторного анализа по программе ЭПОС [2].

Параметр	Адиабатическая теория	Траекторный анализ
Длина волны	8,43 мм	8,43 мм
Ускоряющее напряжение	20 кВ	20 кВ
Анодное напряжение	10,4 кВ	11,0 кВ
Относит. осцилл. энергия	0,72	0,68
Компрессия пучка	8,3	8,7
Скоростной разброс	4%	14%
Угол накл. магн. поля к оси	1,5°	1,5°

Распределение магнитного поля постоянных магнитов рассчитывалось по программе "Вебер" [3]. Отметим, что в процессе оптимизации изменялась не только форма электродов, но и проводилась некоторая модификация магнитной системы рис. 1б. Это также было связано с необходимостью размещения деталей и узлов электронной пушки. Форма электродов и электронные траектории показаны на рис. 2. Судя по приведенным данным, адиабатические и полученные из траекторного анализа параметры пушки достаточно близки, что свидетельствует об адиабатичности распределения магнитного поля при выбранном расположении пушки.

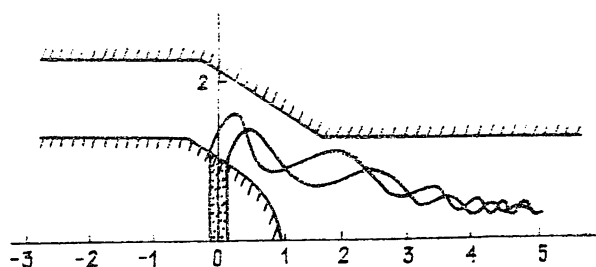


Рис. 2.

Форма электродов и электронные траектории в пушке гиротрона.

4. Коллекторная система должна обеспечить приемлемый тепловой режим цилиндрического коллектора радиуса $R_{кол} = 2$ см при осаждении на него пучка с энергией 20 кэВ и током 3А. Траекторный анализ показывает (рис. 3), что за точкой реверса (нулем магнитного поля)

осцилляторные скорости электронов сильно возрастают и почти все они отражаются от магнитной пробки. Расчеты с прогрессивно уменьшающимся радиусом коллектора позволили установить, что вплоть до $R_{\text{кол}} = 1,25$ см существуют частицы, которые после отражения от пробки не перехватываются коллектором. Только при $R_{\text{кол}} \leq 1,25$ см все электроны попадают на коллектор (рис. 3). Эффект отражения исчезает при $R_{\text{кол}} = 1$ см и след пучка имеет длину 2 см, а при $R_{\text{кол}} = 1,25$ см - 1,6 см. Легко проверить, что в обоих случаях площади следов одинаковы. Удельная мощность пучка на коллекторе в двух последних вариантах достигает 5 кВт/см^2 при токе 3А. Если уменьшить ток пучка до 1,2А, то удельная мощность снизится до 2 кВт/см^2 . Полная мощность пучка при этом составит 24 кВт, а полезная мощность гиротрона при КПД 25% - 6 кВт.

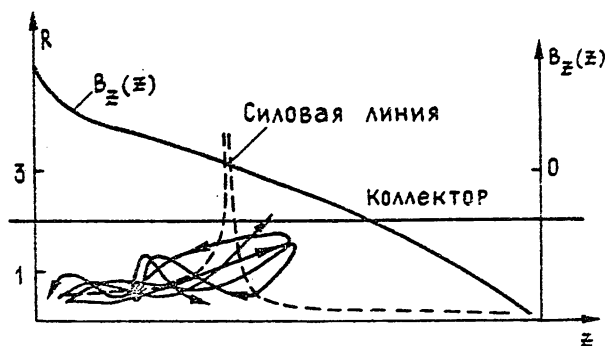


Рис. 3.

Электронные траектории в коллекторной области
вблизи области реверса.

Таким образом, наиболее критичным узлом рассматриваемого варианта гиротрона оказывается коллектор. Действенным способом увеличения мощности (помимо усовершенствования системы охлаждения) является дальнейшее смещение точки реверса. В качестве одного из вариантов можно, как удалось установить, использовать кольцевые вставки из магнитомягких материалов.

Авторы выражают благодарность Ермакову А. Е. за интерес к работе и полезные предложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольденберг А. Л., Лыгин В. К., Мануилов В. Н., Петелин М. И., Цимринг Ш. Е. Адиабатическая теория и траекторный анализ пучек гиротронов. // Гиротрон. Горький: ИПФ АН СССР. 1981. с. 86.

2. Лыгин В. К., Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Электронная техника. Сер. I. Электроника СВЧ. 1987. N 7. с. 36.
3. Молоковский, Сушков. Интенсивные электронные и ионные пучки. - Л.: Энергия, 1991.

Институт прикладной физики
РАН

Поступила в редакцию
29 мая 1992 г.