

09;12

Релятивистский магнетрон с каналом связи резонаторов в виде волноводно-щелевой решетки

© *И.И. Винтизенко, С.С. Новиков*

Научно-исследовательский институт ядерной физики
Томского политехнического университета
Томский государственный университет
E-mail: lablia@npi.tpu.ru

Поступило в Редакцию 22 июня 2009 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований метода распределенного вывода электромагнитной энергии из релятивистского магнетрона с целью получения направленного когерентного излучения. Модифицированный магнетронный генератор отличается тем, что резонансная система охватывается внешней связью, а в канал связи вводится волноводно-щелевая решетка. Получены данные о влиянии канала связи резонаторов магнетрона на спектральные и пространственные характеристики излучения.

PACS: 84.40.Fc

Колебательная система релятивистского магнетронного генератора (РМГ), как и его классического аналога, является распределенной электродинамической структурой и отличается многомодовостью. В импульсном режиме вследствие нестационарности питающих полей и плазменных процессов в прикатодной области это обуславливает модовую и спектральную нестабильности СВЧ-излучения. Актуальными также являются проблемы транспортировки и пространственного формирования излучения сверхвысокого уровня мощности. Одновременное решение указанных проблем оказывается возможным путем введения в резонансную систему внешних управляющих связей с элементами распределенного вывода излучения [1–4]. Взаимодействие колебаний резонаторов магнетрона с физической точки зрения подобно взаимодействию в системе связанных автогенераторов. В этих системах при оптимальной, с точки зрения устойчивости, взаимной связи реализуется высокая прочность когерентного режима. Поэтому можно считать,

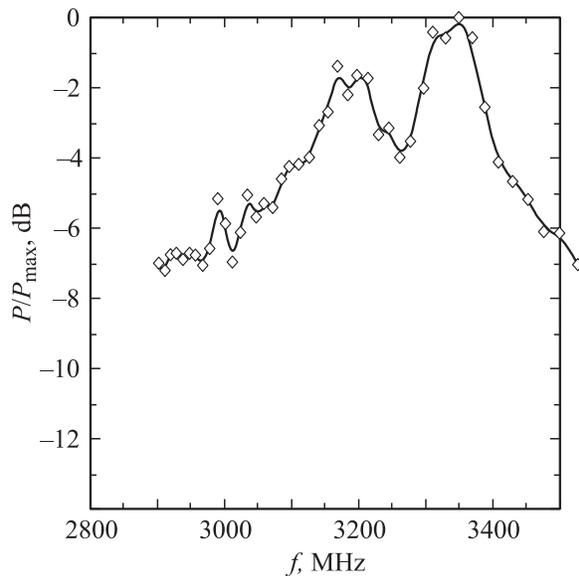


Рис. 1. Спектр излучения 8-резонаторного релятивистского магнетрона.

что внешняя связь резонаторов РМГ при определенных условиях может усилить „внутренний“ — электронный механизм устойчивости и тем самым обеспечить более высокую стабильность рабочего вида колебаний и подавление конкурирующих видов.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию 8-резонаторного РМГ с направленным выводом СВЧ-излучения из канала связи резонаторов анодного блока через волноводно-щелевую решетку.

Предварительными данными для исследования являлись спектры излучения 8-резонаторного РМГ с выводом мощности из одного резонатора (рис. 1). Анодный блок РМГ имеет 8 резонаторов лопаточного типа; выходной волновод возбуждается через окно в торце одного из резонаторов. На катод магнетрона подается импульсное напряжение порядка 300–400 кV от линейного индукционного ускорителя ЛИУ 04/6 [5]; постоянное магнитное поле создается парой Гельмгольца и может изменяться в широких пределах 0.2–0.55 Т; ток магнетрона в режиме

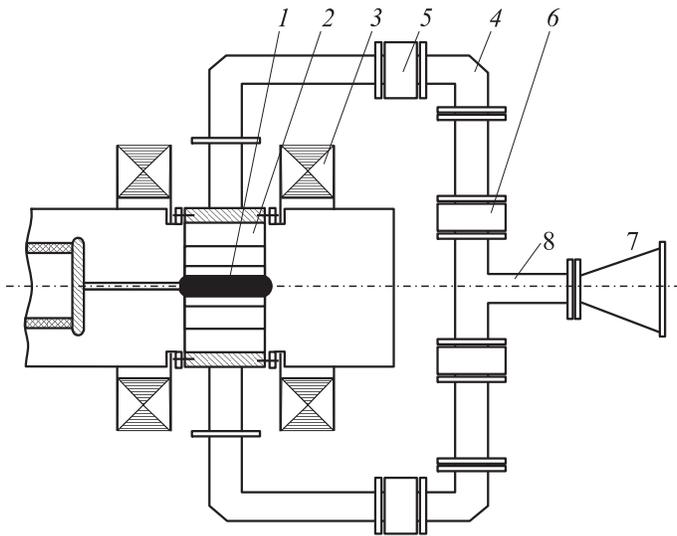


Рис. 2. Релятивистский магнетрон с волноводным каналом связи: 1 — катод, 2 — анодный блок, 3 — магнитная система, 4 — канал связи, 5, 6 — волноводные вставки, 7 — антенна, 8 — волноводный H -тройник.

генерации составлял 3–4 кА; выходная мощность $\sim 250\text{--}300\text{ MW}$. Как видно, спектр излучения характеризуется наличием двух максимумов, связанных с возбуждением в течение импульса двух видов колебаний резонансной системы, имеющих близкие частоты: π -вида ($\sim 3300\text{ MHz}$) и $3\pi/4$ -вида ($\sim 3200\text{ MHz}$). Одновременное существование этих видов и конкуренция между ними приводят к снижению выходной мощности РМГ и расширению спектра колебаний.

Анодный блок РМГ с двумя выводами мощности имеет идентичные размеры; его противоположные резонаторы связаны волноводным трактом 4 сечением $72 \times 34\text{ mm}$ (рис. 2). Вывод мощности СВЧ-колебаний резонаторов осуществляется через волноводный H -тройник 8, нагруженный пирамидальной антенной 7. Длина тракта связи с помощью набора волноводных вставок 5 могла изменяться в широких пределах. Экспериментальное исследование данной конфигурации, несмотря на трудоемкость, является необходимым этапом настройки системы с рас-

пределенным выводом излучения, так как позволяет определить длину канала связи с оптимальным взаимодействием колебаний резонаторов, а также идентифицировать возбуждаемый вид [3,4].

Конкурирующие колебания π - и $3\pi/4$ -видов по величине замедления имеют малое разделение и близкие напряжения возбуждения. Для магнетрона с числом резонаторов, удовлетворяющих условию: $N/2$ — четное число, колебания противоположных резонаторов для π -вида по отношению к выходным волноводам противофазны. Для $3\pi/4$ -вида колебания указанных резонаторов, наоборот, возбуждают выходные волноводы в фазе. Следовательно, сигналы с выходов магнетрона для π -вида суммируются в общей нагрузке в антисимметричной схеме и вычитаются — в симметричной. Для $3\pi/4$ -вида, наоборот, сигналы вычитаются в общей нагрузке антисимметричной схемы и суммируются — в симметричной. Эти соображения позволяют в процессе эксперимента однозначно идентифицировать режим генерации магнетрона на указанных видах колебаний. Симметричная конфигурация канала связи реализуется при включении одинаковых вставок b по обеим сторонам тройника δ ; при этом тройник располагается на оси электрической симметрии канала связи. Когда одна из вставок b имеет длину, на $\lambda/2$ большую, чем противоположная ей, получаем антисимметричную схему (λ — длина волны в волноводе).

На рис. 3 приведены зависимости выходной мощности от магнитного поля для симметричной и антисимметричной конфигураций канала связи противоположных резонаторов РМГ. В каждом из вариантов длина тракта связи отдельно подбиралась с помощью вставок по критерию максимального уровня выходной мощности и стабильности спектра излучения. Важно подчеркнуть, что внешний канал связи устраняет конкуренцию указанных видов, обеспечивая их отдельное существование в каждой их схем в широком интервале значений магнитного поля. Ширина спектров излучения для обоих видов на уровне -3 dB не превышает 50 МГц. Таким образом, находит прямое подтверждение полученный из анализа феноменологической модели магнетронной структуры с внешней связью резонаторов [6] прогноз о возможности увеличения или снижения (вплоть до подавления) стабильности видов колебаний. В процессе настройки РМГ регистрировалось большое количество СВЧ-импульсов (100 для каждой вставки) и оценивался среднеквадратичный разброс их амплитуды. При оптимальной длине

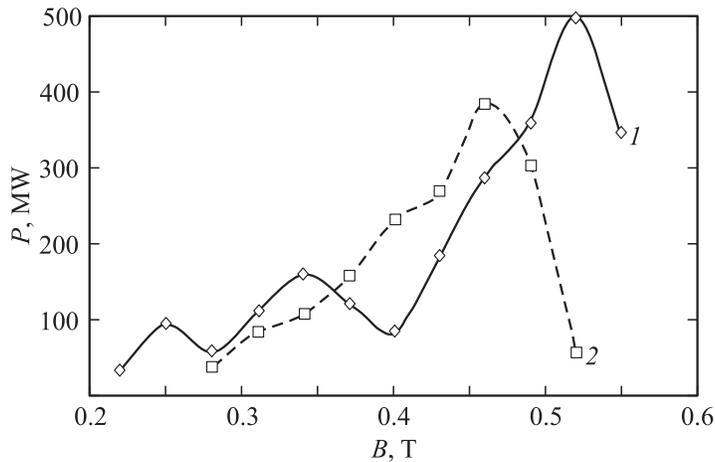


Рис. 3. Зависимость мощности РМГ с внешним каналом связи от величины индукции магнитного поля при антисимметричном 1 и симметричном 2 включении H -тройника.

канала связи наблюдается также стабилизация уровня генерируемой в импульсах мощности.

Распределенный вывод СВЧ-излучения РМГ реализуется с помощью щелевой решетки излучателей, введенной в волноводный канал связи резонаторов. Схема эксперимента показана на рис. 4. Расстояние между соседними щелями решетки выбиралось равным $\lambda/2$. При противофазных колебаниях резонаторов (π -вид) продольные щели, расположенные по разные стороны относительно средней линии широкой стенки волновода, возбуждаются в фазе. Щели закрыты диэлектрическим окном из органического стекла с пазом, в котором размещена вакуумная резина для вакуумирования волновода.

Диаграмма направленности излучения РМГ (рис. 5) снималась с помощью двух детекторов, один из которых перемещался в вертикальной плоскости, а другой находился в направлении нормали к апертуре решетки и регистрировал опорный уровень сигнала. Сравнение измеренной диаграммы с расчетной (пунктирная линия) однозначно доказывает существование π -вида колебаний.

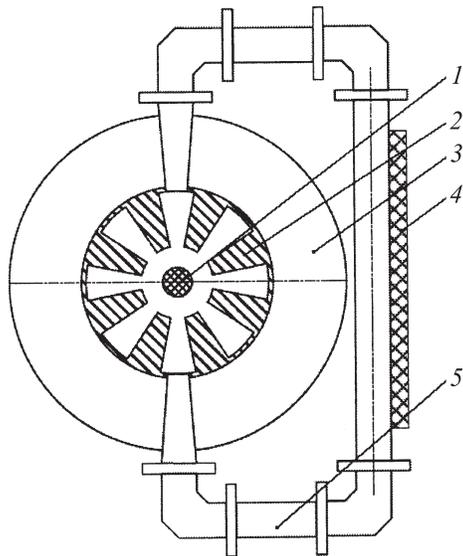


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — анодный блок, 3 — магнитная система, 4 — антенная решетка, 5 — волноводные вставки.

Стабильность рабочего вида иллюстрируется также результатами спектральных измерений. Частота излучения равна 3300 МГц; ширина спектра по уровню -3 дВ составляет ~ 50 МГц, что существенно уже спектра РМГ с несвязанными резонаторами (см. рис. 1).

Таким образом, введение внешней связи между резонаторами релятивистского магнетрона создает дополнительный и эффективный инструмент воздействия на колебательные процессы в релятивистском магнетроне. При соответствующей (оптимальной) настройке канала сильное внешнее взаимодействие выделенных колебательных подсистем — резонаторов, по-видимому, обеспечивает более глубокую стабилизацию первичных процессов в генераторе, связанных с формированием электронного потока в поле электромагнитных колебаний. Благодаря внешней связи реализуется достаточно сильный селективный механизм удержания заданных фазовых соотношений в системе, следствием чего является повышение модовой и спектральной стабильности излучения.

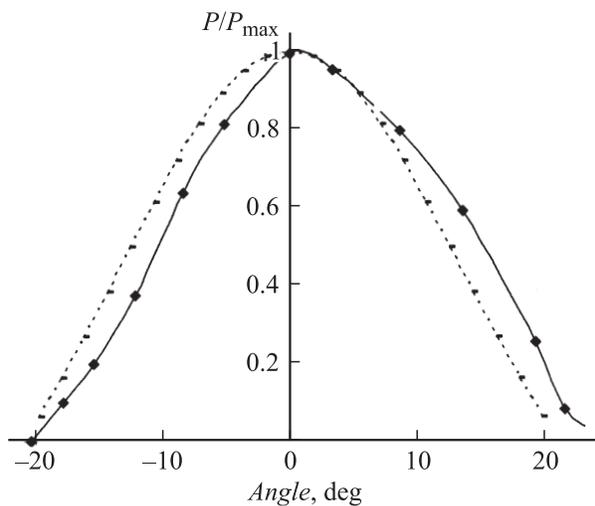


Рис. 5. Диаграмма направленности излучения РМГ.

В результате удастся обеспечить работу магнетрона на сложную нагрузку в виде интегрированной в канал связи системы излучателей и реализовать эффективный отбор мощности и пространственное формирование излучения. Эти данные следует рассматривать как дополнение к циклу исследований 6-резонаторного РМГ с внешней связью резонаторов [3–5,7].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 08-08-00555-а.

Список литературы

- [1] Патент на изобретение № 2228560 РФ, МПК Н 01 J 25/50. Релятивистский магнетрон // Винтизенко И.И., Заревич А.И., Новиков С.С. № 2002124144; Заявл. 11.09.2002. Оpubл. БИ. 2004. № 13.
- [2] Zarevich A.I., Vintizenko I.I., Novikov S.S. // Proc. of 13th International Symposium of High Current Electronics. Tomsk, 2004. P. 269–272.

- [3] Винтизенко И.И., Зеревич А.И., Новиков С.С. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 9. С. 63–68.
- [4] Винтизенко И.И., Зеревич А.И., Новиков С.С. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 23. С. 40–47.
- [5] Винтизенко И.И. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 10/2. С. 136–141.
- [6] Новиков С.С. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 10/3. С. 206–221.
- [7] Винтизенко И.И., Новиков С.С. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 10/3. С. 115–120.