

09;12

## Релятивистский магнетрон с распределенным выводом СВЧ-излучения

© И.И. Винтизенко, А.И. Заревич, С.С. Новиков

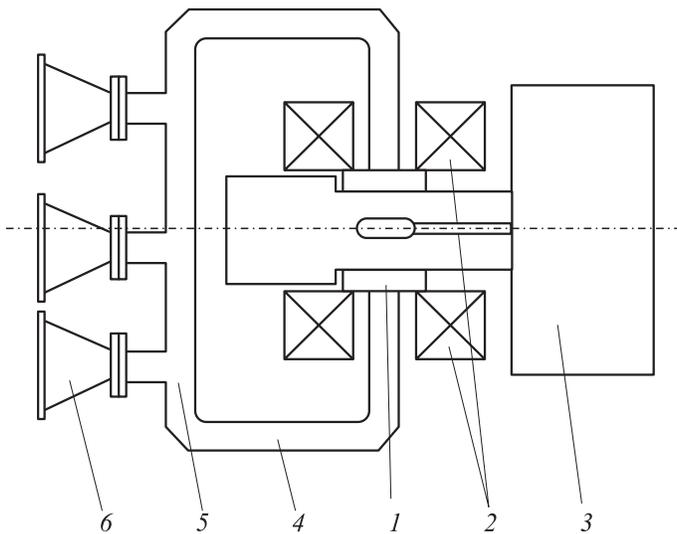
Научно-исследовательский институт ядерной физики  
при Томском политехническом университете  
E-mail: lablia@npi.tpu.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2004 г.

Экспериментально исследуется проблема вывода и формирования СВЧ-излучения релятивистского магнетрона. Предлагается модифицированный магнетронный генератор, между элементами резонансной системы которого вводится канал связи с системой нагрузок-излучателей. Показано, что в системе можно сформировать заданный амплитудно-фазовый профиль колебаний и обеспечить высокую спектральную и амплитудную стабильность излучения.

Разработка релятивистских источников СВЧ-излучения тесно связана с решением проблемы транспортировки и формирования колебаний сверхвысокого уровня мощности. Возникающие при этом трудности определяются низкой электрической прочностью элементов вывода мощности генераторов, значительными весогабаритными параметрами установок. Эти факторы ограничивают возможное использование классических методов вывода и формирования излучения источника и обуславливают необходимость поиска оригинальных схемных решений. В релятивистском магнетроне возможным решением является увеличение количества волноводных выводов мощности. Однако это снижает добротность колебательной системы, что (в совокупности с нестабильностью импульсного напряжения и нестационарностью взрывоэмиссионных процессов на катоде) приводит к низкой когерентности колебаний.

Авторами предложен модифицированный магнетронный генератор, между резонаторами которого введена взаимная связь с общей нагрузкой-излучателем [1]. Проведенные эксперименты показали высокую эффективность такого способа для стабилизации процесса



**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки.

генерации [2]. Дальнейшим развитием предложенной идеи является магнетрон с распределенным выводом СВЧ-излучения [3,4].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию модифицированного релятивистского магнетронного генератора с распределенным выводом СВЧ-колебаний, рассматривается влияние внешней взаимной связи резонаторов анодного блока на характеристики излучения.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из импульсно-периодического 6-резонаторного релятивистского магнетрона 10-см диапазона 1 с магнитной системой 2, источника питания магнетрона — секции линейного индукционного ускорителя ЛИУ 0.4/6 3 и стабилизированного источника постоянного тока для питания магнита. Противоположные резонаторы анодного блока связаны внешним трактом 4 с тремя нагрузками-излучателями 5. Установка [5] обеспечивает генерацию СВЧ-импульсов с частотой следования до 320 Hz при катод-анодном напряжении  $\sim 450$  kV, полном токе  $\sim 3$  kA. Тракт связи резонаторов изготовлен из отрезков прямоугольного волновода сечением

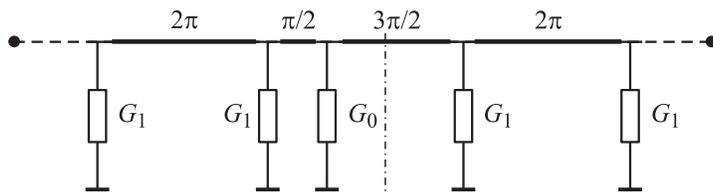
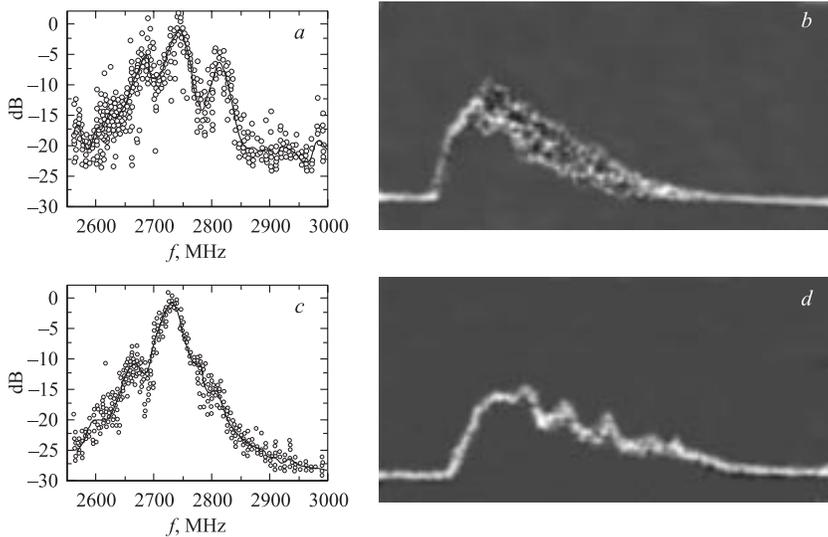


Рис. 2. Эквивалентная схема тракта связи.

$72 \times 34$  mm. Нагрузки выполнены в виде волноводных  $H$ -тройников, к выходу которых подключены излучатели — рупорные антенны 6. В эксперименте определялись мощность и спектральный состав импульсов СВЧ-излучения магнетрона по методике, описанной в [6].

Введение связи между резонаторами магнетрона приводит к взаимодействию СВЧ-полей в резонаторах и взаимному выравниванию амплитуд и фаз высокочастотного поля в соответствующих резонаторах анодного блока. Это способствует стабилизации рабочего вида, для которого колебания, прошедшие тракт связи, синфазны с колебаниями в резонаторах, и подавлению остальных видов.

Тракт построен с использованием симметрично-несимметричных схем [7]. Эквивалентная схема тракта связи для произвольного числа нагрузок приведена на рис. 2 [8]. Центральная нагрузка  $G_0$  смещена относительно оси электрической симметрии тракта связи на  $\pi/2$ . Поскольку для рабочего  $\pi$ -вида колебания резонаторов на входах цепи синфазны, будет происходить их вычитание в нагрузке  $G_0$ . Если расположить ближайшие нагрузки  $G_1$  на расстоянии  $\pi/2$  от центральной, а остальные на расстоянии, кратном  $\pi$ , друг от друга, то реализуется „параллельное“ соединение нагрузок левой и правой групп. Для равноамплитудного распределения колебаний по нагрузкам необходима одинаковость их проводимостей. Синфазное распределение реализуется, если расстояние между нагрузками в группах кратно  $2\pi$ , а одна из групп нагрузок дополнительно смещена относительно центральной на  $\pi$ . Центральная нагрузка играет важную роль в селекции колебаний. Расчет резонансной системы модифицированного магнетрона показывает, что вносимые со стороны этой нагрузки в противофазных режимах потери значительно снижают нагруженную добротность, что обеспечивает быстрое затухание нерабочих видов колебаний.



**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов и спектры СВЧ-излучения.

В эксперименте длина тракта связи выбрана исходя из результатов исследований [2,9] и составляла  $\sim 34\lambda$  для рабочего  $\pi$ -вида колебаний, правая и левая нагрузки расположены на расстоянии  $5\pi/2$  и  $7\pi/2$  относительно центральной. Магнетрон, выводы которого не связаны, обладает следующими параметрами. Уровень мощности и энергии в импульсе с каждого вывода  $\sim 190$  MW и  $\sim 4.8$  J соответственно. Частота излучения  $\sim 2740$  MHz. Текущий спектр в полосе  $\sim 200$  MHz (рис. 3, *a*) имеет несколько четко выраженных максимумов, которые, по-видимому, соответствуют одновременно существующим различным конкурирующим колебаниям. Совмещенные осциллограммы десяти импульсов СВЧ-излучения приведены на рис. 3, *b*. Они различны по форме и отражают нестабильность процесса генерации.

При объединении выводов магнетрона трактом связи уровень мощности и энергии с выхода центрального излучателя не превышает 25 MW и 1.5 J соответственно, что позволяет сделать заключение о существовании в системе  $\pi$ -вида, колебания которого в центральной нагрузке вычитаются. Результаты спектральных измерений с одного из

боковых излучателей показаны на рис. 3, с. Частота излучения магнетрона в этом эксперименте составляет 2720 МГц, ширина текущего спектра в центре импульса не превышает 30 МГц по уровню  $-3$  дВ. Уровни мощности боковых излучателей отличаются не более, чем на 10%, и составляют  $\sim 200$  МВт при энергии  $\sim 5$  Дж, что указывает на равноамплитудное распределение колебаний в нагрузках. Излучение характеризуется высокой амплитудной и временной стабильностью, что наглядно иллюстрируется при совмещении осциллограмм десяти импульсов (рис. 3, d).

Стабильность фазового распределения колебаний на системе рупорных излучателей подтверждается специально проведенным экспериментом по измерению пространственного распределения СВЧ-излучения. Глубокие минимумы ( $-13$  дВ) на диаграмме направленности СВЧ-излучения указывают на присутствие в системе колебательного режима с устойчивым амплитудно-фазовым профилем.

Таким образом, экспериментальные результаты показывают, что объединение резонаторов релятивистского магнетрона внешним трактом связи с общими нагрузками-излучателями позволяет реализовать распределенный вывод мощности с заданным амплитудно-фазовым профилем колебаний. Взаимодействие колебаний резонаторов обеспечивает высокую модовую, амплитудную и спектральную стабильности импульсного СВЧ-излучения. Полученные результаты могут быть применены при проектировании сверхмощных излучающих систем с использованием релятивистских источников СВЧ-колебаний.

## Список литературы

- [1] Патент на изобретение № 2190281 РФ, МПК Н 01 J 25/50. Релятивистский магнетрон // Винтизенко И.И., Заревич А.И., Новиков С.С. — № 2001128794; Заявл. 25.10.2001. Оpubл. БИ. 2002. № 27.
- [2] Винтизенко И.И., Гусельников В.И., Заревич А.И., Новиков С.С. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 7. С. 64–70.
- [3] 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.
- [4] Zarevich A.I., Vintzenko I.I., Novikov S.S. // Proc. of 13<sup>th</sup> International Symposium on High Current Electronics. Tomsk, 2004. P. 269–272.

- [5] Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Гусельников В.И. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 26. В. 13. С. 66–70.
- [6] Заревич А.И., Вегнер Е.В., Винтизенко И.И. // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 3. С. 78–82.
- [7] Майдановский С.А., Новиков С.С. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 6. С. 1–6.
- [8] Novikov S.S., Zarevich A.I. // Proc. of 1-st Int. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Tomsk, 2000. V. 2. P. 466–469.
- [9] Zarevich A.I., Vintzenko I.I., Novikov S.S. // Proc. of 13<sup>th</sup> International Symposium on High Current Electronics. Tomsk, 2004. P. 300–303.