

09;12

Спектральные характеристики релятивистского магнетрона со связанными резонаторами

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

Федеральное государственное научное учреждение
„Научно-исследовательский институт ядерной физики“, Томск
E-mail: lablia@npi.tpu.ru
Томский государственный университет

Поступило в Редакцию 27 июня 2006 г.

Экспериментально исследованы спектральные характеристики излучения модифицированного релятивистского СВЧ-магнетрона с внешним каналом, связывающим резонаторы. Показано, что путем настройки связи в системе возможно целенаправленное получение СВЧ-излучения со стабильным, узким спектром, улучшенными энергетическими параметрами.

PACS: 84.40.-x

Проводимые авторами исследования направлены на создание на базе релятивистского магнетрона высокостабильного сверхмощного источника СВЧ-излучения с возможностью настройки и оперативного управления параметрами генерации. С этой целью предложен модифицированный магнетронный генератор [1,2]. Он отличается введением в колебательную систему управляемой взаимной связи резонаторов. Влияние тракта связи на энергетические характеристики излучения источника и стабилизацию фазового распределения колебаний в системе рассмотрено в работах [3–5]. Там же приведены конструкция магнетрона и параметры экспериментальной установки. В статье приводятся результаты исследования спектральных свойств СВЧ-излучения магнетрона, описано явление затягивания частоты колебаний трактом связи резонаторов.

Структурная схема эксперимента приведена на рис. 1. Используемый в работе магнетрон 1 имеет 6 резонаторов лопаточного типа. Выводы мощности противоположных резонаторов 2 соединены трактом связи, состоящим из следующих элементов: волноводные H -повороты 3;

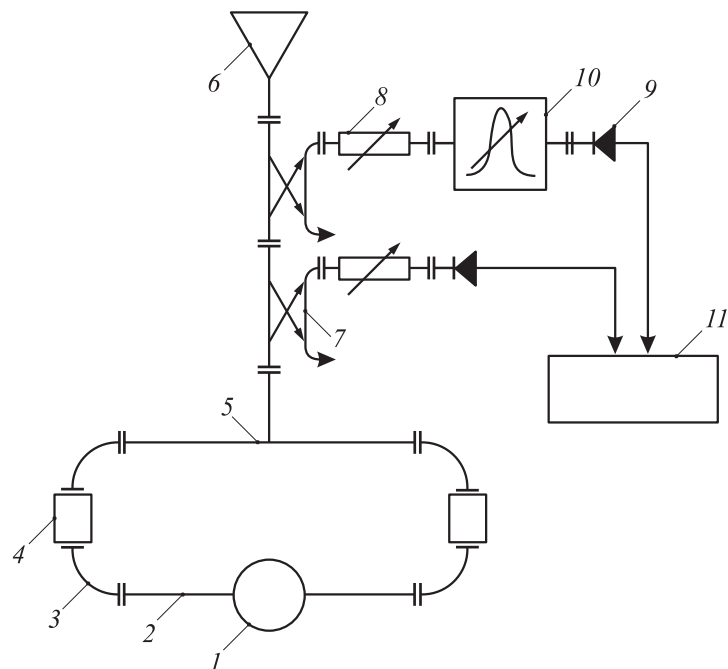


Рис. 1. Структурная схема эксперимента.

набор вставок 4, обеспечивающих изменение длины тракта связи в диапазоне 16,5–17,7 длин волн λ_0 рабочего вида колебаний; 3-dB волноводный *H*-тройник 5, расположенный на оси электрической симметрии тракта. К выходу волноводного *H*-тройника подключалась общая нагрузка — излучающая рупорная антенна 6.

Для диагностики параметров СВЧ-излучения между *H*-тройником и антенной устанавливались два волноводных вакуумных направленных ответвителя 7, соединенные последовательно друг с другом. В каналы ответвляемой мощности каждого из ответвителей включались волноводные пластинчатые аттенюаторы 8 и СВЧ-детекторы 9. Измерение спектрального состава излучения осуществлялось с помощью перестраиваемого полосового фильтра 10, установленного между одним из аттенюаторов и детектором; осциллограф 11. Резонансная частота

фильтра изменялась с шагом 5 МГц в диапазоне 2550–3000 МГц. При каждом положении фильтра выполнялось до 10 импульсов.

Методика спектральной обработки сигналов заключалась в следующем. Анализировалось отношение мощности сигнала после фильтра P_F при каждой его настройке f_i к мощности опорного сигнала P_0 в данный момент времени τ :

$$S(f_i, \tau) = \frac{P_F(f_i, \tau)}{P_0(\tau)}.$$

Анализ изменения этого отношения при последовательной перестройке частоты фильтра в выбранные моменты времени импульса позволяет оценить динамику спектра. Нормировка на мощность опорного сигнала P_0 позволяет устранить влияние нестабильности огибающей импульсов. В процессе исследований было обработано более 10 000 импульсов; статистическая обработка данных позволила снизить погрешность измерений и повысить достоверность результатов.

Рабочим видом колебаний в магнетроне является π -вид, при котором колебания противоположных резонаторов синфазны и суммируются в симметричной нагрузке. Ближайший к нему конкурирующий $2\pi/3$ -вид отличается противофазными колебаниями связанных резонаторов.

Исходными являлись измерения характеристик СВЧ-излучения релятивистского магнетрона с несвязанными выводами, нагруженными на согласованные излучатели — рупорные антенны. Уровень мощности и энергии в импульсе с каждого вывода составляли ~ 200 МВт и ~ 7 Дж соответственно. Спектральные характеристики магнетрона (рис. 2) измерены в четырех точках импульса: на переднем фронте ($\tau \approx 10$ нс), в точке максимальной мощности ($\tau \approx 20$ нс) и в двух точках на заднем фронте импульса ($\tau \approx 50$ нс и $\tau \approx 75$ нс). В каждом случае максимумы спектрограмм приведены к уровню 0 дБ. Видно, что спектр в точке максимальной мощности напоминает спектр на переднем фронте. Его ширина по уровню -3 дБ составляет порядка ~ 80 МГц с центром в точке 2775 МГц. Далее спектр видоизменяется, и при $\tau \approx 50$ нс в нем появляются два дополнительных максимума, отстоящие от центрального на ~ 70 МГц. Частота центрального максимума смещается и составляет 2740 МГц, а его ширина по уровню -3 дБ уменьшается до ~ 40 МГц. В конце импульса ($\tau \approx 75$ нс) в спектре практически утрачиваются регулярные составляющие и значительно усиливается зашумленность. Обнаруженным спектральным составляющим могут соответствовать различные виды колебаний магнетрона (π и $2\pi/3$). Их

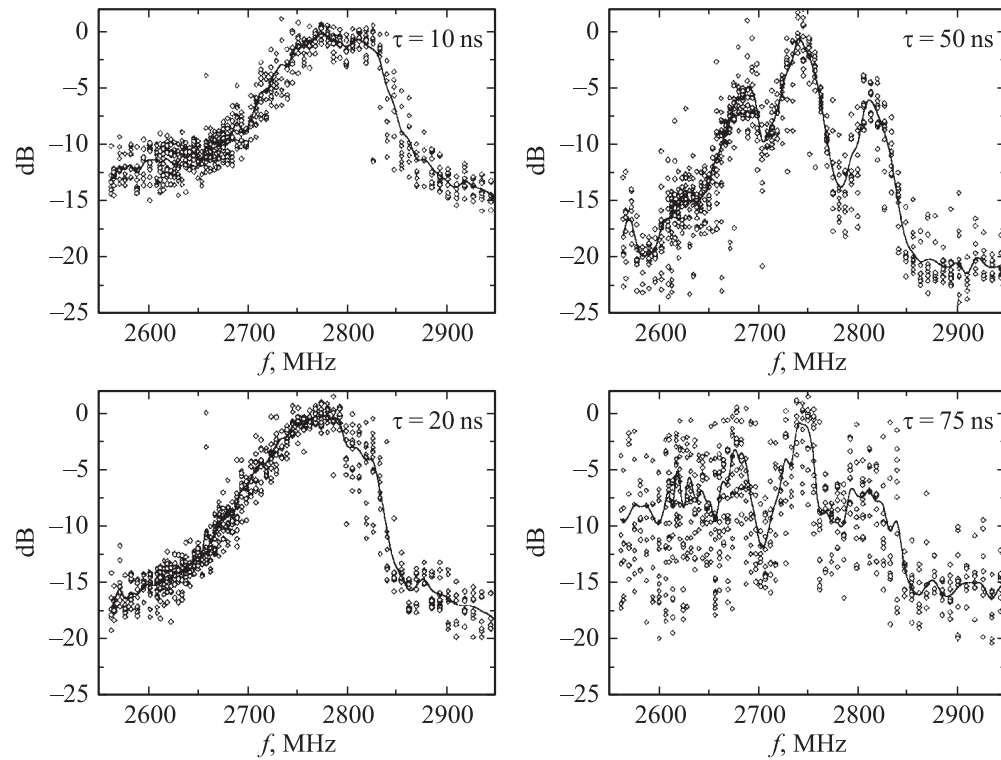


Рис. 2. Текущий спектр излучения релятивистского магнетрона с несвязанными выводами в различные моменты времени τ .

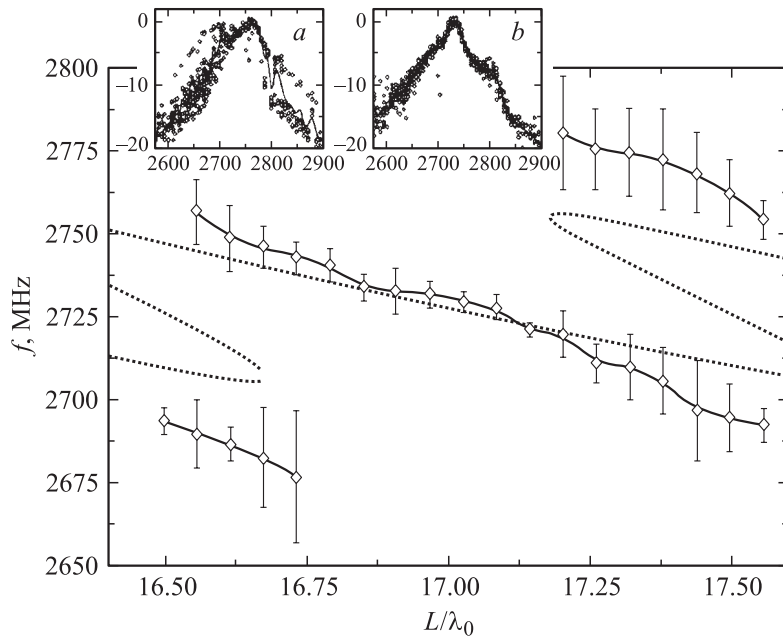


Рис. 3. Изменение положения частотного максимума магнетрона с внешней связью резонаторов (сплошные линии — эксперимент, пунктирные — расчет).

одновременное существование обусловлено нестабильностью импульсных питающих полей и радиальным расширением катодной плазмы в течение импульса, что в совокупности нарушает условия синхронизма и изменяет резонансные свойства системы.

После объединения выводов релятивистского магнетрона внешним трактом связи был проведен поиск оптимальной для колебаний π -вида длины тракта L . Критерием оптимальной настройки служил узкий, одночастотный спектр СВЧ-излучения. Было обнаружено явление затягивания частоты генерации, приводящее к циклическому по L изменению спектральных параметров излучения. Из рис. 3 видно, что область одночастотных колебаний (спектр b) сменяется областями, в которых происходит случайное, от импульса к импульсу, возбуждение магнетрона на одной из двух частот (спектр a).

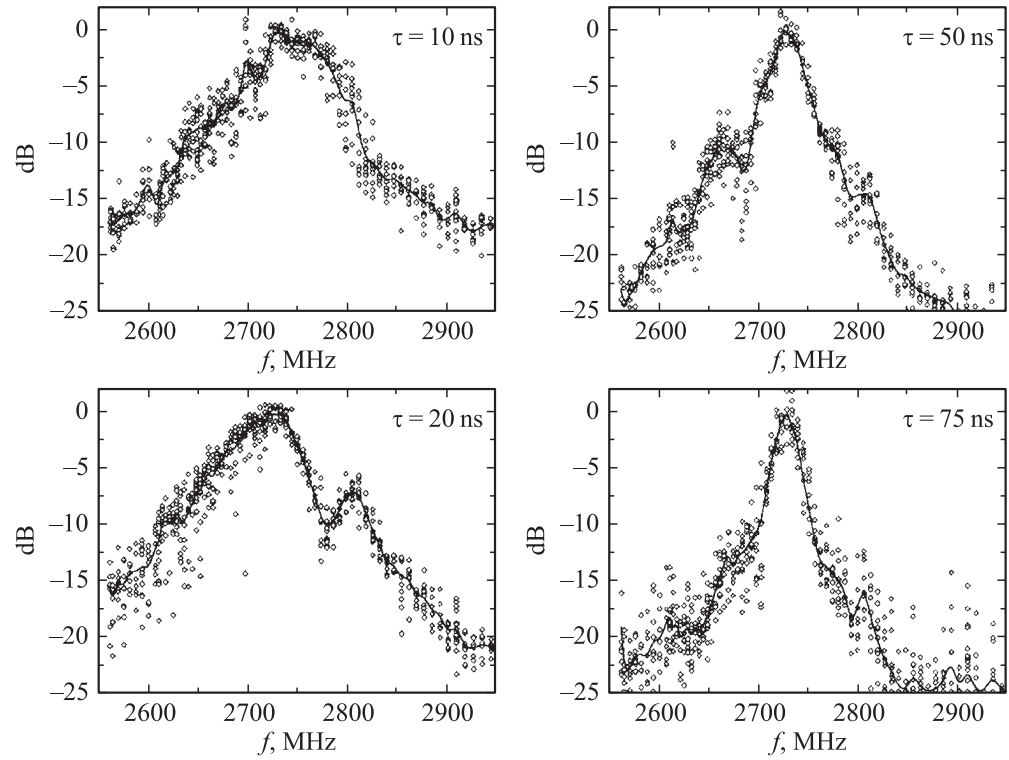


Рис. 4. Текущий спектр излучения релятивистского магнетрона с внешней связью резонаторов в различные моменты времени τ .

Спектральные характеристики излучения (текущий спектр) магнетрона в области одночастотных колебаний приведены на рис. 4. Спектр на переднем фронте импульса напоминает аналогичный спектр магнетрона с несвязанными выводами. Частота максимума составляет ~ 2728 МГц. Спектр импульса в точке максимальной мощности ($\tau = 20$ ns) уже заметно отличается от аналогичного спектра с несвязанными выводами. При $\tau \approx 50$ ns спектр приобретает форму пика с частотой ~ 2728 МГц, как и в точке на переднем фронте. Ширина спектра по уровню -3 dB составляет ~ 30 МГц. Форма спектра излучения и положение максимума остаются неизменными, вплоть до конца импульса. Можно утверждать, что взаимодействие колебаний резонаторов в данной области длин близко к оптимальному. В области двухчастотных колебаний спектр является более широким и зашумленным, что указывает на неоптимальность связи.

Отметим, что время формирования спектра сопоставимо со временем запаздывания сигнала в тракте связи, что говорит о сильном взаимодействии колебаний резонаторов. Таким образом, цикличность в изменении характеристик излучения обусловлена расфазировкой взаимодействующих колебаний, т.е. электрической длиной тракта [5].

В области оптимальной связи энергетические параметры импульсов составляют ~ 425 MW ($\sim 112\%$ от суммарной мощности магнетрона с несвязанными выводами) и 15 J. Это говорит о синфазности колебаний в нагрузке, т.е. о возбуждении π -вида. Колебания конкурирующего вида колебаний $2\pi/3$, как уже сказано, характеризуются противофазностью и низким уровнем мощности в нагрузке; данный вид колебаний в эксперименте не наблюдался. Генерация на частотах в области раздвоения спектра по уровню мощности (~ 400 MW) также соответствует синфазным колебаниям. Данные частоты можно считать подтипами π -вида колебаний. Возникновение подтипов и затягивание частоты магнетрона следует связать с рассогласованием общей нагрузки канала [5]. Подобные эффекты присущи классическим магнетронным генераторам при их работе на длинные рассогласованные фидеры [6,7]. В рассматриваемом случае рассогласование имеет динамический характер. На рис. 3 сплошной линией показана расчетная зависимость резонансных частот эквивалентной схемы магнетрона [5]. Параметры тракта выбирались близкими к использованному в эксперименте. Расчет удовлетворительно отражает эффект затягивания частоты и возникновение частотной (гистерезисной) неустойчивости.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о существенном влиянии внешнего канала связи резонаторов на процесс генерации релятивистского магнетрона. По-видимому, происходит улучшение условий формирования электронного потока, выравнивание полей в пространстве взаимодействия, что, несмотря на значительное запаздывание сигнала (~ 17 периодов), обуславливает раннее формирование спектра излучения и его стабильность в течение импульса.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 05-08-01210а.

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 // БИ. 2002. № 27.
- [2] *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 // БИ. 2004. № 13.
- [3] *Винтизенко И.И., Гусельников В.И., Заревич А.И., Новиков С.С.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 7. С. 64–70.
- [4] *Винтизенко И.И., Гусельников В.И., Заревич А.И., Новиков С.С.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 9. С. 63–67.
- [5] *Zarevich A.I., Vintzenko I.I., Novikov S.S.* // Proc. of 13th International Symposium on High Current Electronics. Tomsk, 2004. P. 300–303.
- [6] *Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями* / Под ред. М.М. Федорова. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. Т. 2. С. 367–380.
- [7] *Бычков С.И.* // Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. М.: Изд-во Сов. радио, 1967. 216 с.