

13

Релятивистский магнетрон с внешним резонатором — каналом связи

© И.И. Винтизенко, А.И. Мащенко

Томский политехнический университет

E-mail: vintizenko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2014 г.

Приведены результаты первых демонстрационных экспериментов по увеличению в 2 раза выходной мощности релятивистского магнетрона с волноводным каналом связи между противоположными резонаторами анодного блока. В канал связи определенным образом помещены тройник и разрядник. При коммутации разрядника наблюдается формирование и вывод из тройника СВЧ-импульсов увеличенной мощности короткой длительности.

Положительные свойства релятивистских магнетронов (РМ), сохраненные от классических аналогов, можно успешно использовать при решении ряда научно-технических задач, например в радиолокации для получения коротких импульсов большой мощности. Ниже представлены результаты экспериментальных исследований по увеличению импульсной мощности РМ при накоплении энергии во внешнем канале связи (кольцевой резонатор) и быстром ее выводе, что позволяет получать более короткие и мощные импульсы, чем поступающие в резонатор. В исследованном устройстве роль резонатора для накопления энергии выполняет канал связи РМ. Такая конструкция по сравнению с первой экспериментальной установкой [1] позволяет увеличить надежность и снизить стоимость устройства за счет устранения из схемы дополнительного резонатора и развязывающих элементов, таких как длинный волновод или ферритовый вентиль.

В экспериментах использован 8-резонаторный релятивистский магнетрон с 2 выводами мощности из противоположных резонаторов, связанными волноводным каналом связи. Выводы мощности соединены с резонаторами анодного блока прямоугольными щелями размером 1×7.2 см. Использование 8-резонаторного РМ по сравнению с традиционным 6-резонаторным обусловлено повышенным электронным КПД за счет большего замедления волны на рабочем виде колебаний. Однако

при этом ухудшается разделение частот и уменьшается разница между величинами замедления рабочего и ближайшего к нему паразитного видов колебаний. Как показали эксперименты с 8-резонаторным РМ с одним выводом мощности, выходное излучение характеризуется широким спектром ~ 150 МГц и наличием 2 максимумов, связанных с возбуждением 2 видов колебаний резонансной системы, имеющих близкие длины волн и напряжение возбуждения.

Способом повышения стабильности работы релятивистских магнетронов с увеличенным числом резонаторов на выбранном типе колебаний является введение в колебательные системы внешних связей [2]. В релятивистском магнетроне внешняя связь может быть реализована путем объединения волноводных выводов энергии из различных резонаторов. Дополнительные каналы взаимодействия между компонентами колебательной системы магнетрона оказывают существенное воздействие на характеристики процесса генерации. Несмотря на запаздывание сигнала в тракте, связанное с временем пробега волны между резонаторами и составляющее ~ 12 периодов, наблюдаются раннее формирование спектра излучения и отсутствие дрейфа частоты в течение импульса [3], что важно для работы предложенного устройства. В используемом 8-резонаторном релятивистском магнетроне основными конкурирующими видами колебаний являются рабочий π -вид и ближайший к нему $3\pi/4$ -вид. Для π -вида колебания в противоположных резонаторах по отношению к выходным волноводам противофазны. Для возбуждения π -вида колебаний релятивистского магнетрона на длине канала L должно укладываться $(n + 0.5)\lambda_\pi$ длин волн для того, чтобы волна, пришедшая от противоположного резонатора, была в фазе с колебаниями резонатора ($\lambda_\pi = 14.6$ см — длина волны в волноводе, n — целое число). Для этого вида колебаний сигналы с выходов магнетрона суммируются в общей нагрузке в антисимметричной схеме (ось волноводного Н-тройника смещена на $\lambda_\pi/4$ от оси симметрии канала) и вычитаются в симметричной (оси тройника и канала совпадают). Схема релятивистского магнетрона с внешним каналом связи показана на рис. 1.

Для $3\pi/4$ -вида колебаний фазовое распределение высокочастотного поля отлично от фазового распределения для π -вида, и он характеризуется синфазностью колебаний в противоположных резонаторах. Для возбуждения этого вида колебаний длина канала должна быть равна $n\lambda_{3\pi/4}$, где $\lambda_{3\pi/4} = 15.1$ см — длина волны $3\pi/4$ -вида колебаний в вол-

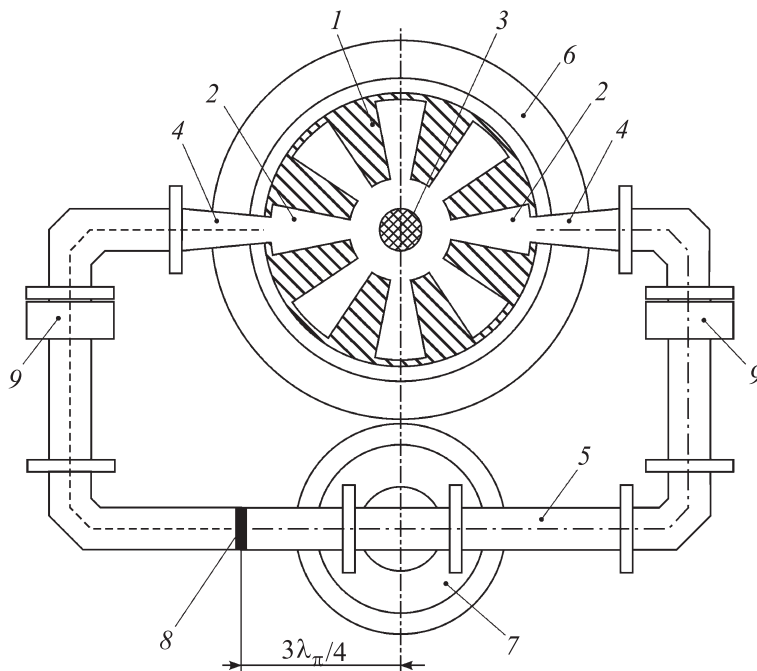


Рис. 1. Схема релятивистского магнетрона с внешним каналом связи: 1 — анодный блок, 2 — резонаторы, 3 — катод, 4 — выходы мощности, 5 — канал связи, 6 — магнитная система, 7 — Н-тройник с излучающей антенной (симметричная установка), 8 — СВЧ-разрядник, 9 — регулировочные вставки.

новоде. Следовательно, для $3\pi/4$ -вида колебаний сигналы с выходов магнетрона вычитаются в общей нагрузке в антисимметричной схеме и суммируются в симметричной.

В исследуемом приборе волноводный канал связи используется в качестве накопительного резонатора, поэтому Н-тройник с излучающей антенной должен быть установлен так, чтобы в процессе накопления энергии на рабочем виде колебаний антенна не излучала. Вывод излучения из резонатора, образованного отрезком канала между щелью связи в резонаторе и разрядником, осуществляется при коммутации

СВЧ-разрядника, установленного в общем случае на расстоянии $k\lambda_\pi/4$ от оси Н-тройника, где k — нечетное число.

Для нашего эксперимента при выборе π -вида колебаний в качестве рабочего необходима симметричная установка тройника и длина канала должна быть такой, чтобы обеспечить одновременное выполнение условий $L = (n + 0.5)\lambda_\pi$ для возбуждения π -вида и $L = (n + 0.5)\lambda_{3\pi/4}$ для подавления $3\pi/4$ -вида. Однако практически это оказалось невозможным без значительного удлинения канала, поэтому длина канала связи была подобрана установкой регулировочных вставок в боковые плечи так, чтобы выполнялось первое условие, т.е. обеспечивалось эффективное возбуждение π -вида колебаний. Полная длина канала связи составила $L = 168$ см ($12.5\lambda_\pi$). Однако при этой длине канала ($L = 11.1\lambda_{3\pi/4}$) высока вероятность возбуждения релятивистского магнетрона на $3\pi/4$ -виде колебаний и вывода его излучения в антенну, поскольку расположение тройника благоприятно. Можно ожидать, и как подтвердили в дальнейшем эксперименты, что работа релятивистского магнетрона будет осуществляться на 2 видах колебаний: π -виде в режиме стоячей волны и $3\pi/4$ -виде в режиме бегущей волны.

На расстоянии $3\lambda_\pi/4$ (11 см) от оси тройника установлен неуправляемый СВЧ-разрядник. В качестве разрядника использована тефлоновая пластина толщиной 0.36 см, расположенная в вакууме. Это существенно упрощает всю конструкцию устройства.

Эксперименты проведены на импульсно-периодическом релятивистском магнетроне с источником питания — линейным индукционным ускорителем (ЛИУ). Выходное напряжение на катод-анодном промежутке РМ составляло ~ 300 кВ при токе 3–4 кА длительностью 170 нс. Магнитная система запитана от источника постоянного тока, индукция в пространстве взаимодействия релятивистского магнетрона достигала 0.55 Т.

Для контроля напряжения ускорителя использовался установленный в вакуумной камере ЛИУ емкостный датчик. Полный ток магнетрона измерялся с помощью пояса Роговского, расположенного во фланце вакуумной камеры. В СВЧ-измерениях использовались калиброванные ламповые детекторы, размещенные на расстоянии 4 м от излучающей антенны. На входе детекторов установлены переменные аттенюаторы и полосовой фильтр перед одним из детекторов с полосой пропускания на уровне половинной мощности 30–40 МГц. Сигналы через линии

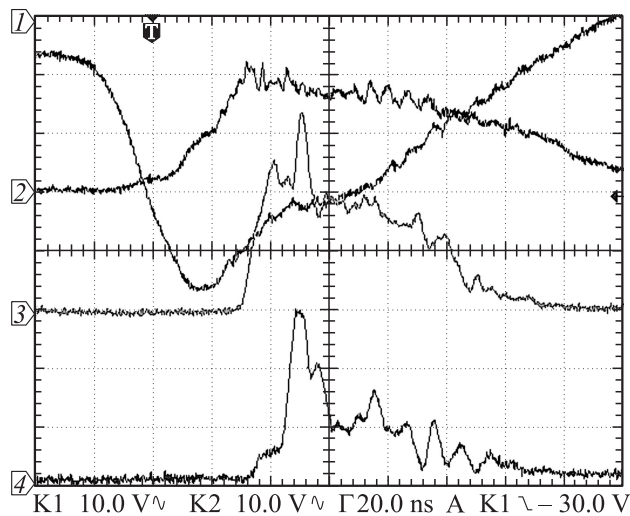


Рис. 2. Синхронизованные осциллограммы импульсов напряжения (луч 1), тока (луч 2), СВЧ-детектора (луч 3) и СВЧ-детектора с установленным перед ним фильтром (луч 4).

задержки и резистивные делители подавались на входы осциллографа Tektronix TDS 3044B. Для уменьшения мощности паразитного $3\pi/4$ -вида эксперименты проводились при максимальном магнитном поле, поскольку π -вид обладает наибольшим замедлением электромагнитной волны.

Предварительно был выполнен эксперимент с РМ с несвязанными выводами для определения длин волн видов колебаний, которые использовались в расчетах длины канала связи. Оценить вид колебаний позволили эксперименты с использованием внешнего канала связи с установленным в нем Н-тройником. В случае антисимметричного включения тройника при длине канала 168 см было получено излучение с длиной волны 10.25 см мощностью 250 MW, что соответствует возбуждению π -вида колебаний. Относительно этого уровня мощности будет оцениваться эффективность использования устройства. После сборки канала связи с симметричным расположением тройника мощность излучения π -вида колебаний не превышала 35 MW (для ее оценки

использовался детектор с установленным перед ним полосовым фильтром, настроенным на длину волны π -вида колебаний). Таким образом, экспериментально не удалось добиться полного запираения тройником этого вида колебаний. В канал связи резонаторов на расстоянии 11 см от оси волноводного Н-тройника помещалась тефлоновая пластина (разрядник). На рис. 2 представлены синхронизованные осциллограммы напряжения тока и СВЧ-излучения, полученные с использованием детекторов. Детектор (луч 3) регистрирует излучение во всем диапазоне частот, т.е. излучение как π , так и $3\pi/4$ -видов колебаний. Второй приемный детектор (луч 4) имел на входе полосовой фильтр, настроенный на частоту излучения π -вида колебаний. Из осциллограмм видно, что π -вид и $3\pi/4$ -вид начинаются одновременно, но в начальный период времени уровень выводимой мощности для π -вида колебаний (35 MW) значительно ниже, чем для $3\pi/4$ -вида колебаний (180 MW). Процесс накопления энергии до срабатывания разрядника составляет около 14 ns, что примерно соответствует двойному времени пробега волн между противоположными резонаторами, которого достаточно для формирования стоячей волны. Срабатывание разрядника (пробой по его поверхности в вакууме) приводит к формированию короткого импульса, регистрируемого обоими детекторами. Длительность пика выходного импульса на уровне половины выходной мощности равна ~ 10 ns, что соответствует времени двойного пробега электромагнитной волны по резонатору длиной 0.95 m (расстояние между окном связи в резонаторе анодного блока и разрядником). Мощность выходных импульсов, излучаемых антенной, достигает 500 MW, что в 2 раза выше мощности импульсов релятивистского магнетрона без исследованного устройства.

Первые эксперименты показали перспективность исследованной конструкции РМ с внешним каналом связи, используемым в качестве накопительного резонатора, позволяющей существенно упростить экспериментальную схему в сравнении с [1]. При соответствующих настройках, связанных с использованием управляемого газового СВЧ-разрядника с целью удлинения времени накопления энергии в резонаторе, возможно увеличение выходных параметров релятивистского магнетрона.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-98018p_сибирь_a.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Винтизенко И.И., Мащенко А.И. и др. // ДАН. 1999. Т. 366. № 5. С. 619–621.
- [2] Винтизенко И.И. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 1. С. 115–120. (*Vintizenko I.I. // Technical Physics. 2014. V. 59. N 1. P. 113–118.*)
- [3] Винтизенко И.И., Новиков С.С. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 11. С. 95–104. (*Vintizenko I.I., Novikov S.S. // Technical Physics. 2010. V. 55. N 11. P. 1642–1651.*)