

КОАКСИАЛЬНЫЙ ВИРКАТОР TE_{10} ВОЛНЫ

Нгуен Мань Хынг

Томский политехнический университет

hungnm.k52tnvkt@gmail.com

Введение

Коаксиальные виркаторы являются генераторами мощных импульсов электромагнитного излучения (100 МВт – 10 ГВт) в сантиметровом диапазоне длин волн с гигаваттным уровнем мощности [1-4], которые представляют интерес благодаря малым весо-габаритным характеристикам, простоте конструкции, отсутствию внешнего фокусирующего магнитного поля. В этих генераторах формирование виртуального катода (ВК) и СВЧ излучение происходит в одном и том же сверхразмерном резонансном объеме. Поэтому при конструировании генератора выбор моды, с которой будет осуществляться взаимодействие осциллирующих электронов пучка и ВК, является важным условием генерации в одномодовом режиме. На возможность генерации электромагнитного излучения в коаксиальном виркаторе с расходящимся пучком было указано в работах [2-4]. Наибольший интерес представляет возбуждение колебаний на низшем типе волны TE_{10} моде и эффективного вывода электромагнитной энергии в одномодовом режиме.

В данной работе проводится теоретическое исследование коаксиального виркатора с радиально расходящимся электронным пучком. С применением метода крупных частиц (PIC код KARAT [5]) и численного решения электродинамической задачи исследуются возбуждение электромагнитных колебаний, спектр частот, передача энергии волны в электродинамической системе виркатора и условие одномодового режима генерации TE_{10} волны.

Экспериментальная установка

В настоящее время коаксиальный виркатор TE_{10} волны разрабатывается в лаборатории Жерлицына А.Г. в Физико-техническом институте Томского политехнического университета. Схема экспериментальной установки состоит из высокопоточного электронного ускорителя прямого действия с двойной формирующей линией и коаксиального виркатора (рис. 1). Ускоритель формирует на нагрузке, которой является коаксиальный виркатор, импульс напряжения 500 кВ длительностью ~120 нс. На рис. 1 показана схема экспериментального коаксиального виркатора.

Катод выполнен в виде диска диаметром 11 см и находится под потенциалом земли. Конструкция катода позволяет изменять ширину его эмитирующей поверхности от 0,8 см до 4 см. Цилиндрический анод диаметром 13,4 см выполнен из металлической сетки с геометрической прозрачностью ~0,7 и находится под высоким положительным потенциалом. Радиально расходящийся электронный пучок взаимодействует с соб-

ственными модами резонансной системы виркатора, от конфигурации которого зависит тип волны на выходе системы.

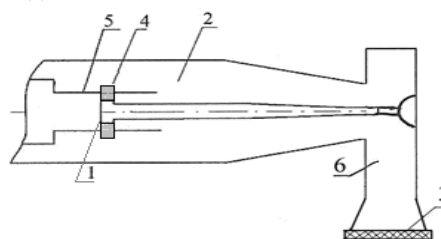


Рис. 1. Схема экспериментального виркатора 1) катод; 2) вакуумная камера; 3) выходное окно; 4) электронный пучок; 5) анод-сетка; 6) коаксиально-волноводный переход - прямоугольный волновод.

Численное моделирование

Теоретически получена оценка уровня резонансного взаимодействия колебаний виртуального катода с собственными модами электродинамической структуры коаксиального виркатора, мощность и эффективность излучения которого определяются геометрической функцией и ускоряющим напряжением. Показано, что наиболее эффективное взаимодействие аксиально-симметричного электронного пучка осуществляется с TE_{10} волной при выполнении для нее резонансного условия [4].

Методом крупных частиц исследовано формирование виртуального катода в коаксиальном виркаторе и возбуждение электромагнитных колебаний. Было проведено исследование влияния длины катода на ток и характеристики электромагнитного излучения в виркаторе при диодном зазоре 1,2 см. Получено, что ток и мощность излучения виркатора имеют нелинейную зависимость от длины катода h (рис. 2а).

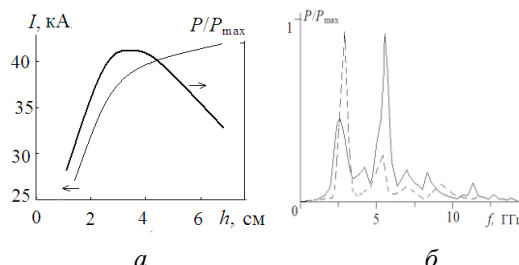


Рис. 2. Расчетные зависимости тока и мощности излучения от длины катода (а), спектр частот мощности излучения (б)

Это обусловлено влиянием в диодном зазоре собственного магнитного поля на траектории и спектр частоты колебаний электронов и виртуального катода. На рис. 2а показаны расчетная зависимость относительной мощности излучения

(виркатор без изменения поперечных размеров, длина 50 см). На рис. 2б показан спектр частот возбуждаемого электромагнитного излучения при длине катода 2,4 см (пунктирная линия) и 7 см (сплошная линия).

В коаксиальном виркаторе могут возбуждаться волны типа ТМ, ТЕ и ТЕМ. Низший тип колебаний имеет волна ТЕМ (критическая частота равна нулю), первым высшим типом волны в коаксиальной линии при любом диаметре и конфигурации внутреннего проводника является волна TE_{11} . При выполнении резонансного условия аксиально-симметричный пучок в коаксиальном виркаторе взаимодействует с аксиально-симметричными модами и с ТЕМ модой. Однако асимметрия пучка, которая может возникнуть из-за неточной юстировки электродов или неоднородности плотности плазмы на взрывоэмиссионном катоде, могут привести к возбуждению дополнительных аксиально-несимметричных мод. При этом, как показано в работе [4], волна TE_{11} имеет наибольший инкремент нарастания неустойчивости среди несимметричных мод. С помощью неоднородной геометрии коаксиального виркатора (рис. 1 и рис. 3) можно решить вопрос селекции мод. На рис. 4 показана частотная зависимость коэффициента передачи энергии нескольких волн в электродинамической системе виркатора без коаксиально-волноводного перехода - прямоугольного волновода. Как видно из рис. 4, наибольший коэффициент передачи энергии имеет волна ТЕМ. Критическая частота волны TE_{11} 3,4 ГГц, поэтому в диапазоне частот < 3,4 ГГц несимметричные моды отсутствуют на выходе узкой области виркатора. Волна ТЕМ имеет близкую конфигурацию поля с волной TM_{01} , поэтому при передаче энергии волны TM_{01} (критическая частота 1,37 ГГц в широкой области, в узкой области – более 6 ГГц) она трансформируется в волну ТЕМ (кривая 3 рис. 3).

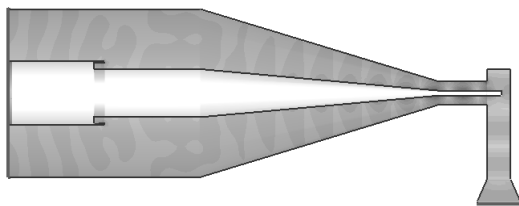


Рис. 3. Распределение электрического поля в электродинамической системе виркатора

Коаксиально-волноводный переход предназначен для трансформации волны ТЕМ в волну TE_{10} . На рис. 5 показана частотная зависимость коэффициента передачи волны ТЕМ в коаксиальном виркаторе (рис. 3), поперечные размеры прямоугольного коаксиально-волноводного перехода $5 \times 10 \text{ см}^2$. Как видно из рис. 5, для данной геометрии системы наиболее оптимальный частотный диапазон 2,5-2,9 и 3,1-3,2 ГГц, в котором коэффи-

циент передачи энергии волны ТЕМ не ниже 0,7. На рис. 3 показано распределение электрического поля в виркаторе на частоте 2,5 ГГц.

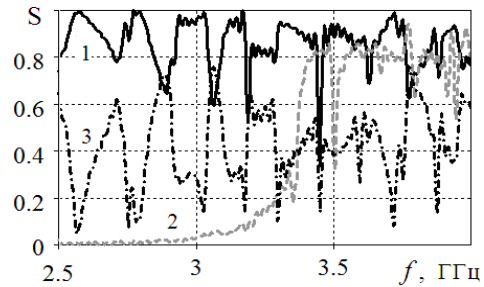


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента передачи энергии волн в виркаторе без прямоугольного волновода: 1 – ТЕМ, 2 – TE_{11} , 3 – TM_{01}

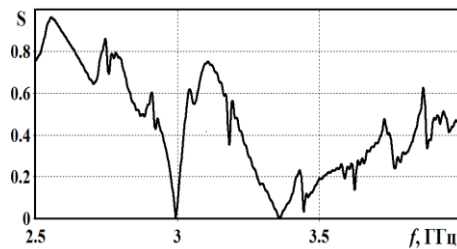


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента передачи энергии волны ТЕМ

Заключение

Проведено теоретическое исследование условия одномодового режима генерации TE_{10} волны в коаксиальном виркаторе с симметричным радиально расходящимся пучком. Показано, что резонансное взаимодействие электронного пучка наиболее эффективно осуществляется с ТЕМ-модой, которая трансформируется в TM_{01} волну в прямоугольном коаксиально-волноводном переходе. Для геометрических размеров экспериментального виркатора наиболее оптимальные длина катода 2,5 см и частотный диапазон 2,5-2,9 ГГц.

Литература

1. D J. Bedford, D. Price, D. Price and D. Bromley // J. Appl. Phys. -1987. – V.61. – P. 2098–2100.
2. Zherlitsyn A.G. // Letters in JTF (Russian). – 1990. – V. 16. – No. 22. – P. 78–80.
3. W. Jiang, K. Woolverton, J. Dickens, M. Kristiansen // IEEE Trans. on Plasma Science. -1999. -V.27. – №5. – P.1538–1542.
4. Koval T.V., Zherlitsyn A.G., Nguen M.T., Kanaev G.G. Study of Electrodinamic and Radiation Characteristics of Coaxial and Planar-Coaxial Vircator // Izvestia vuzov. Physics. – 2012 – V. 55 – No. 10/3. – P. 221–224.
5. Tarakanov V.P. // User's Manual for Code KAR-AT Springfield. VA: Berkley Research Associates Inc. 1992.