

**Преобразователь моды излучения TEM_{01} в моду H_{11}
для плазменного релятивистского СВЧ-генератора**

С. Е. Андреев, Н. Н. Богачев

Плазменный релятивистский СВЧ-генератор (ПРГ) позволяет получать излучение в диапазоне частот от 2 до 25 ГГц с мощностью 50–100 МВт. Актуальной задачей исследования ПРГ является оптимизация характеристик выходного тракта. При выведении мощного излучения ПРГ в пространство необходимо преобразование волны TEM_{01} в волну H_{11} или H_{10} . Для этого в выходном тракте ПРГ используется преобразователь мод. В данной работе предложена новая конструкция преобразователя волны типа TEM_{01} в волну типа H_{11} . Была построена модель предложенного преобразователя. По результатам численного моделирования получены значения коэффициента передачи S_{21} и коэффициента преобразования мод. Показано, что новая конструкция преобразователя имеет улучшенные коэффициенты передачи и преобразования мод в области частот 10–16 ГГц по сравнению с используемой в настоящее время.

Ключевые слова: плазменная электроника, плазменный релятивистский генератор, СВЧ-излучение, типы волн, высокомоощный преобразователь типов волн.

Введение

В последнее время большое внимание уделяется разработке и созданию мощных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов с широким диапазоном частот излучения. Одно из решений данной задачи – использование плазменных релятивистских источников СВЧ-излучения.

Согласно теории и экспериментальным исследованиям [1–4], плазменный релятивистский СВЧ-генератор (ПРГ) обладает возможностью перестройки частоты СВЧ-излучения в очень широком диапазоне. Регулировка частоты выходного сигнала ПРГ происходит за счет изменения концентрации плазмы. В частности, в работе [5] удалось добиться перестройки частоты в 7 раз (от 4 до 28 ГГц) на уровне мощности около 50 МВт за

промежуток времени 30 мкс благодаря изменению концентрации плазмы.

В процессе работы ПРГ был выявлен ряд задач, требующих инженерного решения. Одной из важнейших таких задач является создание сверхширокополосных компонентов данного генератора, которые смогли бы стабильно функционировать в рабочем диапазоне частот при сохранении большой мощности СВЧ-излучения. Важным компонентом ПРГ является выходной преобразователь мод. Это устройство является связующим звеном между рупорной антенной, выводящей полученное в результате работы ПРГ СВЧ-излучение в открытое пространство, и рабочей областью генератора, где происходит взаимодействие релятивистского электронного пучка и плазмы. При генерации на выходе рабочей области ПРГ получается электромагнитная волна, имеющая структуру моды TEM_{01} коаксиального волновода. Выходной сверхширокополосный преобразователь мод является фидером для используемой конусообразной рупорной антенны, для обеспечения работы которой получаемая мода TEM_{01} не подходит. Поэтому данный СВЧ-узел должен преобразовывать полученную моду коаксиального волновода в моду H_{11} круглого волновода или H_{10} прямоугольного волновода. Мода H_{11} круглого волновода является стандартной для питания конусообразных рупорных антенн и обеспечивает наилучшие показатели вывода полученного СВЧ-излучения в открытое пространство. Мода H_{10} обычно используется для питания рупорной антенны типа усеченной пирамиды.

Андреев Сергей Евгеньевич^{1,2,3}, младший научный сотрудник, аспирант, старший преподаватель.

Богачев Николай Николаевич^{1,2,3}, младший научный сотрудник, старший преподаватель.

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (ИОФ РАН).

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. +7(499) 503-82-36. E-mail: bgniknik@yandex.ru

² Московский технологический университет (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

³ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова.

Россия, 117997, Москва, ул. Островитянова, 1.

E-mail: funkmonk@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 5 октября 2017 г.

В данный момент в ПРГ используется конусообразная рупорная антенна и выходной преобразователь моды TEM_{01} в моду H_{11} , однако он предназначен для работы в низкочастотной области диапазона рабочих частот (2–6 ГГц). Для наиболее полного использования возможностей перестройки частоты в сверхшироком диапазоне частот необходимо усовершенствование преобразователя мод ПРГ и расширение рабочего диапазона в область более высоких частот (6–16 ГГц). В работе [6] была предложена конструкция преобразователя моды TEM_{01} в моду H_{10} . Предложенная ранее конструкция позволяет расширить рабочий диапазон преобразователя в область частот 6–12 ГГц, но является сложной для практической реализации и требует внесения значительных конструктивных изменений в выходной тракт ПРГ, а также замены конусообразной рупорной антенны на пирамидальную.

Задачей настоящего исследования было разработать конструкцию преобразователя моды TEM_{01} в моду H_{11} , позволяющую расширить диапазон рабочих частот в область 6–16 ГГц без замены антенны и значительного изменения конструкции выходного тракта ПРГ.

Далее проведём сравнительное рассмотрение конструкции используемого и предлагаемого выходного преобразователя мод ПРГ.

Используемая конструкция выходного преобразователя мод

Используемый в настоящее время в выходном тракте ПРГ преобразователь моды TEM_{01} в моду H_{11} имеет довольно простое конструктивное исполнение и представляет из себя плавный переход из коаксиального волновода в круглый. Переход осуществляется посредством плавного соединения внутреннего проводника коаксиального волновода, идущего из рабочей области генератора, с внешним проводником. Данное соединение осуществляется под углом 15 градусов между трубкой внутреннего проводника и стенкой внешнего проводника, как показано на рис. 1. Далее стенка внешнего проводника коаксиального вол-

новода используется уже в качестве стенки круглого волновода. Внутренняя полая часть трубки внутреннего проводника используется для размещения проводов, необходимых для работы коллектора релятивистского электронного пучка (РЭП), или проводов для питания катода плазменного источника (в зависимости от конкретной конструкции ПРГ).

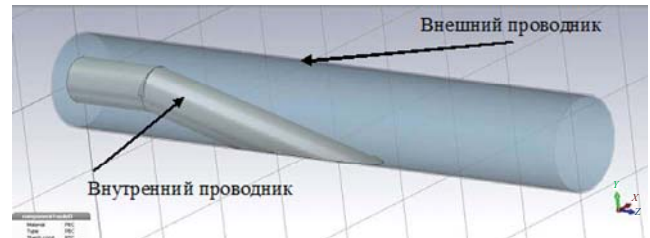


Рис. 1. Конструкция используемого выходного преобразователя мод в программном комплексе CST Studio Suite 2015.

Предлагаемая конструкция выходного преобразователя мод

Предлагаемая новая конструкция преобразователя моды TEM_{01} в моду H_{11} основана на той же концепции, что и используемая сейчас конструкция, а именно, коаксиальный волновод плавно переходит в круглый посредством соединения внутреннего проводника с внешним. Однако в нашем случае внутренний проводник цилиндрической формы меняет ее на форму половины цилиндра со сглаженными краями, как показано на рис. 2. Данное решение позволяет сначала преобразовать симметричную моду TEM_{01} коаксиального волновода в несимметричную, что уменьшает отражение от соединения внутреннего и внешнего проводника. Далее этот внутренний проводник соединяется с внешним проводником под углом 10 градусов (в отличие от предыдущего, где использовался угол в 15 градусов). Также для уменьшения отражения и увеличения коэффициента преобразования между внутренним и внешним проводником вводится подпорка из цилиндрического проводника, также показанная на рис. 2.



Рис. 2. Конструкция предлагаемого выходного преобразователя мод в программном комплексе CST Studio Suite 2015.

Численное моделирование выходного преобразователя мод

Для выполнения поставленной выше задачи использовался программный комплекс CST Studio Suite 2015, который представляет собой широко известный набор инструментов для проектирования, моделирования и проведения оптимизации трехмерных электромагнитных систем. В этом программном комплексе была создана модель существующего преобразователя мод и модель но-

вого преобразователя. В ходе разработки и моделирования была осуществлена также подборка геометрии и геометрических параметров преобразователя с целью достижения оптимальных характеристик работы в необходимом нам диапазоне частот.

Параметры моделирования используемого преобразователя мод указаны в табл. 1, параметры моделирования нового преобразователя мод представлены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры моделирования используемого преобразователя

Максимальное количество интерполяций	10	Шаг частотной сетки	10 МГц
Отклонение S-параметров	0,05	Начальная частота обработки	1,5 ГГц
Количество возбуждаемых мод на входе/выходе	6/25	Конечная частота обработки	20 ГГц
Количество тетраэдров в разбиении модели	105181	Тип перестройки частоты	Интерполяционный

Таблица 2

Параметры моделирования нового преобразователя

Максимальное количество интерполяций	10	Шаг частотной сетки	10 МГц
Отклонение S-параметров	0,05	Начальная частота обработки	15 ГГц
Количество возбуждаемых мод на входе/выходе	6/25	Конечная частота обработки	20 ГГц
Количество тетраэдров в разбиении модели	154780	Тип перестройки частоты	Интерполяционный

Результаты численного моделирования выходного преобразователя мод

В результате моделирования были получены для обоих преобразователей амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) в виде зависимости

коэффициента прохождения S_{21} от частоты f , представленные на рис. 3. Соответственно на рис. 4 для обоих преобразователей показана частотная зависимость коэффициента преобразования из моды TEM_{01} в моду H_{11} .

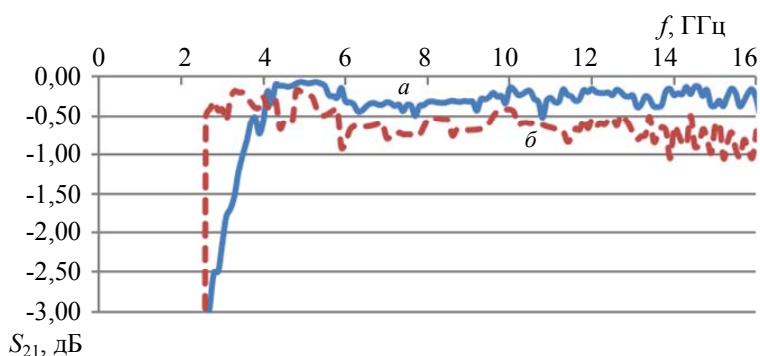


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики выходных преобразователей мод в виде зависимости коэффициента прохождения S_{21} от частоты: а – предлагаемый преобразователь, б – используемый преобразователь.

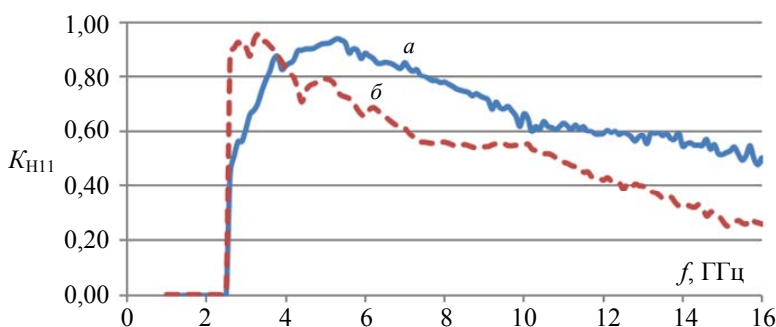


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента преобразования K_{H11} в моду H_{11} : а – предлагаемый преобразователь, б – используемый преобразователь.

Для используемого преобразователя значения коэффициента S_{21} (рис. 3, кривая *б*) в области от 2 до 6 ГГц в целом не хуже $-0,5$ дБ, а в области выше 6 ГГц значения коэффициента S_{21} находится в диапазоне от $-0,5$ дБ до -1 дБ. Для предлагаемой конструкции преобразователя значения коэффициента S_{21} (рис. 3, кривая *а*) в диапазоне от 4 до 16 ГГц не ниже $-0,5$ дБ, что говорит о лучшем прохождении волны через предложенный преобразователь по сравнению с используемым преобразователем. АЧХ предлагаемого преобразователя менее изрезанная, более гладкая и не имеет снижения в области частот 12–16 ГГц (см. рис. 4).

Как видно из графиков на рис. 4, предлагаемый преобразователь (кривая *а*) имеет заметно более высокий коэффициент преобразования моды TEM_{01} в моду H_{11} , чем используемый преобразователь (кривая *б*), в области выше 4 ГГц. Коэффициент трансформации у разработанного преобразователя выше 0,5 в диапазоне от 4 до 16 ГГц, что выше, чем у используемого преобразователя, на 10–30 % в зависимости от частоты. Всё это было достигнуто благодаря тому, что удалось заметно снизить коэффициент преобразования излучения в моды высших порядков, которые в данном случае являются нежелательными («паразитными»).

Заключение

В работе для плазменного релятивистского СВЧ-генератора с мощностью 50–100 МВт была разработана новая конструкция выходного преобразователя типов волн. С помощью комплекса САПР в виде пакета CST Studio Suite 2015 были созданы численные модели выходных преобразователей используемой и предлагаемой новой конструкции.

При сравнении результатов моделирования преобразователей двух конструкций было выявлено,

что предлагаемая новая конструкция преобразователя мод позволила получить АЧХ более гладкой формы и бóльший коэффициент передачи в области частот 6–16 ГГц. Одновременно также было уменьшено количество высших мод в выходном СВЧ-излучении, что привело, в конечном итоге, к увеличению коэффициента преобразования моды TEM_{01} в моду H_{11} .

Предложенный преобразователь можно использовать в экспериментах по получению от плазменного релятивистского генератора импульсов СВЧ-излучения с наносекундной длительностью в широком диапазоне частот и мощностью ~100 МВт.

Статья подготовлена по итогам исследования, проведенного в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-38-00949 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузелев М. В., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Шкварунец А. Г. // Успехи физических наук. 1985. Т. 146. № 8. С. 709.
2. Стрелков П. С., Ульянов Д. К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 4. С. 329.
3. Bogdankevich I., Ivanov I., Loza O., Strelkov P., Ulyanov D., Garate E. / Proc. of 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG'2007) (Prague, Czech Republic. 2007). P. 1194–1197.
4. Богданкевич И. Л., Иванов И. Е., Лоза О. Т., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Тараканов В. П., Ульянов Д. К. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 748.
5. Ульянов Д. К. Спектры плазменного релятивистского СВЧ-генератора: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: ИОФ РАН, 2000.
6. Андреев С. Е., Богачев Н. Н. / 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). Материалы конференции в 13 томах. (Севастополь. 2016). С. 1688–1694.

Converter from TEM_{01} into H_{11} mode of radiation for a plasma relativistic microwave generator

S. E. Andreev^{1,2,3} and N. N. Bogachev^{1,2,3}

¹ A. M. Prokhorov General Physic Institute of Russian Academy of Science
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: bgniknik@yandex.ru

² Moscow Technological University
78 Vernandsky av., Moscow, 119454, Russia

³ N. I. Pirogov Russian National Medical University
1 Ostrovityanova str., Moscow, 127994, Russia
E-mail: funkmonk@rambler.ru

Received October 5, 2017

The relativistic plasma microwave generator (RPG) produces radiation in the frequency range from 2 to 25 GHz with a power of 50–100 MW. The actual task of the RPG research is optimization of the characteristics of an output tract. When the powerful radiation of the RPG is radiated into space, the transformation of the TEM_{01} wave into the H_{11} or H_{10} wave is necessary. For this, a convertor is used in the output path of the RPG. In this paper, we propose a new design of the convertor of the TEM_{01} wave into a wave of the H_{11} type. A model of the proposed converter was constructed. Based on the results of numerical simulation, the values of the transmission coefficient S_{21} and the mode conversion coefficient are obtained. The new design of the converter has improved transmission coefficients and the mode conversion coefficients in the frequency range of 10–16 GHz in compare to the currently used.

Keywords: plasma electronics, relativistic plasma generator, microwaves, waves types, high-power converter types of waves.

REFERENCES

1. M. V. Kuzelev, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov, and A. G. Shkvarunets, *Sov. Phys.-Usp.* **28** (8), 724 (1985).
2. P. S. Strelkov and D. K. Ul'yanov, *Plasma Phys. Rep.* **26** (4), 303 (2000).
3. I. Bogdankevich, I. Ivanov, O. Loza, P. Strelkov, D. Ulyanov, and E. Garate, in *Proc. of 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG'2007)* (Prague, Czech Republic, 2007). P. 1194–1197.
4. I. L. Bogdankevich, I. E. Ivanov, O. T. Loza, A. A. Ruhadze, P. S. Strelkov, V. P. Tarakanov, and D. K. Ul'janov, *Plasma Phys. Rep.* **28** (8), 748 (2002).
5. D. K. Ul'janov, *The spectrum of the plasma relativistic UHF-generator*. (C. Sc. Diss. Moscow: GPI RAN, 2000).
6. S. E. Andreev and N. N. Bogachev, in *Proc. of the 26-th International Crimean Conference "Microwave and Telecommunication Technology" (CriMiCo'2016)* (Sevastopol, 2016). P. 1688–1694.