

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ  
СИСТЕМЫ

УДК 621.372.825;621.372.814;537.86;533.9

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ НАПРАВЛЕННОСТИ  
ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО  
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА© 2021 г. Д. А. Сайфулин<sup>а, \*</sup>, С. Е. Андреев<sup>б, \*\*</sup>, Н. Н. Богачев<sup>б</sup>, Н. Г. Гусейн-заде<sup>а, б</sup><sup>а</sup>МИРЭА – Российский технологический университет,  
просп. Вернадского, 78, Москва, 119454 Российская Федерация<sup>б</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук,  
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Российская Федерация

\*E-mail: dsajfulin@inbox.ru

\*\*E-mail: funkmonk@rambler.ru

Поступила в редакцию 16.09.2020 г.

После доработки 27.02.2021 г.

Принята к публикации 01.03.2021 г.

Исследованы характеристики выходного тракта плазменного релятивистского СВЧ-генератора (ПРГ). Получена зависимость диаграммы направленности (ДН), коэффициента направленного действия (КНД) и передаточная характеристика от частоты в диапазоне 3...10 ГГц. Найдено значительное изменение формы ДН и увеличение КНД с ростом частоты и хорошее согласование передаточной характеристики в широком диапазоне частот. Показано, что в рассматриваемой системе вывода излучения необходимо осуществлять оптимальный выбор рабочей частоты ПРГ на основе компромисса между высоким значением КНД и искажением формы диаграммы направленности.

DOI: 10.31857/S0033849421090151

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач для современной радиотехники является создание сверхширокополосных устройств, которые могли бы стабильно функционировать в широком диапазоне частот при сохранении большой мощности СВЧ-излучения. Такими устройствами, в частности, являются плазменные релятивистские СВЧ-генераторы (ПРГ) [1–9]. Особенности ПРГ являются большой диапазон рабочих частот (от 2 до 25 ГГц), высокая мощность сигнала (50...100 МВт), возможность работы в режиме генерации одиночного импульса или в частотно-периодическом режиме, в режиме генерации монохроматического или широкополосного излучения. Для такого типа генератора актуальной задачей является проектирование и изучение характеристик его выходного тракта, состоящего из рупорной антенны и преобразователя мод. Целью данной работы было получение характеристик выходного тракта с помощью численного моделирования для проектирования оптимального выходного тракта. Такие генераторы могут работать в различных режимах [3, 6]:

- генерации одиночного импульса,
- частотно-периодическом,
- генерации монохроматической волны,
- генерации широкополосного сигнала.

Схема ПРГ с инверсной конфигурацией представлена на рис. 1 [2]. Работа ПРГ основана на черенковском взаимодействии релятивистских электронных пучков (РЭП) с медленной плазменной волной, в результате трубчатый РЭП передает энергию медленной плазменной волне, возникающей на трубчатой плазме. При черенковском взаимодействии в ПРГ, если скорость пучка равна фазовой скорости волны и длина волны специально подобрана, то возможна передача энергии от пучка к волне, вследствие чего в плазменном коаксиальном волноводе появляются медленные плазменные волны  $E_{01}$ ,  $E_{02}$  и т.д. В текущих экспериментах используется мода  $E_{01}$ . СВЧ-излучение возникает при плотности плазмы, превышающей пороговое

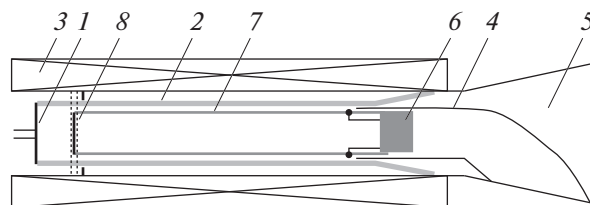


Рис. 1. Схема ПРГ инверсной конфигурации: 1 – взрывоэмиссионный катод, 2 – РЭП, 3 – соленоид, 4 – коаксиальный волновод, 5 – рупор, 6 – источник плазмы, 7 – плазма, 8 – ограничитель плазмы.

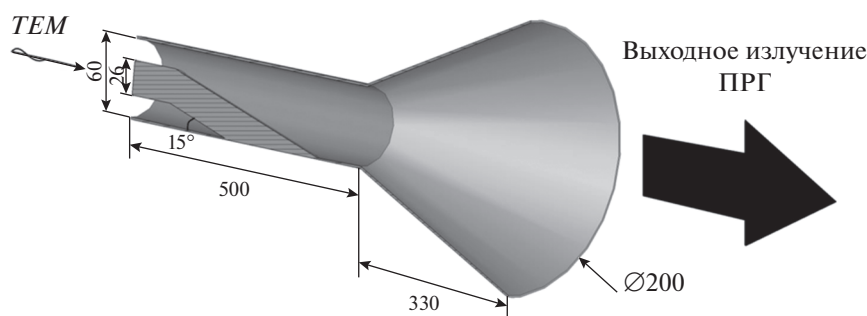


Рис. 2. Конструкция используемого выходного преобразователя типов волн с рупорной антенной.

значение. При работе генератора с трубчатой геометрией РЭП и плазменного волновода в выходном коаксиальном волноводе возбуждается мода  $TEM$ . Для вывода полученного излучения в открытое пространство возникает необходимость преобразовывать получаемую в генераторе моду  $TEM$  коаксиального волновода в моду  $H_{11}$  круглого волновода. Поэтому в качестве фидера для рупорной антенны используется выходной преобразователь мод. Конусообразная рупорная антенна с описанным выше фидером позволяет выводить СВЧ-излучение ПРГ в открытое пространство с достаточно низким коэффициентом отражения [9].

## 1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе совместно моделировались преобразователь типов волн, рассмотренный в работе [10], и рупорная антенна в виде конуса. Для начала подробно опишем объекты исследования.

Используемый в настоящее время в выходном тракте ПРГ преобразователь волны  $TEM$  в волну  $H_{11}$  имеет довольно простое конструктивное исполнение и представляет собой 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  $15^\circ$  между трубкой внутреннего проводника и стенкой внешнего проводника, как показано на рис. 2. Далее стенка внешнего проводника коаксиального волновода используется уже в качестве стенки круглого волновода.

После преобразователя в выходном тракте ПРГ идет рупорная антенна – устройство, выводящее полученное в ходе работы СВЧ-излучение в открытое пространство.

Рупорные антенны находят широкое применение в СВЧ-диапазоне волн как самостоятельные антенны, как облучатели линз и зеркал и как элементы фазированных антенных решеток (ФАР) [11].

Волноводно-рупорные антенны обладают следующими достоинствами: простотой конструкции, высоким КПД, хорошим согласованием с питающим фидером (для конического рупора  $K_c = 1.1 \dots 1.2$ ).

Практически рабочая полоса частот рупорной антенны ограничивается полосой питающего ее волновода и составляет около 100%. Однако широкое применение рупорных антенн ограничено их существенным недостатком: при больших значениях коэффициента направленного действия (КНД) ( $D_{max} > 100$ ) рупоры получаются громоздкими.

В данной работе рассматривается коническая рупорная антенна длиной 330 мм и диаметром раскрытия 200 мм (см. рис. 2).

## 2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для выполнения поставленной выше задачи был использован программный комплекс COMSOL Multiphysics, который представляет собой широко известный набор инструментов для проектирования, моделирования и проведения оптимизации трехмерных электромагнитных систем. В этом программном комплексе была создана модель выходного тракта ПРГ. Ниже приведены параметры моделирования используемого преобразователя мод:

|  |            |
|--|------------|
| –максимальное количество интерполяций      | 10         |
| –отклонение S-параметров                   | 0.02       |
| –количество возбуждаемых мод на входе      | 25         |
| –количество тетраэдров в разбиении моделей | 130 000    |
| –шаг частотной сетки                       | 1 ГГц      |
| –начальная частота обработки               | 3 ГГц      |
| –конечная частота обработки                | 10 ГГц     |
| –тип перестройки частоты                   | Дискретный |

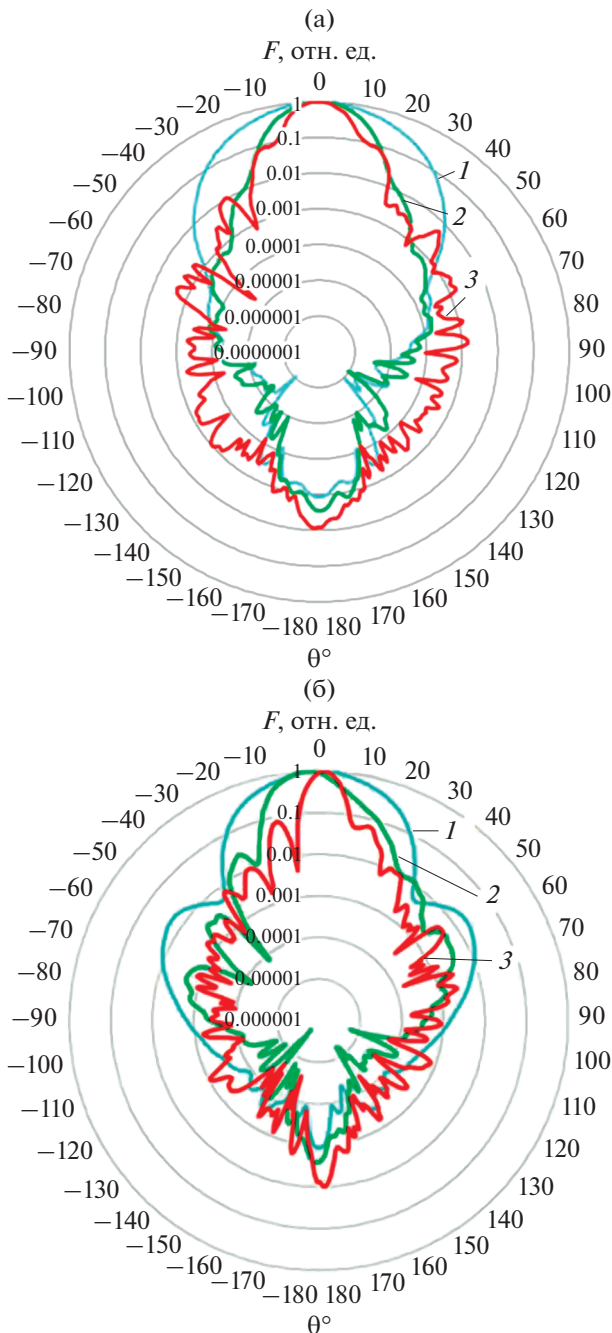


Рис. 3. Диаграммы направленности антенны в  $H$ - (а) и  $E$ -плоскостях (б).

В результате моделирования выходного тракта ПРГ получилась зависимость диаграммы направленности (ДН) в  $E$ - и  $H$ -плоскостях от частоты.

На графиках (рис. 3а и 3б) построены диаграммы направленности рупорной антенны при различных частотах (3, 9 и 10 ГГц) в  $E$ - и  $H$ -плоскостях. На рис. 4 приведена зависимость коэффициента направленного действия от частоты. Из приведенных результатов можно сделать вывод, что при увеличении частоты ширина ДН уменьшается и на высоких

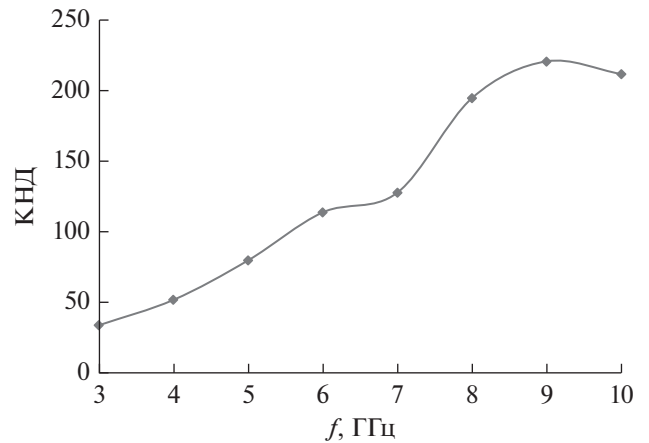


Рис. 4. Зависимость КНД от частоты для рупорной антенны с преобразователем мод.

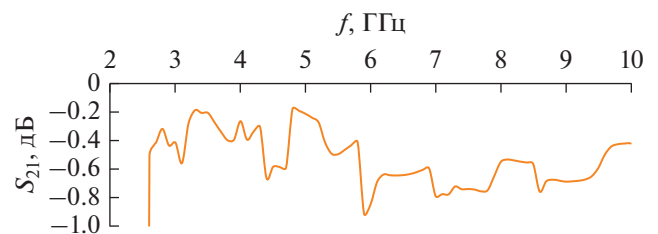


Рис. 5. Зависимость параметра  $S_{21}$  от частоты для исследуемого СВЧ-узла.

частотах ДН в  $E$ -плоскости отклоняются максимум на  $3^\circ$ . Одновременно с этим КНД возрастает с увеличением частоты до 9 ГГц. Все перечисленное выше происходит из-за того, что на этих частотах волна преобразуется не только в  $H_{11}$ , но и в более высокие моды. При этом стоит отметить, что на частотах 9 и 10 ГГц появляются заметные боковые лепестки. КНД на частоте 9 ГГц больше, а диаграмма направленности уже, чем на частоте 10 ГГц.

Из [10] известен модовый состав излучения на выходе преобразователя, на основании графиков, приведенных там же, можно сделать вывод, что в полосе частот 2...5 ГГц излучение ПРГ в основном преобразуется в моду  $H_{11}$ , а после эта энергия расходуется на преобразование в другие моды. Данные подтверждаются экспериментом, описанным в работе [12]. Как видно из графиков (см. рис. 3) на частоте 3 ГГц нет отклонений максимума ДН и заметных боковых лепестков, а на высоких частотах появляются отклонения максимума ДН в  $E$ -плоскости и заметные боковые лепестки. Связано это с преобразованием выходного излучения в несимметричную  $E$ -моду на более высоких частотах. Таким образом, при выборе частоты работы ПРГ нужно найти компромисс между высоким значением КНД, уровнем боковых лепестков и возможным отклонением ДН.

Как видно из рис. 5 данный СВЧ-узел имеет хорошее согласование в диапазоне частот от 3 до

10 ГГц, так как значение параметра  $S_{21}$  в диапазоне 3...10 ГГц не опускается ниже –1 дБ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено численное моделирование частотной зависимости характеристик и параметров выходного тракта плазменного релятивистского генератора. Выходной тракт состоял из преобразователя типов волн выходного излучения ПРГ (из *ТЕМ*-моды в моды круглого волновода) и конической рупорной антенны. В результате расчетов была получена зависимость диаграммы направленности, коэффициента направленного действия и передаточная характеристика от частоты в диапазоне 3...10 ГГц. Было обнаружено значительное изменение формы ДН и увеличение КНД с ростом частоты. Анализ полученных данных показал, что в рассматриваемой системе вывода излучения необходимо осуществлять оптимальный выбор рабочей частоты ПРГ на основе компромисса между высоким значением КНД и искажением формы диаграммы направленности. Для улучшения параметров значений КНД и уменьшения ширины ДН следует использовать параболическое зеркало на выходе выходного тракта ПРГ, тогда значительно увеличится КНД и уменьшится диаграмма направленности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузелев М.В., Лоза О.Т., Рухадзе А.А. и др. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 8. С. 710.
2. Ернылева С.Е., Булейко А.Б., Ульянов Д.К., Лоза О.Т. // Прикладная физика. 2017. № 2. С. 9.
3. Vuleyko A.B., Gusein-zade N.G., Loza O.T. // Phys. Wave Phenomena. 2018. V. 26. № 4. P. 317. <https://doi.org/10.3103/S1541308X18040118>
4. Булейко А.Б., Лоза О.Т., Ульянов Д.К. // Физическое образование в вузах. 2018. Т. 24. № 1. С. 136.
5. Vuleyko A.B., Ponomarev A.V., Loza O.T., Ulyanov D.K. // Phys. Wave Phenomena. 2019. V. 27. № 4. P. 257. <https://doi.org/10.3103/S1541308X19040022>
6. Андреев С.Е., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 7. С. 645. <https://doi.org/10.1134/S0367292119070023>
7. Bogandkevich I.L., Andreev S.E., Gusein-zade N.G., Ulyanov D.K. // J. Russ. Laser Research. 2019. V. 40. № 5. P. 435. <https://doi.org/10.1007/s10946-019-09824-1>
8. Ulyanov D.K., Bogdankevich I.L., Ernyleva S.E., Andreev S.E. // Plasma Phys. Rep. 2019. Т. 45. № 10. P. 980. <https://doi.org/10.1134/S1063780X19080117>
9. Стрелков П.С. // Успехи физ. наук. 2019. Т. 189. № 5. С. 494. <https://doi.org/10.3367/UFNг.2018.09.038443>
10. Андреев С.Е., Богачев Н.Н. // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 15.
11. Будагян И.Ф., Дубровин В.Ф., Сигов А.С. Электродинамика: учебное пособие для вузов. М.: Альфа-М, 2015.
12. Андреев С.Е., Алексеев И.С., Иванов И.Е. и др. // Инженерная физика. 2016. № 5. С. 20.