

13.4

Селективное устройство для ввода сигнала в сильнооточный релятивистский черенковский усилитель

© Ю.Ю. Данилов, Э.Б. Абубакиров, А.П. Конюшков

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
E-mail: danilov@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 26 марта 2020 г.

В окончательной редакции 22 июня 2020 г.

Принято к публикации 23 июня 2020 г.

Селективное однонаправленное возбуждение цилиндрического волновода через боковую стенку исследовано применительно к вводу сигнала в миллиметровый сильнооточный релятивистский черенковский усилитель. Найдено соотношение параметров устройства ввода, обеспечивающее максимальное преобразование основной моды прямоугольного волновода в однонаправленную низшую осесимметричную моду цилиндрического волновода. Эффективность преобразования в отсутствие омических потерь достигает 97.5%. Устройство ввода, адаптированное к конструкции 35.5 GHz-усилителя, реализовано с эффективностью 75%.

Ключевые слова: селективное устройство, ввод сигнала, низшая осесимметричная мода, сильнооточный усилитель, миллиметровый диапазон волн.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.18.50004.18310

В последнее время возрос интерес к усилителям субгигаваттного уровня мощности миллиметрового диапазона длин волн для различных приложений, что нашло отражение, например, в [1]. Наиболее эффективными в длинноволновой области миллиметрового диапазона являются приборы, основанные на индуцированном черенковском излучении прямолинейных электронных пучков [2–4]. Они сочетают простоту формирования таких пучков с высокими значениями импульсной мощности выходного излучения и коэффициента усиления. В качестве рабочей волны таких устройств наиболее часто используется низшая осесимметричная мода цилиндрического волновода E_{01} . Ее возбуждение требует особого подхода, поскольку конструкция устройства ввода должна быть совместима с сильнооточным релятивистским электронным пучком. Это обстоятельство делает неприемлемыми известные возбудители моды E_{01} [5,6], а использовавшийся в [2] квазиоптический ввод внешнего сигнала посредством зеркала является громоздким и малоэффективным. В связи с этим дальнейшее развитие таких приборов требует создания компактного и эффективного устройства ввода сигнала.

Для создания селективного однонаправленного устройства ввода через боковую стенку необходимо не менее двух возбуждающих элементов, в которых электрическое поле ориентировано параллельно оси цилиндрического волновода. Эти два элемента возбуждения создаются посредством 3 dB-разветвления питающего одномодового прямоугольного волновода, который согласуется с источником введением индуктивной диафрагмы. Однонаправленность моды E_{01} достигается посредством ступенчатого резонансного расширения [7], которое селективно отражает мощность, первоначально

распространяющуюся в цилиндрическом волноводе в обратном направлении.

Очевидно, что оптимальное расстояние между центрами элементов, возбуждающих волновод, должно составлять $\sim n\lambda_w/4$, где λ_w — волноводная длина волны моды E_{01} . Выбор натурального нечетного числа n обусловлен компромиссом между максимально возможными размерами устройства ввода, определяемыми конфигурацией усилителя, и необходимостью внесения дополнительных элементов для подавления основной моды цилиндрического волновода H_{11} . С этой целью к цилиндрическому волноводу со стороны, противоположной от элементов возбуждения, присоединяются два закороченных прямоугольных волновода с той же ориентацией электрического поля в поперечном сечении.

Выбранный способ возбуждения цилиндрического волновода не позволяет надежно дискриминировать паразитные E -моды. Рабочая мода E_{01} должна быть единственной распространяющейся E -модой, поэтому верхняя граница радиуса цилиндрического волновода R_w определяется исходя из условия нераспространения моды E_{11} . Нижняя граница радиуса R_w определяется максимальным радиусом электронного пучка, транспортируемого в усилителе.

Поиск соотношения параметров устройства ввода, обеспечивающего максимальное преобразование основной моды прямоугольного волновода в однонаправленную моду E_{01} цилиндрического волновода, был осуществлен в предположении его использования в сильнооточном двухпроходном усилителе Ка-диапазона [8]. Содержание паразитных мод на рабочем выходе устройства ввода не должно было превышать 1%. Размеры устройства ввода по всем трем координатам были ограничены в пределах 5λ , где λ — рабочая длина волны в свободном

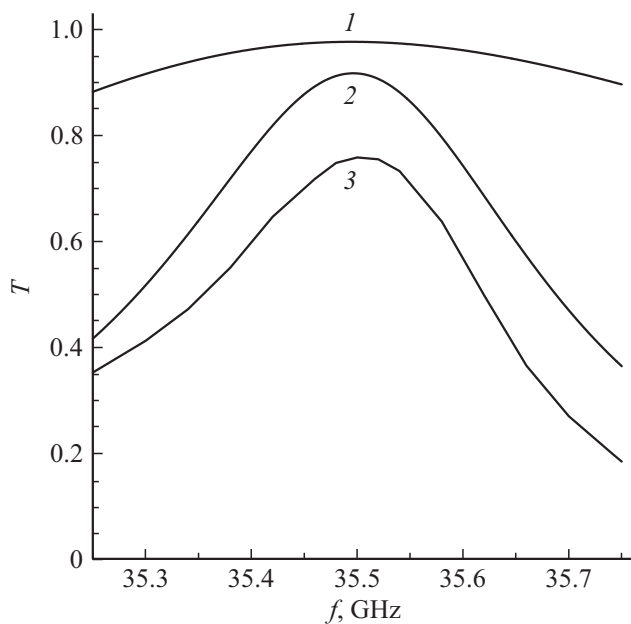


Рис. 1. Частотные зависимости мощности моды E_{01} на рабочем выходе устройства ввода: теоретические (1 — $R_w = 4.3$ mm, 2 — $R_w = 5$ mm) и измеренная (3 — $R_w = 5$ mm).

пространстве. Оптимизация устройства ввода была проведена посредством кода ANSYS Electromagnetic Suite [9] на частоте 35.5 GHz в пренебрежении омическими потерями. Учет омических потерь понижает эффективность устройства ввода, но их влияние на оптимальное соотношение параметров пренебрежимо мало.

На рис. 1 приведены нормированные на исходную мощность частотные зависимости моды E_{01} на рабочем выходе оптимизированных в отсутствие омических потерь устройств ввода с радиусами цилиндрического волновода 4.3 и 5 mm. Они соответствуют распространению в волноводе паразитной моды H_{21} вблизи и вдали от ее критической частоты. В первом случае эффективность возбуждения моды E_{01} достигает 97.5%. Основной паразитной модой на рабочем выходе является мода H_{11} (1%), на нерабочем выходе — мода H_{21} (1.3%). Увеличение радиуса волновода до 5 mm понижает эффективность устройства ввода до 91.5%. Основной паразитной модой на рабочем выходе становится мода H_{21} (1%), доля мощности на нерабочем выходе составляет 7.3%, причем на моду H_{21} приходится 6.5%. Оптимальные размеры прямоугольных каналов ввода слабо зависят от выбора радиуса цилиндрического волновода.

Устройство ввода предполагается использовать в усилителе с максимальным радиусом электронного пучка, равным 4.5 mm, поэтому приемлемым является радиус цилиндрического волновода, равный 5 mm. Оптимальная конфигурация 35.5 GHz-устройства ввода показана на рис. 2, его тестовый образец — на рис. 3. Для согласования с анодом на нерабочем выходе устройства ввода

(рис. 2) за ступенчатым расширением радиусом 6.9 mm было внесено дополнительное коническое расширение цилиндрического волновода до радиуса 11 mm. Цилиндрический волновод, транспортирующий электронный пучок в усилителе, был изготовлен из нержавеющей стали, чтобы избежать экранировки импульсного магнитного поля соленоида [10], остальные компоненты устройства ввода были из меди. Омические потери в этих компонентах устройства ввода (рис. 2) определяются каналом 4, сечение которого, равное 7.2×1 mm, является наименьшим по сравнению с другими прямоугольными каналами: 5 — 7.2×3.4 mm, 6 — 3.5×3.4 mm, 7 — 7.2×3 mm, 8 — 7.2×2.9 mm.

Структура поля на рабочем выходе устройства ввода была установлена вращением рупора, последовательно ориентированного на прием излучения мод E_{01} , H_{11} и H_{21} . Частотная зависимость мощности моды E_{01} на ра-

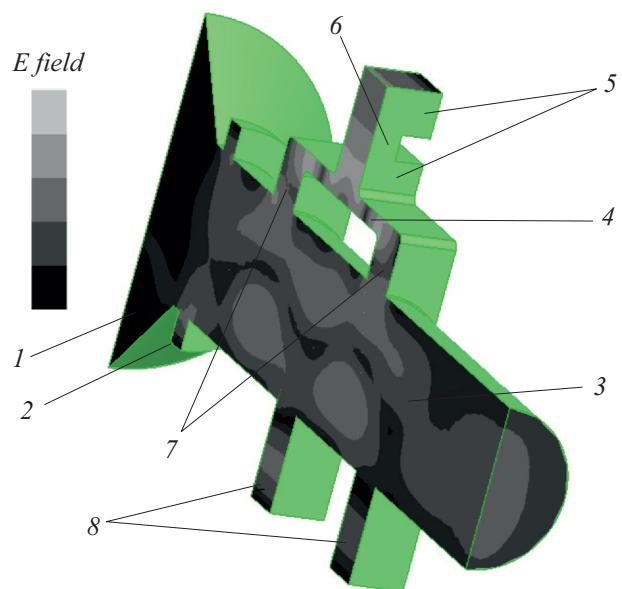


Рис. 2. Оптимизированная конфигурация 35.5 GHz-устройства ввода (распределение электрического поля). 1 — коническое расширение, 2 — ступенчатое расширение, 3 — цилиндрический волновод, 4–8 — прямоугольные волноводы.

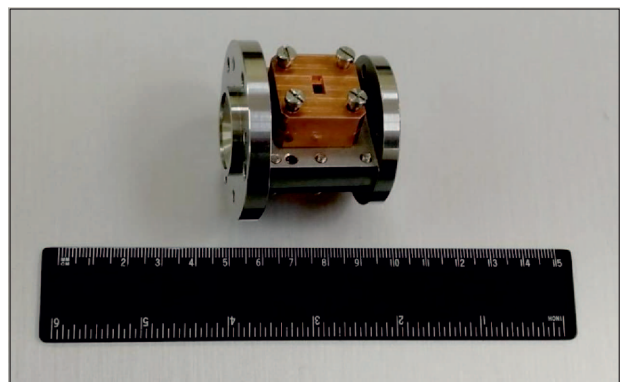


Рис. 3. Тестовый образец 35.5 GHz-устройства ввода.

бочем выходе устройства ввода измерялась с помощью рупора и векторного анализатора. Эта зависимость (рис. 1) была нормирована посредством обратного преобразования моды E_{01} в отраженную моду питающего прямоугольного волновода. Максимум мощности моды E_{01} на рабочем выходе устройства ввода соответствует эффективности 75%. Обратное преобразование моды E_{01} было реализовано присоединением селективного рефлектора в виде ступенчатого резонансного расширения к рабочему выходу устройства ввода.

Полученные результаты позволяют заключить, что предложенное устройство ввода может быть использовано вплоть до нижней границы миллиметрового диапазона длин волн, где влияние погрешностей изготовления может оказаться существенным. Эффективность устройства ввода может быть повышена электролитическим омеднением внутренней поверхности цилиндрического волновода.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственный контракт № 0035-2019-0001) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00926а).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High power microwaves. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 489 p.
- [2] Абубакиров Э.Б., Ботвинник И.Е., Братман В.Л., Виноградов Д.В., Денисов Г.Г., Казача В.И., Красных А.К., Обищеров М.М., Перельштейн Э.А., Сидоров А.И. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 11. С. 186–190.
- [3] Lu Z., Su Z., Wei Y. // AIP Adv. 2018. V. 8. N 5. P. 055105. DOI: 10.1063/1.5031193
- [4] Li S., Duan Z., Huang H., Basu B.N., Wang F., Liu Z., He H., Wang X., Wang Z., Gong Y. // IEEE Trans. Electron Dev. 2019. V. 66. N 6. P. 2758–2763. DOI: 10.11/TEDE.2019.2911041
- [5] Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. М.: Атомиздат, 1980. 464 с.
- [6] Виноградов Д.В., Денисов Г.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33. № 6. С. 726–732.
- [7] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [8] Abubakirov E., Vkharev A., Danilov Y., Konyushkov A., Leontyev A. Project of relativistic mm-wave amplifier with multi-pass interaction // Proc. of IRMMW-THz 2019. Paris, France, 2019. P. 8874228. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874228

- [9] ANSYS Electromagnetic Suite 2019 R3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ansys.com>
- [10] Васильев В.В., Коленский Л.Л., Медведев Ю.А., Степанов Б.М. Проводящие оболочки в импульсном электромагнитном поле. М.: Энергоатомиздат, 1982. 200 с.