

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 537.563.2

РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА ДЛЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА НА ЭЛЕКТРОННОЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2.46 ГГц

© 2023 г. М. С. Дмитриев^{а, *}, М. В. Дьяконов^а, С. А. Туманов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: msdmitriyev@mephi.ru

Поступила в редакцию 25.07.2022 г.

После доработки 01.08.2022 г.

Принята к публикации 02.08.2022 г.

Разработан волноводный тракт для ионного источника на электронно-циклотронном резонансе на рабочую частоту 2.46 ГГц. Произведено численное моделирование основных элементов тракта. Проведена оптимизация трехшлейфового штыревого согласователя, позволяющего согласовать нагрузку с источником СВЧ-мощности, и волноводного разрыва по постоянному току, рассчитанного на постоянное напряжение 80 кВ.

Ключевые слова: ионный источник, электронно-циклотронный резонанс, волноводный тракт, трехшлейфовый согласователь, разрыв по постоянному току

DOI: 10.56304/S2079562922050128

ВВЕДЕНИЕ

В НИЯУ МИФИ ведется разработка ионного ЭЦР источника, предназначенного для получения протонов и ионов двухзарядного гелия. Разработан волноводный тракт для ионного источника на электронно-циклотронном резонансе на рабочую частоту 2.46 ГГц. Произведено численное моделирование основных элементов тракта. Проведена оптимизация трехшлейфового штыревого согласователя, позволяющего согласовать нагрузку с источником СВЧ-мощности, и волноводного разрыва по постоянному току, рассчитанного на постоянное напряжение 80 кВ. Разработан волноводный переход с прямоугольного волновода на Н-образный сечением $43 \cdot 12$ мм.

1. РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА

На рис. 1 показана система питания ЭЦР источника плазмы. Она состоит из магнетрона 1, коаксиально-волноводного перехода 2, волноводного циркулятора 3, трехшлейфового штыревого согласователя 4, разрыва по постоянному току 5, вакуумного окна 6, вакуумноплотного волноводного перехода 7, плазменной камеры 8, источника анодного питания магнетрона 9 и трансформатора накала магнетрона 10.

Для создания системы СВЧ питания малогабаритного ЭЦР источника с рабочей частотой 2.46 ГГц проведено моделирование и оптимизация основных элементов СВЧ тракта – волноводного согласователя, разрыва по постоянному току

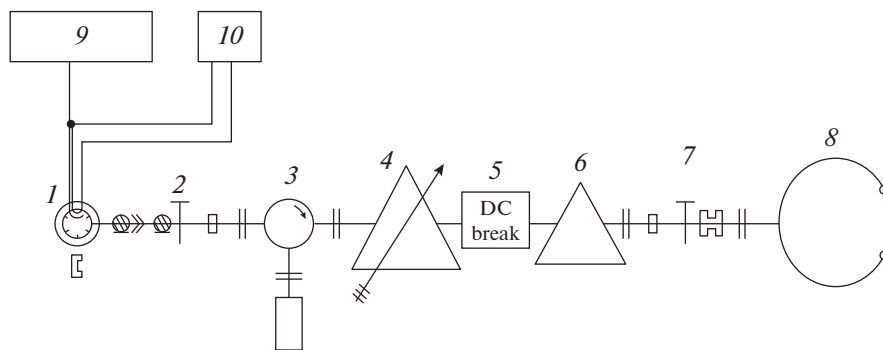


Рис. 1. Схема СВЧ питания ЭЦР источника.

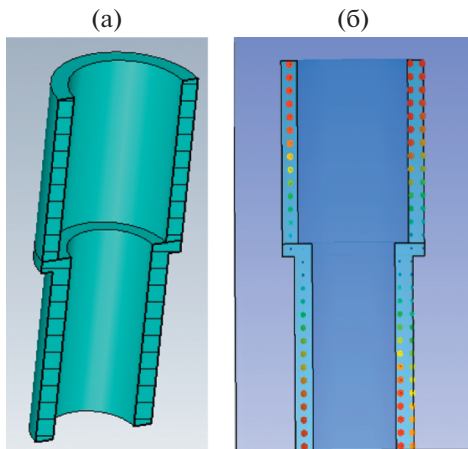


Рис. 2. Модель воздушной дроссельной вставки: (а) вид модели воздушной дроссельной вставки, (б) распределение магнитного поля.

(DC break) и волноводного перехода с прямоугольного волновода WR-340 на H-образный 43×12 мм.

2. ТРЕХШЛЕЙФОВЫЙ СОГЛАСОВАТЕЛЬ

В силу существенной зависимости входного сопротивления плазменных камер ЭЦР источников ионов от характеристик разрядной плазмы в системах СВЧ питания необходимо использовать перестраиваемые согласующие элементы, позволяющие в ручном или автоматизированном режиме осуществлять согласование импедансов нагрузки и волноводной линии передачи. Согласование обеспечивает высокий КПД передачи СВЧ мощности в плазменную камеру источника, а также стабильность мощности и частоты колебаний в тракте.

Для применения в разрабатываемом источнике рассмотрена схема согласования с использованием трехшлейфового волноводного согласователя, в котором в качестве подстроечных элементов используются три емкостных штыря [1, 2], расположенных на расстоянии четверти длины волны в прямоугольном волноводе.

На основе прямоугольного волновода WR-340 разработана математическая модель трехшлейфового штыревого согласователя на рабочую частоту 2.46 ГГц, позволяющего согласовать нагрузку с источником СВЧ-мощности. Штыри представляют собой металлические цилиндры диаметром 14 мм, размещаемые в поперечном сечении волновода на центральной линии широкой стенки. Глубина погружения стержней регулируется от 0 до 40 мм. С помощью данного устройства было рассмотрено согласование некоторых несогласованных нагрузок.

Выполненное моделирование показало, что для нагрузки, представляющей собой короткозамкнутый отрезок прямоугольного волновода, с ис-

пользованием предложенного согласователя может быть достигнуто значение КСВН до 1.05, соответствующее коэффициенту отражения до -35 дБ, что свидетельствует о хорошем согласовании короткозамкнутой нагрузки. При этом для волновода длиной 380 мм глубины погружения трех штырей составили, соответственно, $h_1 = 0,000$ мм, $h_2 = 19.962$ мм, $h_3 = 32.588$ мм, коэффициент отражения от входа соответствовал 0.016–0.020. Стоит отметить, что при положении стержней, соответствующем согласованию, отрезок волновода за согласователем стал резонатором. Из-за высокой добротности такого резонатора короткозамкнутая нагрузка имеет узкую рабочую полосу частот, поэтому согласование такой нагрузки возможно только при очень точной установке глубины погружения штырей.

Был рассмотрен вариант согласования произвольной поглощающей нагрузки. Так, диэлектрическая нагрузка, заполняющая все сечение волновода, длиной 16.2 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 7$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\tan \delta = 0.1$, размещенная в конце волновода в отсутствие штырей отражает практически всю мощность, передаваемую в волновод. Было получено, что для обеспечения согласования на частоте 2.46 ГГц глубина погружения штырей должна составлять, соответственно, $h_1 = 22.70$ мм, $h_2 = 10.90$ мм, $h_3 = 0.00$ мм для $f = 2.46$ ГГц. Коэффициент отражения при этом составляет -35 дБ, а значение КСВН достигает 1.05, при требуемой точности позиционирования 0.05 мм. При этом следует отметить, что качество согласования определяется точностью позиционирования подстроечного элемента, имеющего наибольшую длину.

Стержень должен иметь идеальный электрический контакт со стенкой волновода, что трудно реализовать на практике [3]. Поэтому предложен вариант конструкции, когда штыри согласователя вообще не имеют контакта со стенками волновода. При этом электрический контакт и отсутствие излучения в окружающее пространство обеспечивается воздушной дроссельной вставкой. Модель была рассчитана, так, чтобы минимум магнитного поля обеспечивал отсутствие токов между подстроечным стержнем и корпусом дросселя.

Вид модели дроссельной вставки представлен на рис. 2а, а распределение магнитного поля в модели – на рис. 2б.

3. DC-BREAK

Плазменная камера ЭЦР источника находится на высоковольтной платформе с напряжением до 80 кВ. При этом СВЧ генератор и измерительная часть СВЧ тракта обычно находятся на “земле”. Для решения этой задачи предлагается использовать разрыв по постоянному току (DC-break).

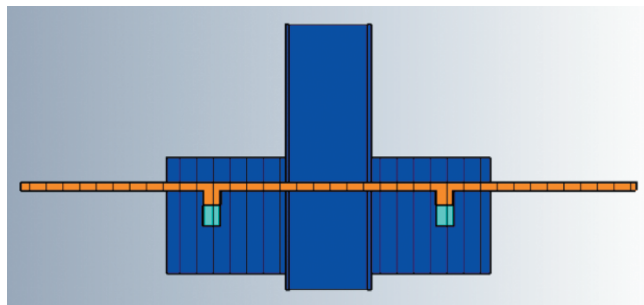


Рис. 3. Модель DC-break в разрезе.

Данное устройство позволяет разделить СВЧ систему на две части: высоковольтную, на которой расположен ЭЦР источник и заземленную, на которой расположен магнетрон, циркулятор, волноводный согласователь и другие элементы. Это позволит обеспечить отсутствие помех, создаваемых работающим ионным источником, при измерении параметров падающей и отраженной волны. DC-break должен обеспечивать минимизацию излучения в окружающее пространство. Разработанная модель DC-break показана на рис. 3.

DC-break представляет собой дроссельное соединение двух прямоугольных волноводов WR-340 с тонким дисковым фторопластовым изолятором, имеющим цилиндрический выступ, и выходящим за пределы металлических стенок на 80 мм, что обеспечивает отсутствие пробоя по поверхности диэлектрика.

Основными параметрами DC-break являются коэффициенты отражения и передачи и мощность, излучаемая в окружающее пространство через фторопластовый диск. Была рассчитана средняя плотность потока мощности на расстоянии $R = 300$ мм от центра изолятора при входной мощности 1 кВт, составившая 7.3 мВт/см^2 . Данное значение является безопасным для обслуживающего персонала.

Материалом изолятора является фторопласт, диэлектрическая проницаемость ϵ которого может варьироваться от 1.9 до 2.2. В расчетной модели диэлектрическая проницаемость фторопласта бралась равной $\epsilon = 2.1$. Были рассмотрены зависимости коэффициента отражения от частоты для различных значений ϵ от 1.9 до 2.2. При этом, из результатов моделирования следует, что для обеспечения коэффициента отражения меньше -45 дБ, необходимо, чтобы диэлектрическая проницаемость фторопласта отличалась от расчетной не более чем на 0.01. Соответственно, возникает необходимость измерения диэлектрической проницаемости материала, из которого изготавливается изолятор, вставки и настройки электродинамических характеристик DC-break.

Настройка устройства осуществляется путем изменения электрической длины дроссельного со-

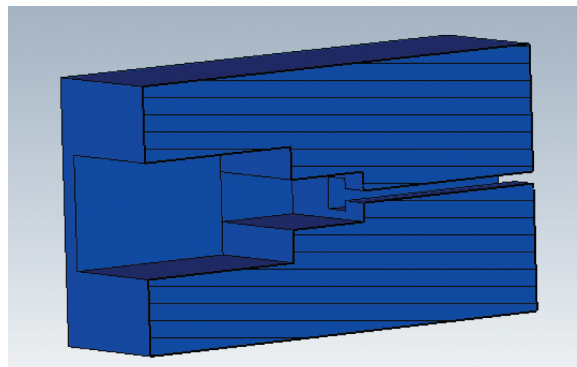


Рис. 4. Модель волноводного перехода в разрезе.

единения. Длина волны в фторопласте меньше чем в воздухе в $\sqrt{\epsilon}$ раз. Тогда, если взять начальную высоту выступа на изоляторе, равную глубине дроссельной проточки, соответствующие диэлектрической проницаемости $\epsilon = 2.2$, то уменьшая высоту выступа, т.е. увеличивая общую электрическую длину дроссельного соединения, можно добиться смещения частоты, на которой коэффициент отражения минимален, до требуемого значения $f = 2.46$ ГГц. Так, при уменьшении длины цилиндрической части на 12.5 мм положение минимума коэффициента отражения для $\epsilon = 1.9$ сдвигается с частоты $f = 2.425$ ГГц на частоту $f = 2.46$ ГГц, что может говорить об эффективности данного способа настройки характеристик DC-break.

4. ВОЛНОВОДНЫЙ ПЕРЕХОД

Из-за малых размеров плазменной камеры, возникает задача передачи в нее СВЧ мощности. Так как прямоугольные волноводы необходимых размеров будут запредельными для частоты $f = 2.46$ ГГц, для передачи мощности в плазменную камеру был выбран Н-образный волновод сечения 43×12 мм. Соответственно, возникает необходимость разработки волноводного перехода с прямоугольного волновода WR-340 на Н-образный.

Были исследованы двухступенчатый и одноступенчатый волноводные переходы. Предложенные варианты имеют простую для изготовления форму. В качестве окончательного варианта выбран одноступенчатый переход, показанный на рис. 4, в котором ступенью является параллелепипед с поперечными размерами 86.8×18.7 мм и длиной 33.5 мм. Данная модель имеет на частоте $f = 2.46$ ГГц коэффициент отражения ниже -52 дБ, что свидетельствует о достаточно хорошем согласовании перехода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведена разработка и моделирование элементов волноводного тракта ЭЦР источника с рабочей частотой 2.46 ГГц, предназначенного для получения протонов и ионов гелия. На основе разработанных моделей выполняется конструирование и создание волноводного тракта нового ЭЦР источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Kuang Y. et al.* // Proc. 11th Int. Conf. Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT2019). Guangzhou, China. May 2019. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ICMMT45702.2019.8992397>
2. *Grecu L.* // Recent. 2007. V. No. 3a (21a). P. 492.
https://www.recentonline.ro/021/Grecu_L_02b-R21.pdf.
3. *Bilik V., Bezek J. J.* Microwave Power Electromagn. Energy. 2010. V. 44 (4). P. 178–186.
<https://doi.org/10.1080/08327823.2010.11689786>

Waveguide Development for a 2.46 GHz Electron Cyclotron Resonance Ion Source

M. S. Dmitriev¹, *, M. V. Dyakonov¹, and S. A. Tumanov¹

¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: msdmitriyev@mephi.ru*

Received July 25, 2022; revised August 1, 2022; accepted August 2, 2022

Abstract—A waveguide for a 2.46 GHz electron cyclotron resonance ion source has been developed. The main waveguide elements have been numerically simulated. A three stub tuner has been optimized that allows one to coordinate the load with a microwave power source and a waveguide DC break designed for a DC voltage of 80 kV.

Keywords: ion source, electron cyclotron resonance (ECR), waveguide, three stub tuner, DC-break