

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 533.9.072

МИКРОВОЛНОВЫЙ ИСТОЧНИК НЕТЕРМАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ
АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНОГО МОСТА

© 2022 г. С. А. Горбатов, И. А. Иванов, В. Н. Тихонов, А. В. Тихонов

Поступила в редакцию 23.02.2022 г.
После доработки 14.03.2022 г.
Принята к публикации 17.03.2022 г.

DOI: 10.31857/S0032816222040206

В последние два десятилетия ведутся интенсивные разработки источников нетермальной атмосферной (т.е. получаемой при атмосферном давлении) плазмы (НТАП) для плазмохимических методов модифицирования поверхностей материалов, в том числе таких нетермостойких, как синтетические и природные полимеры.

Представленный в работе [1] микроволновый источник НТАП нового типа обладает как признаками диэлектрического барьерного разряда (по конфигурации и низкой температуре ионизированного газа), так и способностью формирования “чистой” плазменной струи подобно классическому СВЧ-плазмотрону. СВЧ-разряд здесь возбуждается в диэлектрической трубке, проходящей поперек волновода перпендикулярно вектору напряженности электрического поля E (рис. 1а). В такой конфигурации две широкие стенки волновода можно рассматривать как электродную систему из двух плоских параллельных электродов, расположенных параллельно оси разрядной трубки, стенки которой играют роль диэлек-

трического барьера. Таким образом, мы полагаем оправданным использование при описании подобных устройств термина “микроволновый барьерный разряд”.

Основной недостаток такого источника НТАП состоит в необходимости включения в волноводный тракт дорогостоящего и громоздкого циркулятора для защиты магнетрона от значительных уровней отраженной волны (рис. 1б). Кроме того, как показала практика, допустимый уровень подводимой к разрядной трубке СВЧ-мощности в диапазоне 2.45 ГГц ограничен в данном случае величиной порядка 200–300 Вт. Это вызвано большой напряженностью электрического поля в отсутствие разряда, что приводит к пробоям по воздуху в волноводе вне разрядной трубки.

В настоящей публикации предлагается заменить циркулятор, используемый в конфигурации, представленной на рис. 1б, трехдецибельным волноводным Н-мостом со связью по узкой стенке волновода. Трехдецибельный мост (рис. 2а) делит СВЧ-мощность, поступающую от гене-

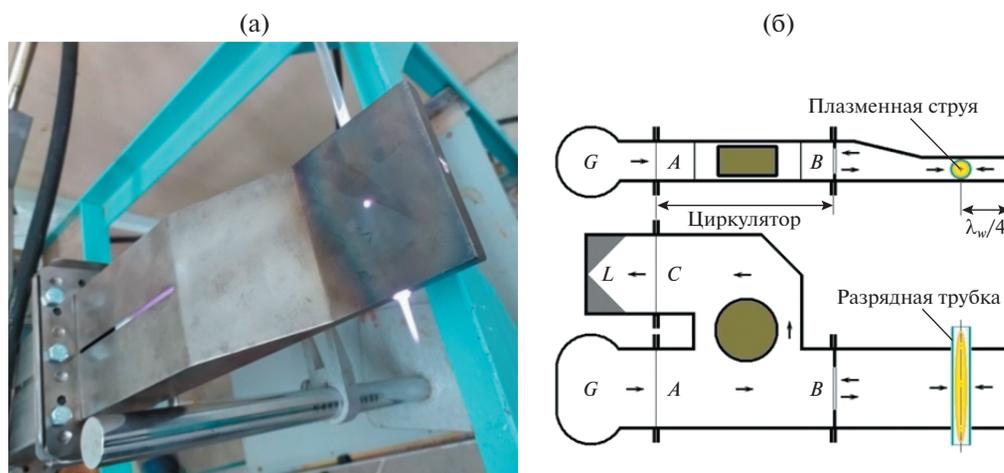


Рис. 1. Внешний вид источника нетермальной плазмы микроволнового барьерного разряда (а) и схема его подключения к СВЧ-генератору (б). G – СВЧ-генератор, А – входное плечо моста, В – выходное плечо моста, С – “развязанное” плечо моста, L – согласованная нагрузка.

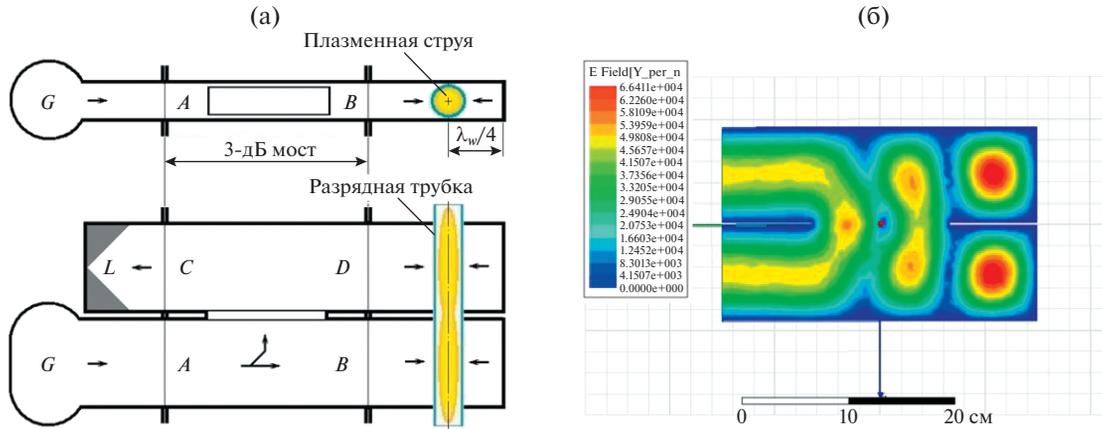


Рис. 2. а – схема источника нетермальной плазмы на основе трехдецибелного волноводного Н-моста (G – СВЧ-генератор, A – входное плечо моста, B и D – выходные плечи моста, C – “развязанное” плечо моста, L – согласованная нагрузка); б – конфигурация напряженности электрического поля в сечении оптимизированной расчетной модели.



Рис. 3. Экспериментальная модель трехдецибелного волноводного Н-моста (а) и огневые испытания источника микроволнового барьерного разряда НТАП (б).

ратора G во входное плечо моста A , строго пополам между двумя его выходными плечами B и D . Уникальное свойство такого моста состоит в том, что если оба его выходных плеча нагружены любыми произвольными, но одинаковыми нагрузками, то вся отраженная от них мощность пойдет в четвертое, “развязанное” плечо C моста. Подключив согласованную нагрузку L к плечу C , мы избавим СВЧ-генератор G от неприятностей, даже в случае очень значительных отражений.

Для расчета и оптимизации геометрических параметров волноводного моста были использованы возможности программного комплекса Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) [2] (рис. 2б). В качестве критерия оптимизации использовалось условие деления мощности, передаваемой в плечи B и D на рабочей частоте 2.45 ГГц, строго пополам, а также минимальных отражений от входного плеча A при полном отражении от коротких замыканий в плечах B и D .

Основываясь на полученных геометрических параметрах, мы изготовили экспериментальную

модель волноводного Н-моста для источника микроволнового барьерного разряда НТАП (рис. 3а). Изгибы волноводов в плечах моста, необходимые для осуществления условий сборки устройства, одновременно выполняют функцию плавных согласующих переходов к стандартному сечению волноводов ($90 \times 45 \text{ мм}^2$).

Проведенные испытания (рис. 3б) подтвердили работоспособность недорогого микроволнового источника НТАП на основе трехдецибелного волноводного моста без необходимости использования циркулятора для защиты магнетрона от возможных отражений микроволновой энергии. Особенно важно отметить то, что в новой конструкции высота волновода и соответственно диаметр разрядной трубки могут быть существенно больше, чем в представленной на рис. 1 конфигурации. Так, в изготовленном образце источника микроволнового барьерного разряда НТАП высота волноводов в зоне формирования разряда составляет 20 мм, тогда как в конфигурации на рис. 1 она равна 8 мм. Соответственно площади сечений разрядной трубки

и формируемой плазменной струи могут быть увеличены более чем в четыре раза. Кроме того, подводимая к Н-мосту и вводимая в разряд СВЧ-мощность также могут быть существенно увеличены.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (проект № 20-08-00894).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tikhonov V.N., Ivanov I.A., Tikhonov A.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1393 (1). P. 012062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1393/1/012062>*
2. <http://anlage.umd.edu/HFSSv10UserGuide.pdf>

Адрес для справок: Россия, 249032, Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 109-й км, ВНИИ радиологии и агроэкологии; e-mail: gorbatovsa004@gmail.com; тел. +7(484)399-69-36 (Горбатов Сергей Андреевич)