

Цельнометаллический микроволновый плазмотрон

*В.Н. Тихонов**, *С.А. Горбатов*, *И.А. Иванов*, *А.В. Тихонов*

НИЦ «Курчатовский институт» - ВНИИ Радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

**v.n.tihonov@yandex.ru*

Аннотация. В настоящей работе представлено описание устройства цельнометаллического микроволнового плазмотрона атмосферного давления, не требующего использования диэлектрической разрядной камеры, отделяющей область разряда от области подвода микроволновой энергии к нему. Основу конструкции плазмотрона составляет отрезок короткозамкнутого с обоих концов круглого волновода. Расстояние подключения питающего прямоугольного волновода до одного из его концов выбрано из условия максимального согласования на рабочей частоте, на втором его короткозамкнутом конце аксиально расположен отрезок запердельного круглого волновода. При создании в последнем условий возникновения микроволнового разряда, происходит «просветление» запердельного волновода, и он преобразуется в коаксиальный широкополосный волновод, внутренний проводник которого представляет собой протяженный плазменный разряд, поддерживаемый и питаемый микроволновой энергией, поступающей из основного круглого волновода.

Ключевые слова: микроволновый плазмотрон, плазма.

1. Постановка задачи и ход её решения

Микроволновые плазмотроны атмосферного давления обладают целым рядом достоинств, которые обеспечивают их широкое применение в самых различных областях человеческой деятельности [1, 2]. Однако существенным недостатком «классической» компоновки такого «сурфатрона» является необходимость использования разрядной камеры в виде, как правило, диэлектрической трубки, отделяющей область разряда (плазмоид) от области подвода микроволновой энергии к нему. Это обстоятельство существенно ограничивает возможность проведения продолжительных высокотемпературных технологических процессов ввиду большой сложности осуществления эффективного охлаждения стенки разрядной камеры.

Известны подходы к решению этой проблемы за счет, например, удаления стенок разрядной камеры от области разряда [3], за счет соединения разрядной камеры с запердельным волноводом [4] (причем разряд здесь формируется как внутри диэлектрической разрядной камеры, так и, частично, внутри запердельного волновода) и ряд других. Однако необходимость использования диэлектрика в конструкции таких устройств сохраняется.

Целью настоящей работы является повышение надежности и долговечности устройства микроволнового плазмотрона при проведении продолжительных высокотемпературных технологических процессов за счет исключения из его конструкции диэлектрических материалов и, в том числе, диэлектрической разрядной камеры.

1.1. Основная идея

Основная идея настоящей разработки состоит в использовании так называемого эффекта просветления запердельного волновода, который заключается в том, что при размещении каким-либо образом внутрь круглого запердельного волновода аксиально с ним области протяженного плазменного разряда, запердельный волновод преобразуется в широкополосную коаксиальную линию с наружным металлическим и внутренним плазменным проводником, существование которого поддерживается за счет интенсивного поглощения микроволновой энергии плазмой.

1.2. Общая компоновка устройства

Основу описываемого устройства составляет закороченный с обоих концов отрезок круглого волновода, длина которого соответствует условию резонанса для моды E_{01} . Вблизи одного из торцов основного волновода к нему перпендикулярно подключен прямоугольный питающий волновод таким образом, чтобы его широкая стенка была перпендикулярна оси круглого волновода. Ко второму торцу основного волновода, аксиально с ним, присоединен отрезок круглого запредельного волновода (Рис. 1).

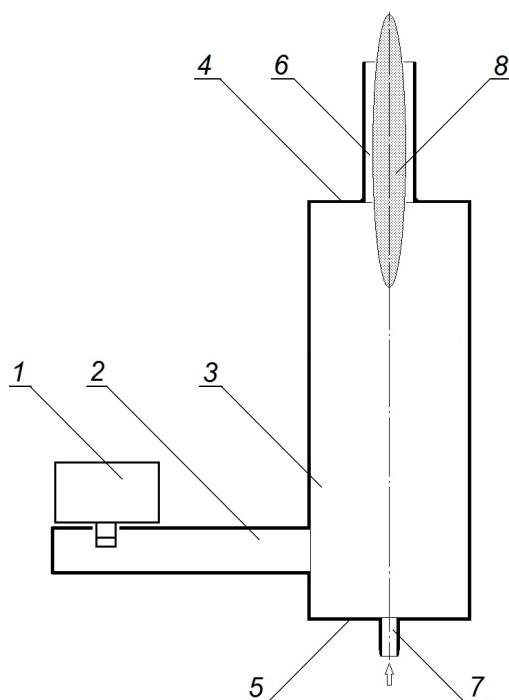


Рис. 1. Микроволновый плазмотрон, общая схема (пояснения в тексте).

Микроволновый плазмотрон, согласно Рис. 1, содержит источник микроволнового излучения 1, полый прямоугольный питающий волновод 2, перпендикулярно сочлененный с боковой стенкой круглого волновода 3, короткозамкнутого с торцов 4 и 5. К одному из торцов 4 круглого волновода 3 присоединен отрезок круглого запредельного волновода 6. Подача плазмообразующего газа осуществляется через патрубок 7, расположенный на торце 5. Выход газа происходит только через запредельный волновод 6.

При включении микроволнового генератора 1, в круглом волноводе 3 возникает стоячая электромагнитная волна, одна из пучностей которой располагается непосредственно вблизи торца 4, нагруженного отрезком запредельного волновода 6. После инициирования микроволнового разряда в потоке плазмообразующего газа, истекающего через запредельный волновод 6, в последнем формируется устойчивое плазменное образование, простирающееся как наружу, так и, частично, внутрь волновода 3 – плазмоид 8.

1.3. Построение и оптимизация параметров расчетной модели

Построение расчетной модели, расчет электродинамических параметров, оптимизация конфигурации и геометрических размеров основных элементов устройства проводились с помощью программы Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) [5] (Рис. 2).

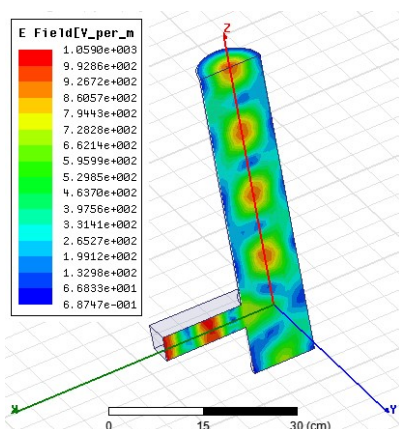


Рис. 2. Расчетная модель электромагнитной структуры плазматрона.

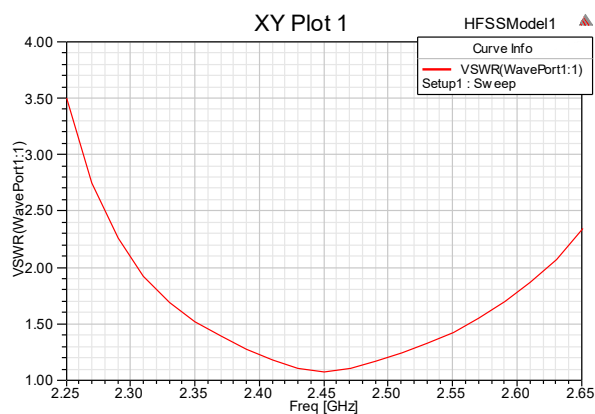


Рис. 3. Расчетная частотная характеристика волноводного перехода. КСВН в питающем волноводе.

На первом этапе было оптимизировано расположение питающего волновода 2 относительно торца 5 круглого волновода 3. Целью оптимизации было достижение условий максимального согласования в режиме бегущей волны в круглом волноводе 3, то есть в случае, когда на торце 4 вместо короткого замыкания помещена (условно) идеально согласованная нагрузка.

Было показано, что при размещении оси питающего волновода 2 (сечением 90 на 45 мм) на расстоянии 112.5 мм от торца 5 круглого волновода 3 диаметром 110 мм, на частоте 2.45 ГГц, может быть достигнуто очень хорошее согласование такого волноводного перехода, вплоть до значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в питающем волноводе 2 порядка 1.10 (Рис. 3).

1.4. Реализация в металле

Для изготовления действующего макета плазматрона была использована стандартная цельносварная труба из нержавеющей стали диаметром 110 мм, применяемая при монтаже дымоходов (Рис. 4). Длина 57.5 см короткозамкнутого отрезка была выбрана как среднее арифметическое из расчета пять длин полуволн моды E_{01} (58.49 см) и семь длин полуволн моды H_{11} (56.55 см), из тех соображений, что условия резонанса до запуска разряда могут выполняться либо для одной, либо для другой моды – с учетом того, что частота магнетрона может несколько отличаться в ту или иную сторону от номинальных 2.45 ГГц.



Рис. 4. Действующий макет цельнометаллического плазматрона.

Огневые испытания действующего макета плазматрона прошли успешно. В качестве источника микроволновой энергии использовался магнетронный генератор, описанный в работе [6], при уровне выходной мощности порядка 2 кВт. Для защиты генератора от отраженной волны применялся волноводный циркулятор. Судя по невысокой температуре воды на выходе балластной нагрузки в развязанном плече циркулятора, согласование питающего тракта в рабочем режиме было вполне удовлетворительным.

В качестве рабочего газа использовался воздух, с расходом порядка 70 л/мин., подача осуществлялась по оси, с нижнего торца круглого волновода, с подкруткой потока для стабилизации плазмоида. Наблюдалось устойчивое «горение» плазменного шнура, ограниченное по времени только перегревом элементов запредельного волновода.

2. Заключение

Таким образом, продемонстрирована реальная возможность создания микроволнового цельнометаллического плазматрона, пригодного для проведения продолжительных высокотемпературных плазмохимических и иных плазменных технологических процессов при атмосферном давлении. Далее мы планируем разработку и изготовление полупромышленного плазматрона с водяным охлаждением запредельного волновода. Длина отрезка круглого волновода будет уменьшена за счет того, что его диаметр будет специально подобран для осуществления условий резонанса одновременно двух низших типов колебаний. Также планируется исследовать возможность использования трёхдецибельного волноводного моста для исключения необходимости включения циркулятора в питающий волноводный тракт [7].

3. Литература

- [1] V.E. Fortov (Ed.), *Encyclopaedia of Low-Temperature Plasma. Entrance Volume, Book 2 [in Russian]*. Moscow: MAIK Nauka/Interperiodika, 2000.
- [2] V.N. Tikhonov, S.N. Aleshin, I.A. Ivanov and A.V. Tikhonov, The low-cost microwave plasma sources for science and industry applications, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. **927**, 2017, 012067, doi: 10.1088/1742-6596/927/1/012067
- [3] V.N. Tikhonov, A.V. Tikhonov, I.A. Ivanov, Microwave plasma torch, *R.F. Patent*, RU 183873 U1, from 08.10.2018.
- [4] E.A. Petrov, B.S. Bashkir, I.I. Devyatkin and G.V. Lysov, Ultrahigh frequency plasma torch, *R.F. Patent*, RU 868845, from 30.09.81.
- [5] *ANSYS HFSS 3D Electromagnetic Field Simulator for RF and Wireless Design* [online]; <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
- [6] V. Tikhonov, I. Ivanov, A. Kryukov and A. Tikhonov, Low-cost generators for microwave plasmatoms, *J. Prikl. Fiz.*, vol. **5**, 102–106, 2015.
- [7] V. Tikhonov, S. Gorbатов, I. Ivanov, A. Shesterikov and A. Tikhonov, Microwave Plasmatron based on a Waveguide Bridge, *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, Russia, 593–595, 2020, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241937