

## Недорогие СВЧ-плазмотроны для науки и промышленности

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

*Предлагаемые на мировом рынке микроволновые плазмотроны построены по так называемой классической схеме: блок питания магнетрона – магнетрон – циркулятор с поглощающей нагрузкой – измеритель падающей/отраженной волны – устройство согласования – собственно плазмотрон – устройство подстройки. Мы оптимизировали классическую схему, оставив только самые необходимые компоненты: блок питания – магнетрон – волноводный тракт – плазмотрон – водяная нагрузка и максимально упростили конструкцию самого волноводного тракта. В результате разработаны бюджетные источники микроволновой плазмы с мощностью до 3 кВт.*

*Ключевые слова:* микроволновый плазмотрон, низкотемпературная плазма, СВЧ-разряд.

### Введение

Во многих перспективных направлениях развития науки и промышленности, а также при разработке новых материалов и технологий существует потребность в экономичных, простых и надежных источниках «чистой» низкотемпературной плазмы атмосферного давления [1–3].

Использование сверхвысокочастотных (СВЧ) плазмотронов дает возможность сочетать преимущества чистого безэлектродного разряда с удобством подвода электромагнитной энергии по волноводным или коаксиальным фидерным линиям [4, 5]. В разрешенном для промышленного применения диапазоне частот 2,45 ГГц в качестве источников энергии для СВЧ-плазмотронов широко используются мощные генераторы на магнетронах.

В нашей предыдущей работе [6] была представлена возможность реализации генератора СВЧ для малобюджетных микроволновых плазмотронов на базе основных компонентов бытовых микроволновых печей. Для этого были решены задачи обеспечения непрерывного режима генерации

микроволнового излучения, управления уровнем СВЧ-мощности и повышения эффективности системы охлаждения магнетронов. В результате были разработаны несколько модификаций простых, надежных, недорогих и высокоэффективных СВЧ-генераторов для питания микроволновых плазмотронов и других промышленных и исследовательских СВЧ-установок различного назначения.

Предлагаемые на мировом рынке СВЧ-плазмотроны, как правило, все построены по так называемой классической схеме: блок питания магнетрона – магнетрон – волноводный тракт – циркулятор с поглощающей нагрузкой (СВЧ-вентиль) – измеритель падающей/отраженной волны – устройство согласования – собственно плазмотрон – устройства подстройки.

При всех очевидных достоинствах классического подхода, нельзя обойти вниманием высокую рыночную стоимость каждого компонента схемы в отдельности и, соответственно, всей такой установки в целом. Суммарная стоимость такого комплекта в исполнении, например, фирмы Sairem (France) составляет порядка \$20 000. Другой пример: суммарная стоимость только трех позиций из вышеприведенного перечня, а именно: устройства согласования, направленного ответвителя и циркулятора с нагрузкой, в исполнении, например, фирмы UIY Technology Co., Ltd, China, составляет порядка \$7 800.

Целью данной работы является исследование возможности реализации недорогих СВЧ-плазмотронов на базе основных компонентов массового производства (при максимальном упрощении конструкции самого волноводного тракта) для устройств бытового назначения.

**Тихонов Виктор Николаевич**, н.с.

**Иванов Игорь Анатольевич**, н.с.

**Тихонов Александр Викторович**, м.н.с.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии».

Россия, 249032, Калужская область, г. Обнинск,

Киевское шоссе, 109-й км.

Тел. +7(484) 399-69-36, факс +7(484) 396-80-66.

E-mail: v.n.tihonov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16 мая 2018 г.

### Разработка конструкции волноводного тракта

Продолжая и развивая наш традиционный принцип минимальной бюджетности наших работ, мы максимально упростили конструкцию волноводного тракта – даже ценой вероятного снижения некоторых технических характеристик СВЧ-плазмотрона, как то: эффективности вложения электромагнитной энергии в плазму, более сложного поджига разряда и ряда других. Подойдя к задаче радикальным образом, мы оставили от классической схемы только самые необходимые компоненты: блок питания – магнетрон – волноводный тракт – плазмотрон – нагрузка.

Волноводный тракт (рис. 1) представляет собой неразборную цельносварную конструкцию из нержавеющей стали на основе стандартного прямоугольного профиля  $100 \times 50 \times 2$  мм. Посередине широких стенок волновода приварены соосно два резьбовых патрубка, представляющие собой отрезки запредельных волноводов, для исключения микроволнового излучения из волновода в отсутствие плазмоида и для крепления к ним элементов конструкции плазмотрона.

В конце волновода выполнен поворот в Н-плоскости и здесь расположена резонансная водяная нагрузка. Нагрузка представляет собой полипропиленовую трубку наружным диаметром 16 мм с проточной водой из системы охлаждения магнетрона, проходящую по оси волновода, причем в зоне максимальной напряженности электрического поля. На входе и выходе из волновода трубка экранирована для подавления нежелательной утечки микроволнового излучения. По линии излома волновода расположена согласующая индуктивная диафрагма. Геометрические параметры диафрагмы и длина короткозамкнутого отрезка волновода за ней определены расчетным путем и уточнены на практике.

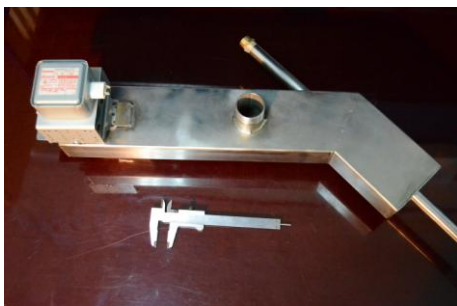


Рис. 1. Волноводный тракт.

Хотя оконечная поглощающая нагрузка, расположенная в тракте после проходной полезной нагрузки (т. е. плазмотрона) вместо короткого замыкания, должна, теоретически, поглощать

часть полезной мощности и реально снижает в два раза напряженность электрического поля в волноводе (т. е. ухудшая условия для поджига разряда), мы пошли на ее использование в нашей схеме. Цель – защита магнетрона от отраженной волны при отсутствии плазмы и в других нештатных ситуациях. В классической схеме эти функции исполняет довольно сложный циркулятор со своей нагрузкой и устройство согласования с соответствующей системой измерения падающей и отраженной волны в питающем волноводе.

### Обеспечение возможности подстройки параметров нагрузки

К недостаткам вышеописанной конструкции следует отнести практически полное отсутствие возможности подстройки параметров волноводного тракта. В частности, выбор места расположения плазмотрона относительно согласующей диафрагмы оказался достаточно сложной задачей. При неудачном его расположении плазмоид стремится уйти с оси симметрии плазмотрона в сторону нагрузки или в сторону генератора, т. е.

при увеличении напряженности электрической составляющей стоячей компоненты сложной электромагнитной волны в питающем волноводе. В результате может произойти локальный перегрев диэлектрической трубки плазмотрона и даже ее разрушение. В этом случае «освободившийся» плазмоид стремительно перемещается внутри волновода к источнику микроволновой энергии и сжигает магнетрон в течение нескольких секунд.

Для предотвращения подобных ситуаций мы внесли коррективы в состав и конструкцию водяной нагрузки. С этой целью мы использовали подвижный диэлектрический полуволновый трансформатор из тефлона. Если такой прямоугольный образец тефлона (расчетной формы и размеров) поместить в волновод с бегущей волной, он не вызовет в нем дополнительных отражений. Однако в нашей нагрузке за диафрагмой значительно преобладает стоячая волна с двумя выраженными максимумами электрического поля. Если теперь трансформатор расположен в узле стоячей волны, он минимально влияет на электрическое поле в нагрузке и на ее входное сопротивление. При смещении трансформатора в сторону той или другой пучности стоячей волны в нагрузке происходит перестройка комплексного входного сопротивления нагрузки и смещение максимума стоячей компоненты электромагнитной волны в основном волноводе. Конструкция такого подстроечного элемента простейшая, не содержит ни трущихся электрических контактов, ни вообще каких-либо металлических деталей (рис. 2).

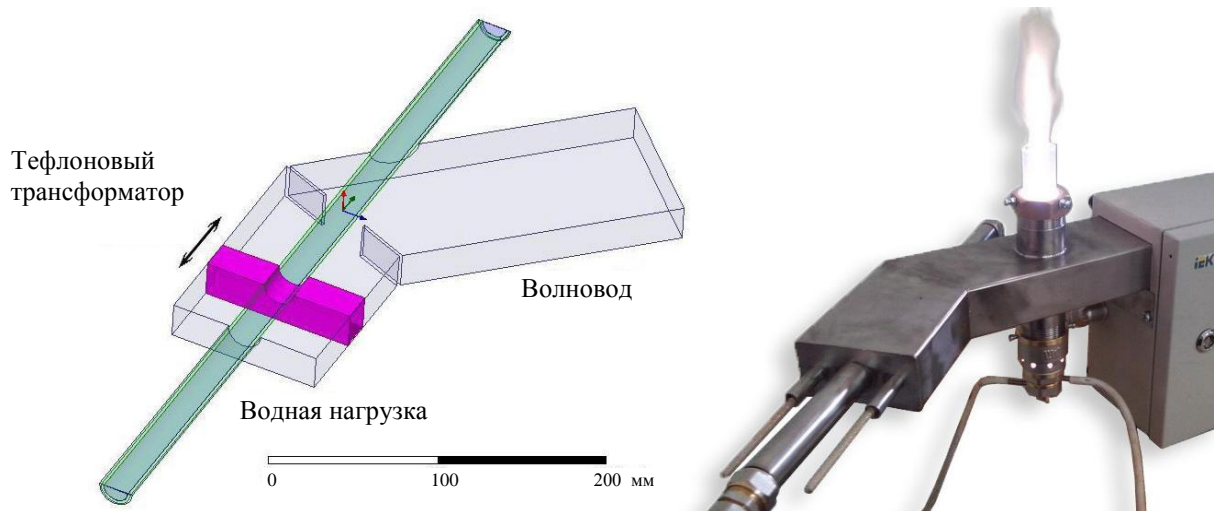


Рис. 2. Схема резонансной водяной нагрузки с подвижным полуволновым тефлоновым трансформатором.

Поскольку магнетроны для бытовых СВЧ-печей рассчитаны на продолжительную работу при рассогласовании в тракте нагрузки до значений  $K_{СВН} \leq 3$ , достижимое отклонение импеданса нагрузки от согласованного значения при смещении диэлектрического элемента подстройки для них неопасно. К тому же, как показали проведенные измерения, с помощью такой подстройки удастся обеспечить эффективность вложения СВЧ-мощности непосредственно в плазму вплоть до уровня более 90 %.

### Соображения по конструкции плазмотронов

Мы не разрабатываем системы подачи газов в плазмотрон. Но у нас есть несколько отработанных, достаточно простых вариантов конструкции

СВЧ-плазмотронов, которые можно использовать для решения различных практических задач.

На рис. 3 слева представлен для примера один из самых простых, но успешно действующих завихрителей. Помимо двух тангенциальных вводов для рабочего газа (например, воздуха), по центру основания имеется отверстие, через которое можно вводить в плазму твердые стержни, порошки или аэрозоли. На рис. 3 справа показан этот же завихритель в процессе введения вольфрамового стержня диаметром 3 мм в плазму водяного пара.

Специально для предотвращения выброса плотных частиц на стенку рабочей камеры была разработана также конструкция СВЧ-плазмотрона, в которой необходимая конфигурация потока рабочего газа может обеспечиваться почти без его подкрутки. На рис. 4 представлен эскиз конструкции такой завихрительно-распылительной системы и ее реализация на практике.



Рис. 3. Простой универсальный завихритель в процессе введения вольфрамового стержня в плазму водяного пара.

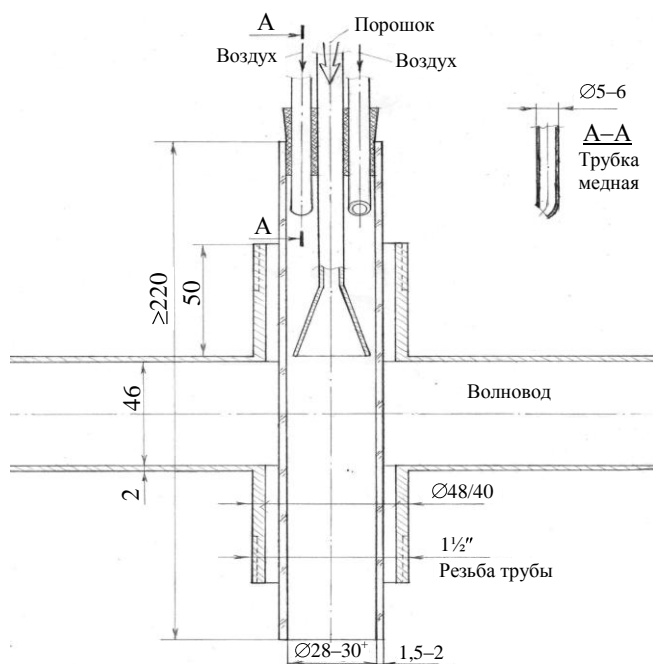


Рис. 4. Завихритель с полым диэлектрическим конусом.

При работе с разными порошками (мелкая соль, сода, окись алюминия и др.) завихрение под конусом велико настолько, что в отсутствие плазмы часть порошка там крутится устойчиво, не падая вниз. Устойчивость разряда при просыпании порошка вполне достаточная, вылет порошка на стенку при прохождении сквозь плазменный шнур незначительный. Следует отметить, что по ходу работ стала очевидна необходимость комбинированного завихрения, т. е. желательна хотя бы небольшая подкрутка по наружному пристеночному потоку – для симметрирования плазмоида, но чтобы превалировало все-таки «реактивное», а не круговое завихрение.

Следуя принципу максимального использования покупных комплектующих, в настоящее время мы поставляем наши СВЧ плазменные установки с плазмотронами, построенными на базе стандартных сантехнических резьбовых фитингов для металлических трубопроводов. Наличие их в широкой продаже, по доступной цене и в огромном ассортименте позволяет достаточно быстро подобрать конфигурацию завихрителя под конкретную задачу. С этой целью на патрубках запредельных волноводов выполнена наружная дюймовая резьба. В ходе работы пользователь вполне может сам, на основании накапливаемого опыта, развивать, совершенствовать и оптимизировать конструкцию своего СВЧ-плазмотрона.

Поскольку температура в плазмоиде может достигать нескольких тысяч градусов, для осуществления продолжительных технологических процессов возможны варианты конструкции с водя-

ным охлаждением запредельных патрубков или всего прилегающего участка волновода.

### Заключение

В результате проведенных работ нам удалось оптимизировать классическую схему СВЧ-плазмотрона, оставив только самые необходимые компоненты, а именно: блок питания – магнетрон – волноводный тракт – плазмотрон – водяная нагрузка, и максимально упростить конструкцию самого волноводного тракта без потери основных технических показателей. В ходе огневых испытаний изготовленной экспериментальной установки с использованием несложного вихревого плазмотрона атмосферного давления было достигнуто время непрерывной работы установки более 8 часов при СВЧ-мощности 2,5 кВт. При этом измеренный уровень вложения мощности в плазму превышал 90 %. Проведены также испытания с использованием нескольких конструкций вихревых плазмотронов, работающих на атмосферном давлении, при этом в качестве рабочего газа использовались воздух, аргон, водяной пар, углекислый газ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия Низкотемпературной плазмы / под ред. В. Е. Фортова, вводный том IV. – М.: Наука, 2000.
2. Энциклопедия Низкотемпературной плазмы / Под общей ред. В. Е. Фортова. Тематический том VIII-1 Химия низкотемпературной плазмы / под ред. Ю. А. Лебедева, Н. А. Платя, В. Е. Фортова. – М.: Янус-К, 2005.
3. Энциклопедия Низкотемпературной плазмы / Под общей ред. В. Е. Фортова. Тематический том XI-5 Приклад-

ная химия плазмы / под ред. Ю. А. Лебедева, Н. А. Платэ, В. Е. Фортова. – М.: Янус-К, 2006.

4. *Microwave Excited Plasmas*, 1992. Ed. M. Moisan and J. Pelletier, Amsterdam: Elsevier.; Lebedev Yu. A. // *Plasma Sources Science and Technol.* 2015. Vol. 24. P. 053001.

5. Батенин В. М., Климовский И. И., Лысов Г. В., Троицкий В. Н. СВЧ-генераторы плазмы: Физика, техника, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

6. Тихонов В. Н., Иванов И. А., Крюков А. Е., Тихонов А. В. // *Прикладная физика*. 2015. № 5. С. 102.

PACS: 52.50.Sw; 84.40.-x

## Low-cost microwave plasma sources for science and industry

V. N. Tikhonov, I. A. Ivanov, and A. V. Tikhonov

Russian Institute of Radiology and Agroecology  
109th km, Kiev shosse, Obninsk, Kaluga Region, 249032, Russia  
E-mail: v.n.tikhonov@yandex.ru

Received May 16, 2018

***Microwave plasma torches proposed in the world market are built according to the so-called classical scheme: a magnetron power unit – a magnetron – a circulator with an absorbing load – a measuring instrument of the incident / reflected wave – a matching device – the plasmatron itself – a tuning device. We optimized the classical scheme, leaving only the most necessary components: power supply unit – magnetron – waveguide path – plasmatron – water loading and maximally simplified the design of the waveguide path itself. As a result, budget sources of microwave plasma with a power of up to 3 kW have been developed.***

**Keywords:** microwave discharge, plasma torch, microwave plasmathrone.

### REFERENCES

1. *Encyclopedia of low temperature plasma, Introductory volume IV*, edited by V. E. Fortov (Moscow: Nauka, 2000) [in Russian].
2. *Encyclopedia of low-Temperature plasma. Thematic volume VIII-1 the Chemistry of low-temperature plasma*, ed. by Yu. A. Lebedev, N. Plate, V. E. Fortov. (Moscow: Yanus-K, 2005) [in Russian].
3. *Encyclopedia of low-Temperature plasma. Theme XI-5 Applied chemistry of plasma*, ed. by Yu. A. Lebedev, N. Plate, V. E. Fortov. (Moscow: Yanus-K, 2006) [in Russian].
4. *Microwave Excited Plasmas*, ed. M. Moisan and J. Pelletier, Amsterdam: Elsevier.; Lebedev Yu. A., *Plasma Sources Science and Technol.* **24**, 053001 (2015).
5. V. M. Batenin, I. I. Klimovskii, G. V. Lysov, and V. N. Troitskii, *Microwave plasma generators: Physics, technique, application*. (Moscow, Energoatomizdat, 1988) [in Russian].
6. V. N. Tikhonov, I. A. Ivanov, A. E. Kryukov, and A. V. Tikhonov, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 102 (2015).