
**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

УДК 537.876

**ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЫ РЕАКТОРА
С ПЛАЗМОЙ, ПОДДЕРЖИВАЕМОЙ МОЩНЫМ МИКРОВОЛНОВЫМ
ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА НА ЧАСТОТЕ 24 ГГц**

© 2024 г. Д. А. Мансфельд*, Н. В. Чекмарев, С. В. Синцов, А. В. Водопьянов

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Российская Федерация*

**E-mail: mda1981@ipfran.ru*

Поступила в редакцию 07.12.2023 г.

После доработки 15.02.2024 г.

Принята к публикации 25.02.2024 г.

Проведено численное моделирование электромагнитных полей в волноводном плазмотроне, в котором СВЧ-нагрев плазмы осуществляется непрерывным излучением технологического гиротрона с частотой 24 ГГц и мощностью до 5 кВт. Показано, что уменьшение выходного диаметра плазмотрона позволяет более чем вдвое увеличить амплитуду электрического поля, но при уменьшении диаметра до 8 мм значительно возрастает коэффициент отражения, что приводит к попаданию отраженного излучения в гиротрон. Показано, что учет частоты столкновений, соответствующей реальным параметрам разряда атмосферного давления, приводит к уменьшению коэффициента отражения более чем в 10. Экспериментально подтверждено, что при уменьшении выходного диаметра плазмотрона диапазон параметров поддержания разряда существенно расширяется, а коэффициент поглощения превышает 80%.

Ключевые слова: СВЧ плазмотрон, численное моделирование, разряд атмосферного давления

DOI: 10.31857/S0033849424090033, **EDN:** HSOКMP

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время современные технологические гиротронные комплексы, генерирующие в непрерывном режиме мощное СВЧ-излучение миллиметрового диапазона, успешно применяются для решения различных прикладных задач плазмохимии, микроволновой обработки материалов, физики ионных источников [1]. Одним из актуальных вопросов является согласование СВЧ-излучения высокой (вплоть до нескольких десятков киловатт) мощности с нагреваемой средой с целью увеличения электрического поля при минимально возможном уровне отраженной мощности. Для объектов с ярко выраженными диэлектрическими свойствами, например керамики, спекание под действием СВЧ-излучения происходит в резонаторах, в которых возможна плавная подстройка с учетом медленно меняющихся с температурой мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости [2]. Напротив, диэлектрические свойства плазмы сильно меняются с увеличением электронной плотности. С ростом мощности в результате ионизации концентрация

электронов может возрастать вплоть до достижения критического для данной частоты значения, что приводит к отражению СВЧ-излучения от плазмы и ухудшению эффективности нагрева. Кроме того, отраженное СВЧ-излучение может проникать обратно в резонатор гиротрона, вызывая изменение модовой структуры и срыв генерации [3]. Задача минимизации уровня отраженного излучения в установках для нагрева плазмы особенно актуальна для систем с волноводной транспортировкой мощности, поскольку в них уровень отраженной мощности при наличии плазмы может быть выше из-за меньших потерь на рассеяние по сравнению, например, с системами с квазиоптическим вводом излучения.

В рамках работ по исследованию процессов разложения углекислого газа в неравновесной плазме атмосферного давления был разработан волноводный плазмотрон, в котором СВЧ-нагрев плазмы осуществлялся с помощью непрерывного электромагнитного излучения технологического гиротрона с частотой 24 ГГц и мощностью в диапазоне 20...2000 Вт [4]. В работе [4] было экспериментально продемонстрировано, что по сравнению

с квазиоптическим вводом излучения в волноводной реализации коэффициент поглощения СВЧ-излучения в плазме увеличился как минимум в два раза, до 60...70%, что позволило существенно увеличить степень конверсии и энергоэффективность процесса разложения углекислого газа [5]. Дальнейший рост производительности метода при сохранении достигнутого уровня энергоэффективности возможен лишь при увеличении потока плазмообразующего газа, что, в свою очередь, требует увеличения электрического поля в области нагрева плазмы.

Целью данной работы является определение оптимальной конфигурации волноводной системы СВЧ-плазмотрона, позволяющей увеличить электрическое поле в области нагрева при минимально возможном коэффициенте отражения. Для решения этой задачи в работе проведено численное моделирование распределения электрического поля для различных значений диаметра выходного отверстия СВЧ-плазмотрона, а также изучено влияние параметров плазмы (концентрация электронов и частота их столкновений с нейтралами) на коэффициент отражения СВЧ-излучения от плазмы.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Плазма создается и нагревается непрерывным электромагнитным излучением технологического гиротрона (частота 24 ГГц, мода TE_{11} , мощность 20...5000 Вт, линейная поляризация), которое через водоохлаждаемое вакуумное окно из нитрида бора поступает в реактор (плазмотрон) (рис. 1). Реактор является продолжением сверхразмерного волноводного тракта гиротрона с внутренним диаметром 32.6 мм. Углекислый газ подается в плазмотрон при атмосферном давлении через три симметрично расположенные трубки, составляющие угол 30° с образующей цилиндра плазмотрона и обеспечивающие закрученные потоки газа. С целью увеличения плотности мощности излучения волноводный тракт имеет плавное сужение в виде конического рупора длиной 60 мм с диаметром выходного отверстия 10 мм. Внутри конического волновода разряд, поддерживаемый СВЧ-излучением в потоке углекислого газа, представляет собой плазменное образование, локализованное в области максимального значения электрического поля волны (вблизи выхода) и вытянутое вдоль направления поля. Центральную область плазмы с характерным поперечным размером 5...8 мм обтекает более холодный газ с периферии волновода, который, проходя через сильно нагретую плазму, формирует на выходе плазмотрона плазменный факел длиной 50...100 мм с характерным диаметром 6...10 мм (см. рис. 1а).

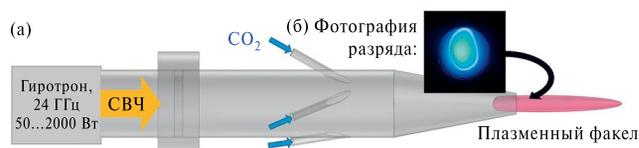


Рис. 1. Схема волноводного СВЧ-плазмотрона (а) и фотография разряда (б).

Для устойчивого горения разряда в широком диапазоне значений потока газа необходимо, чтобы в области нагрева электрическое поле достигло напряженности не менее 1000...1500 кВ/см при фиксированном уровне мощности. Увеличение напряженности электрического поля возможно достичь путем уменьшения диаметра выходного отверстия конуса, что, однако, может приводить к отражению СВЧ-излучения обратно в гиротрон. Для стабильной работы гиротрона и горения необходимо поддерживать низкий (не более 10%) уровень отраженной мощности. В противном случае могут нарушаться условия синхронизма пучка электронов со структурой поля в резонаторе гиротрона и возбуждаться паразитные моды [3]. Ниже описывается численная модель расчета распределения электрического поля в волноводе с учетом наличия плазмы.

1.1. Описание численной модели

Для расчета распределения электромагнитного поля и последующей оптимизации конструкции плазмотрона была создана его трехмерная аксиально-симметричная модель в программе CST Microwave Studio, представленная на рис. 2. В прямом участке круглого волновода возбуждается линейно поляризованная мода TE_{11} на частоте 24 ГГц, мощность в расчете 1 Вт. Длина конической части плазмотрона была фиксирована и составляла 60 мм. Диаметр выходного отверстия в модели варьировался в диапазоне от 6 до 22 мм.

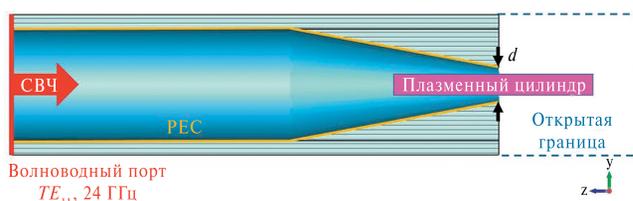


Рис. 2. Модель СВЧ-плазмотрона в среде CST Microwave Studio.

Все стенки считались идеально проводящими, граничное условие на поверхности проводника PEC (Perfect Electric Conductor): $E_r = 0$. На

открытой границе после выхода плазматрона задается граничное условие PML (Perfectly Matched Layers) – это домен, который добавляется к модели для имитации излучения в свободное пространство. Достоинство PML заключается в возможности эффективного расчета не только плоских волн, но и электромагнитных волн с произвольным фронтом.

Область пространства, занятая плазмой на выходе конического участка плазматрона, представлена цилиндром, геометрические размеры которого соответствуют параметрам наблюдаемого в эксперименте плазменного образования: диаметр 6 мм, общая длина 50 мм, смещение за границы конической части плазматрона 20 мм. Точность геометрической формы плазменного факела не оказывает существенного влияния на результаты моделирования, в том числе ввиду того, что на достаточно малом масштабе (менее длины волны) детали формы поверхности области, занятой плазмой, не меняют распределение полей. Свободное пространство в модели имело свойства вакуума, поскольку нейтральные неионизованные газы практически не влияют на распространение СВЧ-излучения с частотой 24 ГГц и не взаимодействуют с ним.

Диэлектрическая проницаемость плазменного цилиндра задается с помощью модели дисперсии Друде, в которой относительная диэлектрическая проницаемость определяется как

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu_c)},$$

где ν_c (с^{-1}) – частота столкновений, $\omega_p = 5.64 \times 10^4 \sqrt{n_e}$ $\text{рад} \times \text{с}^{-1}$ – круговая плазменная частота электронов, $\omega = 2\pi \times 24 \times 10^9$ $\text{рад} \times \text{с}^{-1}$ – круговая частота нагрева, n_e (см^{-3}) – концентрация плазмы. Частота упругих столкновений электронов с нейтральными частицами ν_c определяется по формуле [6]

$$\nu_c = 5.93 \times 10^7 \sqrt{E} P_c p,$$

где E – энергия электронов, эВ, P_c – вероятность столкновений, $\text{см}^{-1} \times \text{Торр}^{-1}$, p – давление, Торр. Для разряда атмосферного давления ($p=760$ Торр) в потоке углекислого газа вероятность столкновений находится в диапазоне $30 \dots 50 \text{ см}^{-1} \times \text{Торр}^{-1}$ для характерных значений энергии электронов $0.3 \dots 0.6$ эВ [7], что дает значения $\nu_c = (1.05 \dots 1.25) \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Для удобства в расчетах частота столкновений ν_c принималась равной 10^{12} с^{-1} . Стоит отметить, что по результатам измерений плотность и температура плазмы слабо зависят от мощности нагрева. В намного большей степени на режим горения влияет компонентный состав плазмообразующей смеси. Поэтому можно считать задачу линейной для тех режимов, в которых разряд поддерживается стабильно.

В бесстолкновительной плазме значение концентрации, при котором $\omega_p = \omega$, называется критическим и соответствует практически полному отражению излучения от области, занятой плазмой. Для рассматриваемой в статье частоты нагрева 24 ГГц критическое значение концентрации составляет $7.1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

1.2. Результаты расчетов

На рис. 3 приведено сравнение распределений среднеквадратичного значения напряженности электрического поля в плазматроне при отсутствии плазмы для значений диаметра выходного отверстия 10 и 6 мм. На качественном уровне больший коэффициент отражения в случае с меньшим диаметром конуса можно определить по более выраженной периодичности усредненного поля в волноводе, которая свидетельствует о наличии стоячей волны. На выходе плазматрона наблюдается монотонное спадание напряженности с расстоянием.

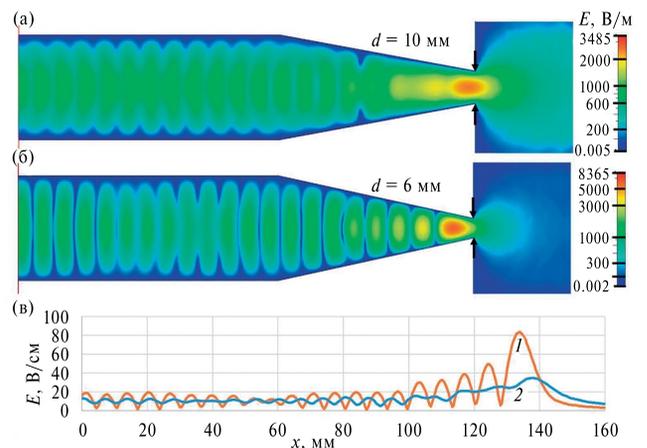


Рис. 3. Распределение среднеквадратичного значения напряженности электрического поля в плазматроне в логарифмическом масштабе при диаметре выходного отверстия 10 (а) и 6 мм (б) и вдоль оси плазматрона в линейном масштабе (в) для выходного отверстия диаметром 6 (1) и 10 мм (2). Цветовая шкала в логарифмическом масштабе.

Для определения коэффициента отражения СВЧ-излучения по мощности были использованы данные рассчитываемых в CST S-параметров, связывающих комплексные амплитуды падающей и отраженной волны в каждой моде:

$$R = \sum_{i=1}^n |S_{1(i),1(1)}|^2,$$

где n – общее число распространяющихся мод волновода на данной частоте, i – номер моды в порядке убывания продольного волнового числа. Для 24 ГГц число распространяющихся (имеющих

действительное продольное волновое число) мод составляет $n = 32$. Полученный график коэффициента отражения в зависимости от диаметра выходного отверстия представлен на рис. 4.

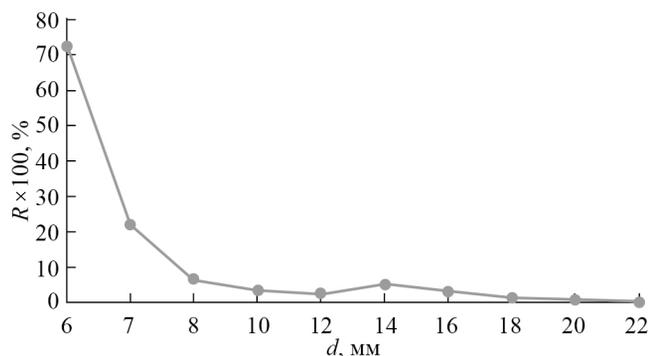


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от диаметра выходного отверстия плазмотрона.

Как и следовало ожидать, коэффициент отражения СВЧ-излучения возрастает с уменьшением выходного диаметра. Можно видеть, что требуемый уровень отраженной мощности ($\leq 10\%$) может быть получен при диаметре не менее 8 мм. Например, для используемого в эксперименте плазмотрона с диаметром 10 мм коэффициент отражения не превышает 4%. При диаметре, меньшем 8 мм, стабильная работа возможна лишь на низких уровнях мощности. Наибольшие доли по мощности в модовом составе отраженного излучения имеют моды TE_{11} и TE_{12} .

На рис. 5 представлена зависимость максимальной напряженности электрического поля от диаметра выходного отверстия плазмотрона при мощности падающего излучения, которая во всех расчетах составляла 1 Вт.

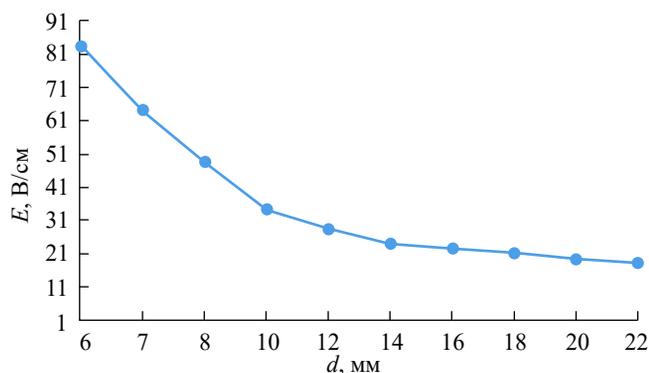


Рис. 5. Зависимость максимального значения напряженности электрического поля на оси плазмотрона от диаметра выходного отверстия плазмотрона при мощности источника 1 Вт.

Можно видеть, что конический участок в плазмотроне действительно способствует кратному росту напряженности электрического поля. Для получения напряженности при произвольной мощности P достаточно использовать тот факт, что мощность пропорциональна корню из отношения мощностей:

$$E = E_0 \sqrt{P(\text{Вт}) / 1\text{Вт}}.$$

Учтем влияние бесстолкновительной плазмы на распределение электрического поля в плазмотроне. На рис. 6 представлено распределение среднеквадратичного значения напряженности электрического поля в плазмотроне при диаметре выходного отверстия 8 мм без плазмы и с плазменным цилиндром (черный контур) для близкой к критическому значению концентрации электронов ($n_e = 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Можно видеть, что добавление плазменного цилиндра приводит к росту коэффициента отражения, что связано в первую очередь с увеличением эффективной длины волны при прохождении диэлектрического цилиндра. В случае, когда плазменный канал полностью перекрывает выходное отверстие электромагнитное излучение практически не выходит из волновода.

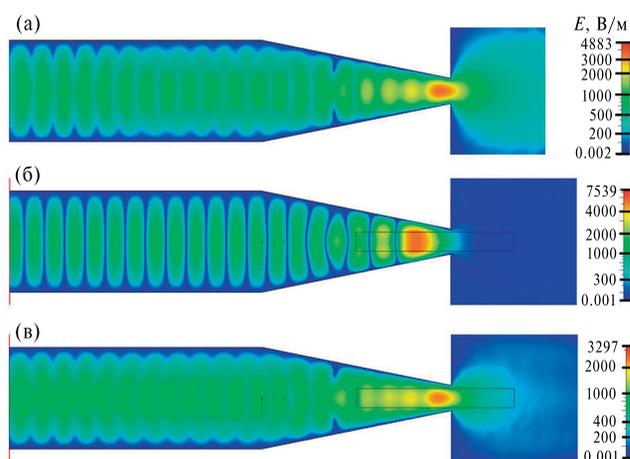


Рис. 6. Распределение среднеквадратичного значения напряженности электрического поля в плазмотроне при диаметре выходного отверстия 8 мм без плазмы (а), с плазменным цилиндром (черный контур) с концентрацией электронов $n_e = 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (б) и при частоте столкновений $\nu_c = 10^{12} \text{ с}^{-1}$ (в).

На рис. 7 приведено сравнение коэффициента отражения в модели плазмотрона без плазмы и с плазменным цилиндром, при $n_e = 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ без столкновений для значений диаметра выходного отверстия 6, 7, 8 и 10 мм. Видно, что наличие плазмы даже с концентрацией ниже критического значения приводит к недопустимому уровню отраженной мощности.

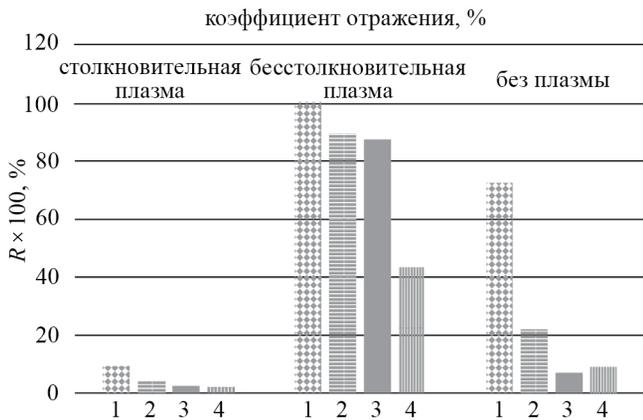


Рис. 7. Сравнение коэффициента отражения R (%) в модели плазматрона без плазмы, с плазменным цилиндром, при $n_e = 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ без учета столкновений и со столкновительной плазмой ($\nu_c = 10^{12} \text{ с}^{-1}$) при разных значениях диаметра выходного отверстия плазматрона: $d = 6$ (1), 7 (2), 8 (3) и 10 мм (4).

Интересно оценить влияние значения концентрации электронов на прохождение и отражение волн. На рис. 8 приведена зависимость коэффициента отражения от концентрации плазмы при диаметре выходного отверстия 8 мм. Видно, что коэффициент прохождения СВЧ-излучения снижается с ростом концентрации, в то время как коэффициент отражения сильно возрастает и начиная со значений $n_e \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ становится недопустимо большим.

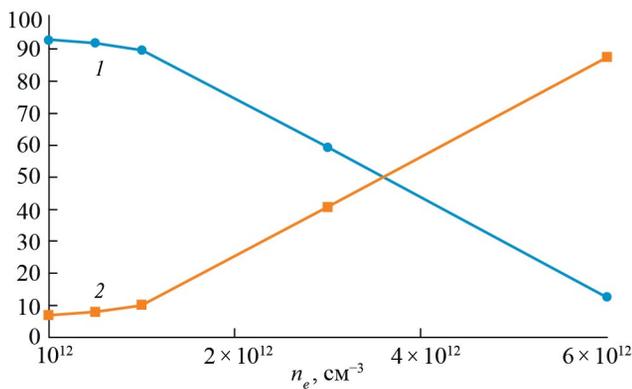


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения R (1) и коэффициента прохождения T (2) от концентрации бесстолкновительной плазмы.

Теперь рассмотрим случай столкновительной плазмы, учтя в модели плазменного цилиндра частоту столкновений, соответствующую условиям эксперимента. На рис. 6в представлено распределение среднеквадратичного значения

напряженности электрического поля для плазмы с плотностью $n_e = 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ с частотой столкновений $\nu_c = 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Из общей картины структуры поля в волноводе видно снижение коэффициента отражения при учете столкновений. По данным гистограммы с учетом столкновений на рис. 7 можно утверждать, что за счет поглощения в плазме уровень отраженной мощности многократно падает и оказывается даже ниже, чем при расчете без плазмы, что обусловлено поглощением основной части мощности СВЧ на столкновениях в плазме (70.6% мощности) и прохождении излучения в область свободного пространства через конический участок (27% мощности). В частности, при диаметре выходного отверстия $d = 6$ мм требования на коэффициент отражения не выполнялись даже при расчетах без плазмы, однако при учете поглощения отраженная мощность снижается до 10.2%, что позволяет работать и в такой конфигурации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное численное моделирование структуры электромагнитных полей в СВЧ-плазматроне показывает, что уменьшение диаметра выходного отверстия сужающегося участка волновода позволяет более чем в два раза увеличить амплитуду электрического поля в области сужения. Однако при значении диаметра менее 8 мм значительно возрастает коэффициент отражения СВЧ-излучения, причем большая часть излучения сконцентрирована в моде TE_{11} , что приводит к недопустимому попаданию излучения обратно в гиротрон. Наличие в волноводе бесстолкновительной плазмы с концентрацией выше 10^{12} см^{-3} дополнительно увеличивает отражение. Однако при учете частоты столкновений, соответствующей реальным параметрам плазмы разряда атмосферного давления, коэффициент отражения уменьшается более чем в 10 раз, а основная доля мощности поглощается в плазме. Тем самым удастся увеличить в несколько раз электрическое поле при сохранении приемлемого уровня отраженной мощности.

Для проверки результатов численного моделирования в дополнение к имеющемуся конусу с диаметром 10 мм были изготовлены конические участки волновода с диаметром 6 и 8 мм. Экспериментальное тестирование показало, что с уменьшением выходного диаметра плазматрона диапазон параметров, при которых существует разряд, существенно расширяется, а коэффициент поглощения СВЧ-излучения в плазме превышает 80%. В случае отверстия диаметром 8 мм разряд поддерживаетесь при значениях мощности вплоть до 2 кВт, для 6 мм — поддержание разряда в стабильном режиме возможно при мощности до 1 кВт. При дальнейшем увеличении мощности плотность плазмы

приближается к критической, и уровень отраженного излучения сильно возрастает до недопустимых значений.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FFUF-2023-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sabchevski S., Glyavin, M., Mitsudo S. et al.* // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2021. V. 42. P. 715. <https://doi.org/10.1007/s10762-021-00804-8>
2. *Egorov S.V., Ereemeev A.G., Kholoptsev V.V. et al.* // Rev. Sci. Instruments. 2022. V. 93. № 6. <https://doi.org/10.1063/5.0093341>
3. *Bogdashov A.A., Fokin A.P., Glyavin M.Yu. et al.* // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2020. V. 41. P. 164. <https://doi.org/10.1007/s10762-019-00655-4>
4. *Мансфельд Д.А., Водопьянов А.В., Синцов С.В. и др.* // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49. № 1. С. 39. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.01.54057.19384>
5. *Мансфельд Д.А.* // Тез. докл. конф. “Физика низкотемпературной плазмы”. Казань, 5–9.06.2023. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2023. С. 56.
6. *Raizer Yu.P.* Gas Discharge Physics. New York: Springer, 1991.
7. *Yukikazu Itikawa* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. V. 31. P. 749. <https://doi.org/10.1063/1.1481879>

OPTIMIZATION OF THE WAVEGUIDE STRUCTURE OF A PLASMA REACTOR SUPPORTED BY POWERFUL MICROWAVE RADIATION OF A GYROTRON AT A FREQUENCY OF 24 GHz

D. A. Mansfeld*, N. V. Chekmarev, S. V. Sintsov, A. V. Vodopyanov

*Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS,
46 Ul'yanov Str., Nizhny Novgorod, 603950 Russian Federation*

**E-mail: mda1981@ipfran.ru*

Received December 12, 2023, revised February 15, 2023, accepted February 25, 2024

Numerical simulation of electromagnetic fields in a waveguide plasma torch has been carried out, in which microwave plasma heating is carried out by continuous radiation from a technological gyrotron with a frequency of 24 GHz and a power of up to 5 kW. It is shown that a decrease in the output diameter of the plasma torch makes it possible to more than double the amplitude of the electric field, but when the diameter decreases to 8 mm, the reflection coefficient increases significantly, which leads to reflected radiation entering the gyrotron. It is shown that taking into account the collision frequency corresponding to the real parameters of the atmospheric pressure discharge leads to a decrease in the reflection coefficient by more than 10. It has been experimentally confirmed that with a decrease in the output diameter of the plasma torch, the range of discharge maintenance parameters significantly expands, and the absorption coefficient exceeds 80%.

Keywords: microwave plasmatron, numerical modeling, atmospheric pressure discharge