

Импульсный СВЧ плазмотрон малой мощности

С. П. Мартынюк, А. П. Моторненко, К. Шунеманн¹, И. Г. Скуратовский

*Институт радиофизики и электроники НАН Украины,
Украина, 61085, г. Харьков, ул. Академика Проскуры, 12
briz@ire.kharkov.ua*

*¹Институт микроволновой техники,
Технический университет, Гамбург-Гамбург
Германия, 21071, Гамбург*

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2002 г.

Изучены особенности СВЧ плазмотрона, формирующего инициированный факельный разряд в условиях, когда на непрерывную мощность (2 Вт) накладывались импульсы микроволновой мощности (10 Вт). Исследования проведены на частоте 10 ГГц. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон. Оценены потери мощности на отражение и излучение при импульсной работе СВЧ плазмотрона для разных длительностей импульсов и периодов их повторения в зависимости от расхода аргона. Получен высокий уровень передачи мощности в микроволновый факел в импульсном режиме (более 93 %).

Вивчено особливості НВЧ плазмотрона, який формує ініційований факельний розряд в умовах, коли на неперервну потужність (2 Вт) накладалися імпульси мікрохвильової потужності (10 Вт). Дослідження проведено на частоті 10 ГГц. Як плазмоутворюючий газ використовувався аргон. Оцінено втрати потужності на відбиття та випромінювання при імпульсній роботі НВЧ плазмотрона для різних тривалостей імпульсів і періодів їх повторення в залежності від витрат аргону. Одержано високий рівень передачі потужності в мікрохвильовий факел в імпульсному режимі (понад 93 %).

Введение

Проблема создания многофункциональных электрически управляемых генераторов низкотемпературной плазмы является одной из самых важных и приоритетных. Наиболее полно этим требованиям в настоящее время удовлетворяют СВЧ плазмотроны, которые находят широкое применение как источники чистой низкотемпературной плазмы с регулируемой температурой и высокой концентрацией заряженных частиц [1-6]. Как правило, в таких плазмотронах используется либо непрерывный, либо импульсный режим работы СВЧ генератора. Вместе с тем сочетание импульсной и непрерывной работы СВЧ плазмотрона обес-

печивает принципиальную возможность влиять на соотношение средних энергий электронов и тяжелых частиц в плазме во время импульсов, а в паузе между ними – варьировать температуру газа и величину минимальной концентрации заряженных частиц.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей плазмотрона, работающего в режиме импульсно-модулированных колебаний СВЧ генератора малой мощности.

Техника эксперимента

Нами использовалась конструкция СВЧ плазмотрона коаксиального типа, схематически показанная на рис. 1 и достаточно подро-

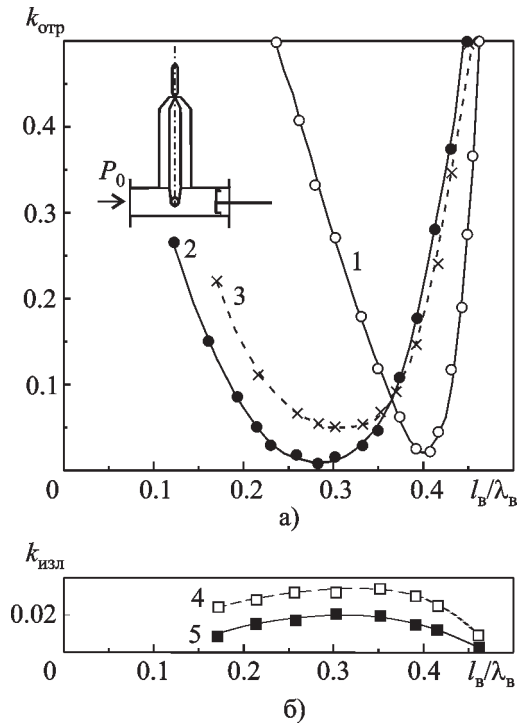


Рис. 1. а) Настраиваемые характеристики при непрерывной (кривые 1, 2) и импульсной (кривая 3) работе СВЧ плазмотрона; б) зависимости коэффициента излучения МФ (кривые 4,5) от положения КЗ поршня

но описанная в работе [7]. По существу, плазмотрон представлял собой волноводно-коаксиальную структуру с Т-образным согласующим элементом и настроенным короткозамыкающим (КЗ) поршнем. Открытая часть отрезка коаксиальной линии заканчивалась выходным соплом, с помощью которого в области иницирования разряда повышалась напряженность электрического поля СВЧ. При выбранной геометрии коаксиала и сопла напряженность поля в этой области превышала примерно в три раза напряженность поля в коаксиальной части резонатора. Плазмообразующий газ одним из предусмотренных способов подводился в область разряда через внутренний полый проводник коаксиала с внутренним диаметром 0.8 мм. Далее газ свободно истекал в окружающее пространство. Микроволновый факел (МФ), как продолжение внутреннего проводника коаксиала, иницировался в свободном пространстве посредством крат-

ковременной закоротки внутреннего и внешнего проводников коаксиала после подачи СВЧ мощности и плазмообразующего газа.

Основные электрические параметры МФ, образуемого в подобной волноводно-коаксиальной конструкции с помощью генератора непрерывного действия трехсантиметрового диапазона, описаны в работе [7]. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон с расходом $0.3 \div 3$ л/мин. МФ формировался в виде яркого тонкого плазменного цилиндра (шнуровой разряд) в открытом пространстве и имел длину ≤ 6 мм и диаметр ≤ 0.6 мм. В зависимости от расхода газа и подводимой мощности шнуровой разряд мог переходить в МФ с большим количеством шнуров [8]. Несмотря на относительно небольшую мощность магнетрона непрерывного действия (≤ 10 Вт), в плазме МФ из-за его малых размеров достигались высокие значения удельной поглощенной мощности – несколько киловатт в кубическом сантиметре. При этом плазма МФ была сильно неравновесной с концентрацией заряженных частиц $\approx 10^{14} \div 10^{15}$ см $^{-3}$.

Применительно к поставленной задаче мы изменили схему питания магнетрона. В результате он мог работать либо в непрерывном режиме с мощностью до 12 Вт, либо в импульсном с регулируемой длительностью импульсов $t_{и} = 3 \div 200$ мкс при периоде $T = 6 \div 400$ мкс. Величина мощности между импульсами могла регулироваться в пределах от нуля до значения мощности в импульсе. Для возбуждения МФ в плазмотроне, работающем в непрерывном режиме, всегда требовалась начальная ионизация. При импульсной работе плазмотрона небольшая непрерывная мощность (необходимая для существования иницированного стационарного разряда) складывалась с импульсной мощностью. В этом случае отпала необходимость иницирования МФ при каждом последующем импульсе.

Значения подводимой P_0 и отраженной $P_{отр}$ мощностей, как и в работе [9], измерялись компенсационным методом с использованием направленных ответвителей, поляризационных аттенуаторов, детекторов и осциллографов. Калибровка мощностей производилась с помощью термисторного измерителя мощности.

Величина излученной мощности $P_{\text{изл}}$ определялась по измеренной диаграмме направленности излучения МФ в волновой зоне.

В процессе экспериментов регистрировалось также оптическое излучение МФ. Для этого его изображение, увеличенное в три раза с помощью линзы, проектировалось на щель с размерами 0.4×1 мм, за которой располагался фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-79. При этом узкая часть щели была ориентирована вдоль оси изображения МФ с возможностью перемещения его относительно щели.

Результаты экспериментов

Как показали результаты исследований энергетических характеристик плазмотрона, запитываемого непрерывной мощностью [9], при определенном положении КЗ поршня достигаются весьма высокие коэффициенты передачи мощности в МФ. В случае импульсного режима питания плазмотрона параметры МФ изменяются во времени при неизменном положении КЗ поршня. Поэтому возникает вопрос об эффективности передачи мощности в МФ в случае импульсного режима работы плазмотрона.

На рис. 1, а приведены настроечные характеристики плазмотрона для непрерывного, а также импульсного режимов работы при $t_{\text{и}} = 150$ мкс и $T = 300$ мкс. Мощность СВЧ излучения в импульсе составляла 12 Вт, а в паузе между импульсами – 2 Вт при расходе аргона 0.5 л/мин. Кривая 1 соответствует зависимости коэффициента отраженной мощности $k_{\text{отр}}$ от относительного положения КЗ поршня $l_{\text{в}}/\lambda_{\text{в}}$ ($l_{\text{в}}$ – расстояние от КЗ поршня до оси коаксиальной части резонатора, $\lambda_{\text{в}}$ – длина волны в волноводе) для работы плазмотрона при непрерывной подводимой мощности $P_0 = 2$ Вт, кривая 2 – при мощности $P_0 = 12$ Вт. Кривой 3 представлена зависимость усредненной по времени величины $k_{\text{отр}}$ от положения КЗ поршня для выбранного импульсного режима работы плазмотрона, рассчитанная по данным кривых 1 и 2; крестиками на рисунке обозначены экспериментальные значения $k_{\text{отр}}$. Отметим, что при

$l_{\text{в}}/\lambda_{\text{в}} < 0.18$ величина мощности $P_0 = 2$ Вт недостаточна для поддержания разряда. Как видно из рис. 1, а, экспериментальные точки достаточно хорошо описываются кривой 3. Дальнейшие эксперименты подтвердили, что при импульсной работе плазмотрона с длительностью импульсов в сотни микросекунд оптимальные значения положения КЗ поршня могут быть оценены по данным непрерывного режима его работы при мощности, соответствующей средней мощности импульсного режима.

На рис. 1, б пунктирной кривой 4 представлена расчетная зависимость усредненного по времени коэффициента излучения $k_{\text{изл}}$ при импульсном режиме работы плазмотрона. Кривая 4 и экспериментальные точки на ней соответствуют условиям рис. 1, а. Экспериментальная кривая 5 соответствует условиям, когда внутренний проводник коаксиала был утоплен на 1 мм относительно среза сопла за счет удлинения наружного проводника. Как видно из сопоставления данных рис. 1, б, потери мощности на излучение могут быть уменьшены почти в два раза. Суммарные минимальные потери мощности на отражение и излучение в случае импульсной работы плазмотрона составляют примерно 7 %.

Ниже в таблице приведены экспериментальные значения $l_{\text{в}}^{\text{опт}}/\lambda_{\text{в}}$ оптимальных положений КЗ поршня, а также коэффициентов отражения $k_{\text{отр}}$ и излучения $k_{\text{изл}}$ в зависимости от величины подводимой мощности P_0 для двух значений расхода аргона ν при работе плазмотрона в непрерывном режиме. По этим данным можно оценить положение КЗ поршня, соответствующее минимальным потерям мощности при импульсном режиме работы плазмотрона с известной средней подводимой мощностью.

По-видимому, настроечные характеристики импульсного плазмотрона заметно усложнятся при переходе к коротким импульсам. На рис. 2 приведены характеристики работы импульсного плазмотрона для условий $t_{\text{и}} = 10$ мкс, $T = 30$ мкс при мощностях в импульсе и между импульсами 12 и 2 Вт соответственно; расход аргона составил

Таблица

V , л/мин	P_0 , Вт	1.2	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
1.0	$I_B^{опт} / \lambda_B$	0.44	0.41	0.38	0.35	0.32	0.30	0.28
	$k_{отр}$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03
	$k_{изл}$	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04
2.0	$I_B^{опт} / \lambda_B$	0.44	0.41	0.38	0.35	0.32	0.31	0.29
	$k_{отр}$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	$k_{изл}$	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04

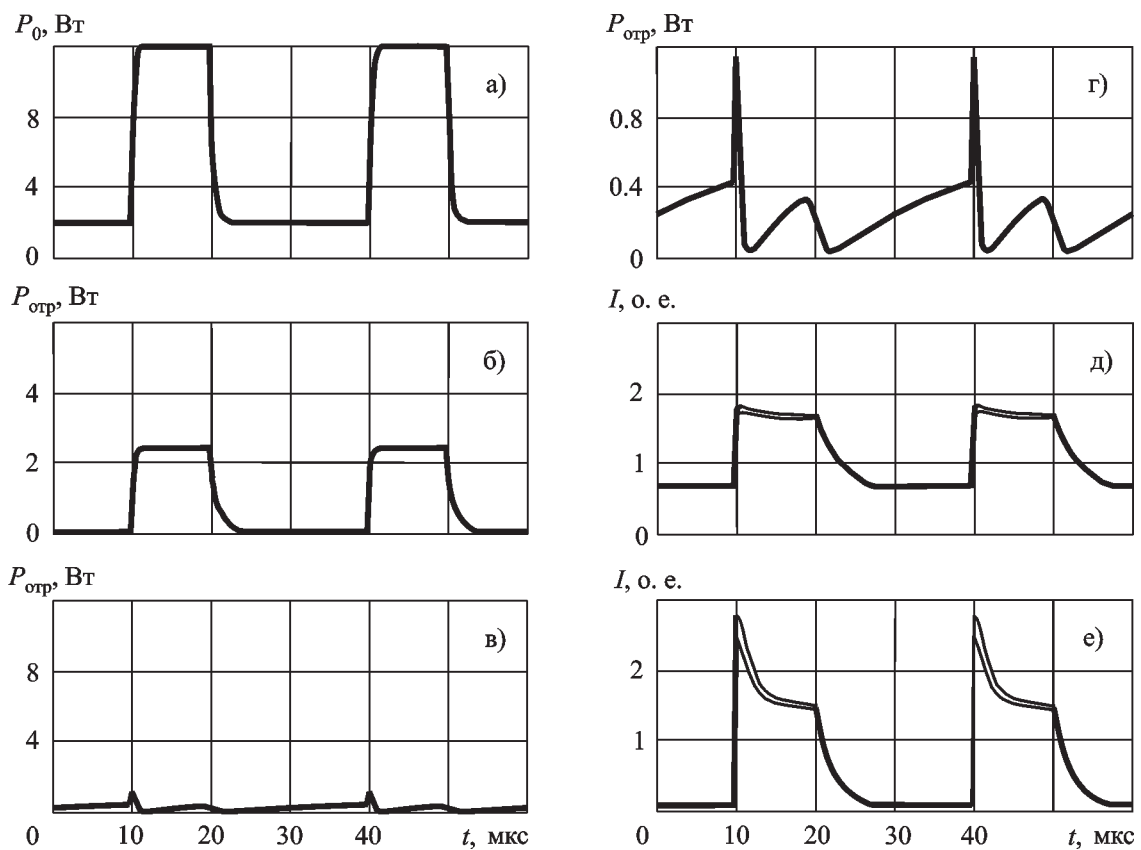


Рис. 2. Осциллограммы подводимой (а) и отраженной (б, в, г) мощностей, а также интегральной интенсивности свечения выделенных участков МФ (д, е)

$v = 0.5$ л/мин. На рис. 2, а приведена осциллограмма подводимой СВЧ мощности, а на рис. 2, б-г – отраженной. Рис. 2, б соответствует условию $l_b/\lambda_b = 0.4$, а рис. 2, в и г – значению $l_b/\lambda_b = 0.31$ (рисунки отличаются масштабом по осям ординат). На рис. 2, д и е приведены осциллограммы интегрального свечения участков МФ для двух значений расстояния от среза сопла – 1.5 и 4.5 мм соответственно.

Как видно из рис. 2, а, в и г, при коротких импульсах также можно обеспечить условия малых потерь на отражение. Вместе с тем, как видно из рис. 2, г, кривая отраженной мощности имеет достаточно сложный вид. По-видимому, в этих условиях уже проявляется влияние ионизации и частичной деионизации газа. Так, в начале каждого импульса наблюдается пик отраженной мощности. Затем происходит изменение отраженного сигнала, связанное с установлением квазистационарного состояния плазмы МФ и изменением газодинамического течения в результате нагрева газа в течение импульса, а в паузе между импульсами – с кинетикой распадающейся плазмы. Оценки показывают, что и при коротких импульсах плазмотрон работает весьма эффективно (потери на отражение и излучение не превышают 7%), МФ является устойчивым. В зависимости от положения настроенного КЗ поршня потери СВЧ мощности плавно изменяются, так что можно реализовать минимальные потери на отражение не только в импульсе, но также и в паузе между импульсами. Осциллограмма для одного из произвольных положений КЗ поршня показана на рис. 2, б.

Интересно ведут себя характеристики свечения разных участков МФ (кривые на рис. 2, д и е). Отметим две их особенности: скачкообразный рост интенсивности на начальном участке импульса свечения дальнего от сопла участка МФ (рис. 2, е) и слабое отличие интенсивности свечения разных участков МФ (дальнего и ближнего от сопла) на плато импульса (рис. 2, д и е).

Детальное изучение особенностей свечения МФ будет проведено в дальнейшем с привлечением результатов исследования спектральных линий.

Выводы

По результатам исследований можно заключить, что импульсный режим маломощного СВЧ плазмотрона коаксиального типа позволяет реализовать электрически управляемый факел низкотемпературной плазмы с высоким уровнем передачи мощности в нагрузку (более 93 %) в широком диапазоне изменения длительности импульсов и периода их повторения. Такой источник плазмы может быть использован при проведении модельных исследований, а также для практических целей в технологическом процессе, не допускающем сколько-нибудь заметного нагрева тяжелой компоненты плазмообразующего газа.

Авторы признательны Д. М. Вавриву за внимание к работе и полезные обсуждения результатов.

Работа выполнена по плану бюджетной темы и частично поддержана Европейским союзом по контракту IC15СТ980509.

Литература

1. В. М. Батенин, И. И. Климовский, Г. В. Лысов и др. СВЧ генераторы плазмы. Физика, техника, применение. Москва, Энергоиздат, 1988, 224 с.
2. С. В. Дресвин, А. А. Бобров, В. М. Лелевкин и др. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. Новосибирск, Наука, Сиб. отд., 1992, 319 с.
3. M. Moisan, Z. Zakrzewski and J. C. Rastaing. Plasma Sources Sci. Technol. 2001, **10**, No. 3, pp. 378-394.
4. А. П. Грачев, И. И. Есаков, К. В. Ходатаев. ЖТФ. 1998, **68**, №12, с. 15-24.
5. E. E. Kunhardt. IEEE Trans. Plasma Sci. 2000, **28**, No. 1, pp. 189-200.
6. П. М. Канило, Н. И. Расюк, Д. М. Ваврив и др. Экология и ресурсосбережение. 2001, №1, с. 1-6.
7. А. Р. Моторненко, К. Schünemann. Int. J. Electron Commun. (AEÜ), 2001, **55**, No. 5, pp. 337-341.

8. А. Я. Кириченко, А. П. Моторненко, О. А. Суво-
рова. Радиофизика и электроника. 2001, **6**, №2,
с. 242-246.
9. С. П. Мартынюк, А. П. Моторненко, К. Шунеманн
и др. Радиофизика и электроника. 2001, **6**, №2,
с. 256-260.

Low Power Pulse Microwave Plasmatron

**S. P. Martynyuk, A. P. Motornenko,
K. Schünemann and I. G. Skuratovskiy**

The specific features of the microwave plas-
matron forming the initiation torch discharge un-
der conditions when the microwave power puls-

es (10W) were put on the continual power (2W)
have been studied. Studies were performed at
the 10 GHz frequency in argon expiring in free
space. Reflection and radiation losses are esti-
mated in the microwave plasmatron pulse re-
gime for various pulse repetition periods depend-
ing on the argon rate. The power transfer into
the microwave torch in the pulse regime was
obtained higher then 93 %.