

04;09;12

Электромагнитное поле в плазменной струе СВЧ плазмотрона

© А.Я. Кириченко, А.П. Моторненко, А.Ф. Русанов, О.А. Суворова, В.М. Яковенко

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,
61085 Харьков, Украина
E-mail: shig@ire.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 12 мая 2000 г.)

Исследуется СВЧ плазмотрон коаксиального типа, работающий на частоте 10 GHz. Найдены распределения СВЧ полей в плазменной струе плазмотрона при использовании колеблющейся струны в качестве малого возмущающего тела. Обнаружено различие в фазовой струе СВЧ поля в плазме и поля вдоль внешней границы плазменного потока. Установлено наличие медленной поверхностной электромагнитной волны в плазменном потоке.

Введение

Широкое применение в физических исследованиях и технике находят генераторы плотной низкотемпературной плазмы — плазмотроны, основанные на принципе продувания холодного рабочего газа через область горения разряда. В семидесятых годах была показана возможность создания стационарного потока сильно неравновесной (холодной) плазмы при атмосферном давлении с помощью СВЧ источника электромагнитных колебаний непрерывного действия, работающего в 3-сантиметровом диапазоне [1,2]. Электродинамическая структура такого плазмотрона представляла собой волноводно-коаксиальный переход, подача рабочего газа (аргона) осуществлялась по полуму внутреннему проводнику коаксиала, ламинарная плазменная струя являлась его продолжением. Авторами [1,2] изучены спектральные и электрические параметры плазменного потока в зависимости от режимов работы плазмотрона. Как показано в этих работах, при свободном вытекании аргона в атмосферу со скоростью 0.2–0.6 l/min и подаче мощности от 3 см магнетрона до 10 W формируется ламинарный поток плазмы СВЧ разряда высокой яркости с диаметром плазменной струи менее 1 mm и длиной до 10 mm. Температура электронов в такой плазме составляет $\sim 10^4$ K, температура газа на оси плазменного потока 600–1000 K, концентрация электронов в плазме превышает 10^{14} cm $^{-3}$. Благодаря своим уникальным параметрам такой плазмотрон было предложено использовать как эффективный источник света для спектрального анализа и в качестве плазменного газового нагрева при автоматизированной пайке многослойных печатных плат.

Следует заметить, что интерес к неравновесным стационарным плазменным источникам СВЧ не пропал до настоящего времени, о чем свидетельствуют, например, работы [3,4].

Хотя авторы [1,2] уверены, что в плазме существует высокая напряженность электрического поля, которая является физической основой ее образования, до настоящего времени отсутствуют какие-либо сведения об особенностях электромагнитных полей в СВЧ плазмотроне такого типа. Это объясняется трудностями, связанными

с малостью размеров плазменного образования в сравнении с длиной электромагнитной волны, формирующей разряд. Продольные размеры плазменного потока значительно, а поперечные на полтора порядка меньше длины электромагнитной волны, формирующей разряд. Кроме этого, разряд развивается в свободном пространстве, где методик исследований СВЧ полей не так много. Заметим, что в данном СВЧ плазмотроне электрические параметры плазмы удовлетворяют условиям распространения поверхностной электромагнитной волны. Можно высказать предположение о том, что уникальные характеристики плазменного потока обусловлены именно наличием медленной поверхностной волны.

Целью настоящей работы являются изучение характеристик СВЧ поля как внутри, так и вне плазменного потока и выяснение возможности существования вдоль плазменного потока интенсивной поверхностной электромагнитной волны.

Особенности поверхностных волн в плазменном цилиндре малого радиуса

В случае ограниченной плазмы распространение поверхностных волн в ней, роль которых существенна в разного рода электромагнитных процессах, широко изучено [5,6]. В этих же работах рассмотрены и волноводные свойства ограниченной холодной изотропной плазмы. При этом подробному анализу подверглись отдельные случаи, в которых дисперсионные соотношения допускают аналитические решения. Представление плазменной струи СВЧ плазмотрона в форме ограниченного по длине цилиндра с присущими ей конкретными параметрами требует численного решения дисперсионного уравнения.

Рассмотрим структуру, состоящую из бесконечно длинного плазменного цилиндра радиусом a с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , находящегося в безграничной воздушной среде ($\epsilon_2 = 1$). Дисперсионное уравнение, описывающее распространение поверхностной электромагнитной волны в такой структуре с холодной однородной плазмой при учете столкновений частиц,

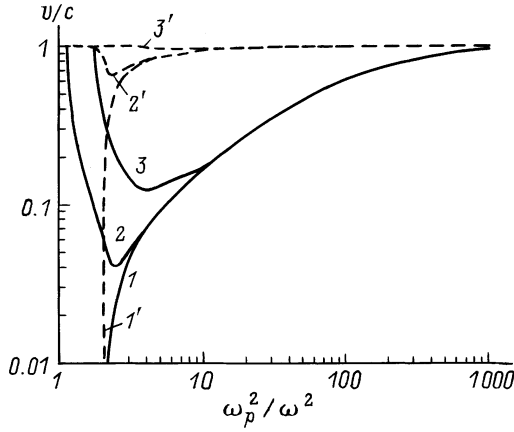


Рис. 1. Расчетные зависимости величины замедления v/c электромагнитной волны от соотношения ω_p^2/ω^2 . ν/ω : 1, 1' — 0; 2, 2' — $2 \cdot 10^{-1}$; 3, 3' — 1.

может быть представлено в следующем виде [5]:

$$\left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu)} \right] \frac{\chi_2 I_1(\chi_1 a)}{\chi_1 I_0(\chi_1 a)} \frac{K_0(\chi_2 a)}{K_1(\chi_2 a)} + 1 = 0, \quad (1)$$

где $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 N_e / m}$ — плазменная (лангмюровская) частота; ω — круговая частота поверхностной электромагнитной волны; $\chi_\alpha = \sqrt{q_z^2 - k_\alpha^2}$; $k_\alpha^2 = \varepsilon_\alpha \omega^2 / c^2$; $\alpha = 1, 2$ (ось z направлена вдоль оси плазменного цилиндра); q_z — продольное волновое число; $I_0(\chi_1 a)$, $I_1(\chi_1 a)$ — модифицированные функции Бесселя первого рода; $K_0(\chi_2 a)$, $K_1(\chi_2 a)$ — функции Макдональда; ν — эффективная частота столкновений частиц; N_e — концентрация заряженных частиц в плазме; e, m — заряд и масса электрона; c — скорость распространения волны в свободном пространстве.

Фазовая скорость электромагнитной волны определяется

$$v = \omega / \text{Re} q_z. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены зависимости величины замедления v/c электромагнитной волны от соотношения ω_p^2/ω^2 , полученные численно при решении уравнения (1). Для сравнения были выбраны плазменные цилиндры, для которых $a/\lambda = 0.01$ (сплошные кривые) и $a\lambda = 3$ (пунктир) ($\lambda = 2\pi c/\omega$). Замедления волны рассчитаны для случаев отсутствия столкновений частиц $\nu/\omega = 0$ (кривые 1 и 1'), при $\nu/\omega = 2 \cdot 10^{-1}$ (кривые 2 и 2') и 1 (кривые 3 и 3').

Как видно, для обоих плазменных цилиндров при отсутствии столкновений частиц ($\nu/\omega = 0$) условию распространения поверхностной электромагнитной волны соответствует известное соотношение

$$\omega^2 \leq \omega_p^2 / 2. \quad (3)$$

При этом в случае тонкого плазменного цилиндра (кривая 1) имеет место заметное снижение фазовой

скорости волны по сравнению с волной, распространяющейся в цилиндре большого радиуса (кривая 1'). В реальных условиях получения плазмы, когда $\nu/\omega \neq 0$, столкновения очень сильно ограничивают возможности реализации медленной поверхностной электромагнитной волны для плазменного цилиндра большого радиуса (кривые 2' и 3') (аналога полуограниченной плазмы в плоском случае). При $\nu/\omega = 1$ для этого цилиндра (кривая 3') при всех значениях ω_p^2/ω^2 , где существует поверхностная волна, ее фазовая скорость практически равна скорости света.

В противоположность этому в случае тонкого плазменного цилиндра (кривые 2 и 3) при выбранных нами значениях ν/ω в широком диапазоне значений ω_p^2/ω^2 поверхностная электромагнитная волна является замедленной и даже при $\nu/\omega = 1$ может достигать значений $v/c \approx 0.1$.

Относительные размеры скин-слоя D/a и длины затухания l/λ поверхностной электромагнитной волны в тонком цилиндре в диапазоне $\omega_p^2/\omega^2 = 80 \div 300$ составляют $D/a \approx 1-0.3$ и $l/\lambda \approx 0.1-1$. Видно, что для средних значений ω_p^2/ω^2 в этом интервале можно не учитывать наличие скин-слоя в тонком плазменном цилиндре и изучать распространение волны на коротком участке плазмы $L \leq \lambda/2$, что неоднократно подтверждалось в экспериментах с плазмой, возбуждаемой СВЧ сигналом.

Постановка эксперимента

Конструктивные особенности исследуемого СВЧ плазмотрона и схема его питания подробно описаны в [1,2]. Для проведения измерения СВЧ полей в струе плазмотрона в СВЧ тракт, соединяющий магнетрон с плазменным источником, включался направленный ответвитель, принимающий опорный и информационный сигналы. Для сравнения изучались поля вдоль металлического проводника, которым заменялся плазменный поток. Напряженность электрической составляющей СВЧ поля в свободном пространстве вблизи сопла как в плазменном потоке, так и вне его анализировалась с использованием метода возмущения поля малым пробным телом. В качестве последнего служила стальная струна диаметром 0.3 mm и длиной 180 mm, проводимая в колебательное движение электромагнитом, питаемым переменным током от звукового генератора. Этим же сигналом синхронизировалась горизонтальная развертка осциллографа. Осциллограф служил индикатором сигнала, поступающего с детектора, расположенного в измерительном плече направленного ответвителя. В это плечо поступал опорный сигнал от среза сопла плазмотрона, постоянный по амплитуде и фазе, а также сигнал, отраженный от колеблющейся струны, обусловленный измеряемым электрическим полем.

Величина сигнала, отраженного от пробного тела и фиксируемая приемником, пропорциональная напряжен-

ности электрического СВЧ поля в точке его расположения. При наличии опорного сигнала на детекторе происходит сложение его с сигналом от пробного тела с учетом разности фаз между ними. В связи с этим видеосигнал на экране осциллографа отражает не только изменение амплитуды напряженности измеряемого поля вдоль траектории движения пробного тела, но и возможные фазовые изменения. Таким образом, на осциллографе наблюдается амплитудно-фазовая характеристика изучаемого поля. За счет колебания металлической струны с амплитудой колебаний до 10 мм отраженный от пробного тела СВЧ сигнал, промодулированный по амплитуде с частотой колебаний струны, выделенный на экране осциллографа, а опорный сигнал задерживался проходной емкостью на входе осциллографа. Подробнее используемая схема измерения полей в свободном пространстве в ближнем поле излучателей описана в [7].

Результаты измерений и их обсуждение

Плазменный поток, формируемый в изучаемом плазмотроне, имеет практически цилиндрическую форму с небольшой конусностью и диаметром 0.5–0.8 мм, зависящим от режимов его питания. СВЧ мощность генератора и скорость протекания аргона определяют длину плазменного потока, составляющую в наших экспериментах 3–8 мм.

Микроволновыми измерениями было показано, что основная часть мощности (свыше 90%), подводимой к разряду, затрачивается на формирование и поддержание разряда в плазме и лишь небольшая часть (менее 2–3%) излучается в свободное пространство "плазменной антенной" (7–8% мощности отражается от сопла плазмотрона в сторону генератора). Вывод о том, что основная часть мощности поглощается в плазменном потоке в данных опытах подтверждается и тем, что при замене его отрезком медного провода той же длины и при неизменной величине подводимой мощности от генератора СВЧ излучение в свободное пространство возрастает на два порядка. Характер зависимости излучаемой мощности от длины излучателя как в случае плазменного потока в условиях стабильного горения разряда, так и в случае металлического аналога практически такой же.

При отсутствии СВЧ разряда и металлической антенны электромагнитное поле из сопла плазмотрона практически не выходит и заметно лишь до расстояния, сравнимого с диаметром внешнего электрода сопла. На рис. 2 приведена зависимость квадрата напряженности (E^2) электрического поля по сечению плазменной струи на расстоянии $Z = 0.5$ мм (кривая 1). При поджиге СВЧ разряда электромагнитное поле резко возрастает как в непосредственной близости от сопла, так и вдали от него. Кривая 2 представляет собой характер изменения квадрата напряженности электрической составляющей поля при наличии СВЧ разряда диаметром 0.7 мм на расстоянии $Z = 3$ мм. Необходимо отметить, что

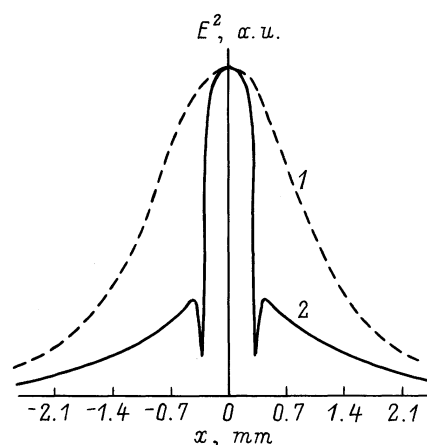


Рис. 2. Распределение электрического поля при отсутствии (1) и наличии разряда (2).

кривая 1 снималась при усилении, в 25 раз большем, чем кривая 2. Обращает на себя внимание и то, что при выходе пробного тела из области плазмы электрическое поле изменяется скачкообразно.

Амплитудно-фазовые зависимости СВЧ поля, полученные в нескольких сечениях по длине плазменного потока, представлены на рис. 3. Длина плазменного потока в этом опыте $L = 5$ мм поддерживалась мощностью магнетрона $P = 7$ Вт при скорости протекания аргона $V = 0.61$ мин. Как видно из рис. 2, фазы поля в начале разряда и в его конце различаются на 180° . Во всех сечениях поле внутри плазменного потока во много раз превосходит поле на внешней его поверхности, причем поле на границе плазмы с окружающим пространством всегда изменяется скачкообразно. Небольшая асимметрия, наблюдаемая в распределении поля на границе плазменного шнура в начале потока, связана с несколько несимметричным расположением внутреннего электрода коаксиала. При удалении от сопла плазмотрона асимметрия в характере распределения полей исчезает. Максимального значения поле в разряде во всех наших экспериментах достигает вблизи сопла и его фаза, совпадает в этом сечении с фазой опорного сигнала.

Эти особенности в полной мере проявляются при измерениях поля вдоль оси плазменного потока. Для примера на рис. 4, а, б приведены амплитудно-фазовые зависимости распределения СВЧ поля на центральной оси плазменного потока (кривые 1), зависимости максимального значения поля вне плазмы на ее границе (кривые 2) и амплитудно-фазовые характеристики поля вдоль поверхности медного провода (кривые 3) в случае замены плазменного потока металлическим эквивалентом. Измерения проведены для двух значений длины металлического аналога и плазменного потока: 3 мм (рис. 4, а) и 7 мм (рис. 4, б), полученных при фиксированной мощности генератора $P = 8$ Вт и значениях скорости протекания аргона 0.05 и 0.71 мин соответственно.

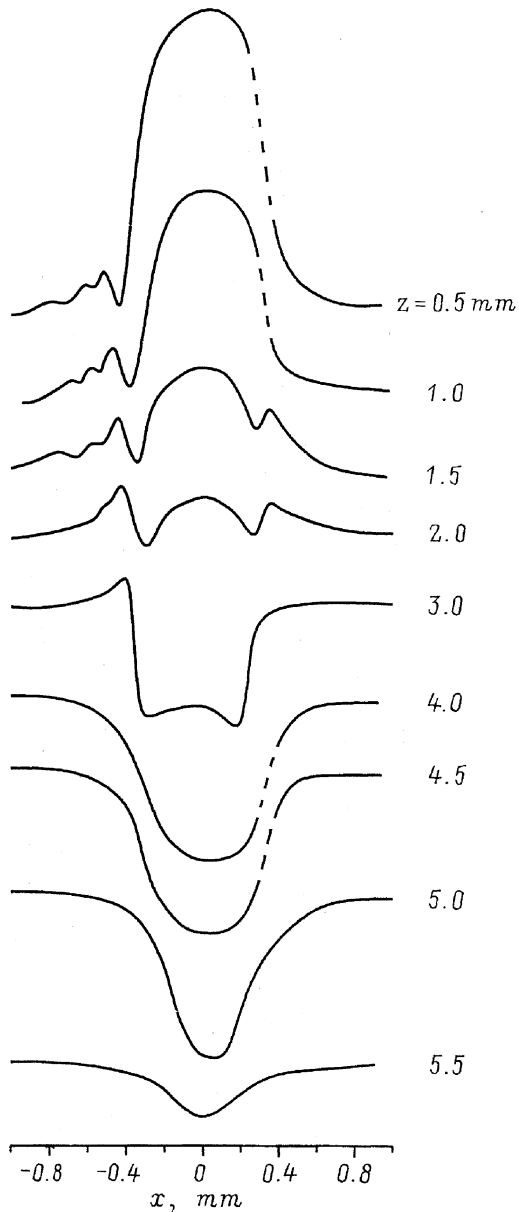


Рис. 3. Распределение электрического поля в нескольких поперечных сечениях плазменной струи. $P = 7 \text{ W}$, $V = 0.61 \text{ l/min}$, $L = 5 \text{ mm}$.

При равных длинах плазменного потока и его металлического эквивалента наблюдаются не только количественные, но и качественные различия в амплитудно-фазовых характеристиках распределения поля. Вблизи поверхности металлического эквивалента напряженность поля может быть ниже напряженности поля в плазменной струе или превосходить ее в зависимости от длины струи. Поля на внешней поверхности плазменного потока всегда намного меньше полей на поверхности металлического эквивалента и внутри плазмы. Это связано с тем, что СВЧ энергия используется в основном на поддержание плазменного потока и сконцентрирована в плазме.

Обращают на себя внимание и различия в фазовых особенностях исследуемых полей. Для металлического эквивалента с очень низким значением омических потерь в проводе характерным является влияние на распределение поля отраженной волны от свободного конца провода. В связи с этим фаза этого поля у среза сопла ($Z = 0$) существенно зависит от длины L проводника, поэтому она различна для проводников различной длины (кривые 3 на рис. 4, *a* и *b*). Следует заметить, что амплитудно-фазовая характеристика поля вдоль медного провода, превышающего длину рабочей волны в свободном пространстве, позволяла в проводимых опытах уверенно определить длину волны и сдвиги фазы у среза сопла в зависимости от длины провода.

В то же время электромагнитное поле в плазме у сопла при всех режимах питания плазмотрона независимо от длины плазменного потока однозначно принимает максимальное значение. Это свидетельствует об отсутствии в этом случае отраженной волны, о больших потерях СВЧ мощности в плазме, т.е. о хорошем согласовании плазменного потока с СВЧ трактом.

В некоторых работах (см., например, [8]) сделано предположение о том, что по характеру изменения СВЧ поля вне плазменного потока можно судить о полях внутри него. Проведенными опытами установлено, что это не всегда справедливо.

Рассмотрение характера распределения стоячей волны вдоль металлического эквивалента плазменного потока позволяет определить длину распространяющейся волны ($\lambda = 31 \text{ mm}$). Из рис. 4, *a* следует, что длина волны внутри плазмы примерно в два раза короче волны, распространяющейся вдоль металлического проводника. Следовательно, фазовая скорость волны в случае плазменного потока оказывается примерно в два раза короче волны вдоль металлического эквивалента, что может быть обусловлено поверхностной электромагнитной вол-

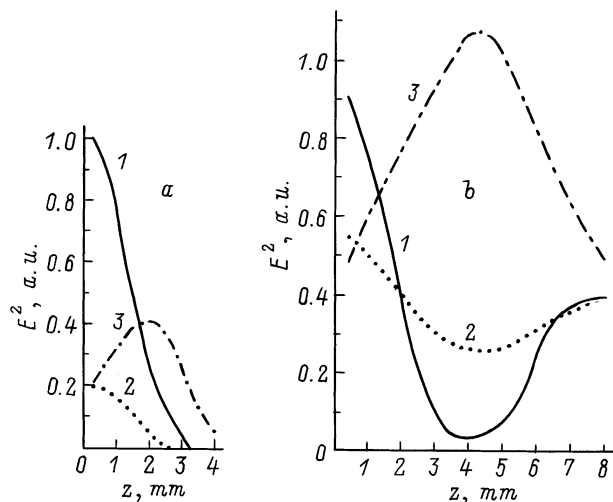


Рис. 4. Амплитудно-фазовое распределение поля при длине плазмы и скорости протекания аргона соответственно: *a* — $L = 3 \text{ mm}$, $V = 0.05 \text{ l/min}$; *b* — $L = 7 \text{ mm}$, $V = 0.71 \text{ l/min}$.

ной, распространяющейся вдоль плазменного потока с плотностью электронов, значительно выше критической (в нашем случае $N_e = 1.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Действительно, из рис. 1 следует, что в случае концентрации заряженных частиц в плазменной струе плазмотрона $N_e = 10^{14} - 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [2] и $\nu \approx \omega$ величина v/c поверхностной электромагнитной волны находится в пределах 0.5–0.7, что с учетом принятой модели однородного плазменного цилиндра с резкими границами, надо признать хорошо совпадающими с экспериментальными данными.

Заключение

Проведенными исследованиями показана возможность использования колеблющейся струны для нахождения величины СВЧ поля в струе плазмотрона. Этим методом удастся установить особенности распределения СВЧ полей как внутри плазменного потока, так и в окружающем пространстве.

Обнаружено различие в фазовой структуре СВЧ поля в плазме и поля вдоль внешней границы плазменного потока. Подтверждено, что основная часть электромагнитной энергии рассеивается внутри плазменного потока. Установлено наличие медленной поверхностной электромагнитной волны в плазменном потоке с высокими значениями электрического поля. Есть основания предполагать, что именно поверхностная волна обеспечивает уникальные геометрические и электрические параметры плазменной струи в исследуемом плазмотроне.

Список литературы

- [1] Мартынюк С.П., Моторненко А.П., Усиков А.Я. // ДАН УкрССР. Сер. А. Физ.-мат. и техн. науки. 1975. № 8. С. 734–737.
- [2] Мартынюк С.П., Моторненко А.П. // ДАН УкрССР. Сер. А. Физ.-мат. и техн. науки. 1978. № 2. С. 161–164.
- [3] Диденко А.Н., Виноградов Е.А., Ляхов Г.А. и др. // ДАН (Россия). 1995. № 2. С. 182–183.
- [4] Козлов А.Н., Ляхов Г.А., Павлов И.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Вып. 13. С. 27–33.
- [5] Кондратенко А.Н. Поверхностные и объемные волны в ограниченной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208.
- [6] Shuman W. // Z. Naturforsch. 1950. Bd 5a. H. 4. S. 181.
- [7] Kirichenko A.Ya., Suvorova O.A. // Proc. 3^d Intern. Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves". Kharkov, 1998. Vol. 2. P. 742–743.
- [8] Miyake S., Takeuchi S., Arata Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1974. Vol. 13. N 2. P. 296–305.