

УДК 537.5

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК**В.В. Власов***Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, физико-технический факультет, 61108, Харьков, пр. Курчатова, 31.**E-mail: vlasov @ pht.univer. kharkov. ua*

Поступила в редакцию 2 октября 2007 г.

В работе представлена методика расчета параметров цилиндрического резонатора, используемого в СВЧ источнике плазмы в неоднородном магнитном поле в условиях электронного циклотронного резонанса. Приведены результаты изучения условий существования СВЧ разряда при давлении рабочего газа (воздух) порядка 10^{-5} мм рт.ст. Экспериментально показано, что с его помощью может создаваться плазма с максимальной плотностью частиц на выходе до 10^{10} см $^{-3}$ и максимальной плотностью тока в плазменном потоке 600 мкА/см 2 .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плазменный источник, генератор сверхвысокочастотных колебаний, внешнее неоднородное магнитное поле, сверхвысокочастотное электромагнитное поле, электронный циклотронный резонанс, плотность плазмы.

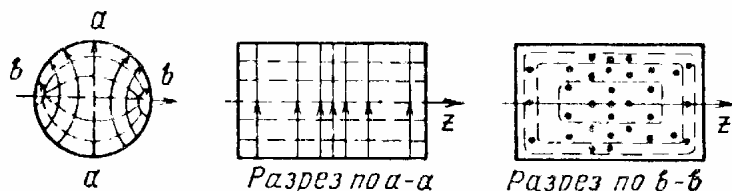
Для получения плазмы в практике физического эксперимента широкое распространение получили устройства, работающие на переменных токах высокой и сверхвысокой (СВЧ) частоты. С целью повышения эффективности вклада энергии СВЧ поля в разряд зачастую используется еще и внешнее магнитное поле, исследования таких систем активно проводятся в настоящее время во многих лабораториях (см., например, [1] и цитируемую в ней литературу). Связано это с тем, что в магнитном поле электроны движутся по спиральной траектории, в результате изменяется характер диффузии, поскольку влияние магнитного поля эквивалентно увеличению размеров камеры в $\sqrt{(v^2 + \omega_{He}^2)}/v$ раз в направлении, перпендикулярном магнитному полю (здесь v - частота столкновений электронов, ω_{He} - циклотронная частота для электронов). Если же частота СВЧ поля и циклотронная частота электронов близки, то в этом случае речь идет о разряде в условиях электронного циклотронного резонанса, при этом существенно уменьшается амплитуда поля и давление, при которых становится возможным пробой газа [2].

В работе описана методика расчета параметров сверхвысокочастотного плазменного источника резонаторного типа применительно к конкретной установке, его конструкция. Целью работы является изучение возможностей СВЧ источника плазмы в неоднородном магнитном поле в условиях электронного циклотронного резонанса. Такой источник плазмы использовался в работе по исследованию динамики движения плазменных потоков в неоднородных магнитных полях [3].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА

В [3] исследования поведения плазменных потоков в неоднородных магнитных полях проводились в вакуумной камере диаметром 9,98 см и длиной 98 см. Поскольку плазменный источник создавался для установки с вакуумной камерой с оговоренными выше размерами, то в расчетах принималось, что диаметр резонатора должен быть меньше 10 см. Резонатор должен был располагаться в области магнитного поля, достаточного для электронного циклотронного резонанса с одной стороны, а с другой, конструкция установки исключала наличие собственного магнитного поля источника. Кроме этого, конструкция резонатора должна допускать подстройку его собственной частоты.

Исходя из этих ограничений, а также с учетом того, что возбуждаемое в резонаторе электромагнитное

Рис. 1. Структура поля типа TE_{111} в резонаторе круглого сечения [1].

СВЧ поле должно иметь радиальную электрическую компоненту E_r (в этом случае энергия СВЧ поля будет идти на увеличение поперечной по отношению к внешнему магнитному полю составляющей скорости электронов), а возбуждающая поле антенна могла быть введена в полость резонатора только через боковую стенку резонатора. В качестве такого поля в результате проведенного анализа известных структур полей было выбрано поле типа

TE_{111} . Заданными параметрами в расчетах являются диаметр резонатора $2a = 9,96$ см, частота внешнего генератора $f_0 = 2386$ МГц.

На рис. 1 представлена структура электромагнитного поля типа TE_{111} в вакуумном резонаторе [4]. Видно, что максимум радиальной электрической компоненты E_r поля располагается на половине длины резонатора. Устройство экспериментальной установки было таково, что с целью удовлетворения оговоренным выше условиям и размещения резонатора так, чтобы область циклотронного резонанса попадала в магнитное поле с необходимой напряженностью, привело к необходимости выбора типа поля TE_{112} , т.е. поля с двумя полупериодами вдоль продольной оси установки. В этом случае удалось установить электрическую антенну в области максимума поля во втором полупериоде поля, а условие электронного циклотронного резонанса $\omega_0 \approx \omega_{He}$, где $\omega_0 = 2\pi f_0$, $\omega_{He} = \frac{eH}{m_e c}$ - циклотронная частота для электронов, выполнялось в первом полупериоде. Структура поля типа TE_{112} в цилиндрическом резонаторе описывается уравнениями следующего вида:

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{\omega\mu}{k_c^2} \frac{1}{r} A_{112} J_1 \left(\nu_{11} \frac{r}{a} \right) \sin \varphi \sin \frac{2\pi}{l} z, & H_r &= -i \frac{1}{k_c} A_{112} J_1' \left(\nu_{11} \frac{r}{a} \right) \cos \varphi \cos \frac{2\pi}{l} z, \\ E_\varphi &= \frac{\omega\mu}{k_c} A_{112} J_1' \left(\nu_{11} \frac{r}{a} \right) \cos \varphi \sin \frac{2\pi}{l} z, & H_\varphi &= i \frac{1}{k_c^2} \frac{1}{r} \frac{\pi}{l} A_{112} J_1 \left(\nu_{11} \frac{r}{a} \right) \sin \varphi \cos \frac{2\pi}{l} z, \\ E_z &= 0, & H_z &= -i A_{112} J_1' \left(\nu_{11} \frac{r}{a} \right) \cos \varphi \sin \frac{2\pi}{l} z. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ν_{11} - корень уравнения $J_{11}'(\nu_{11}) = 0$, $\nu_{11} = 1,84$. Собственная длина волны колебаний равна

$$\lambda_{TE_{112}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\nu_{11}}{2\pi a}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2}} \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_0\mu_0}} \approx \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1,84}{2\pi \cdot 4,98}\right)^2 + \left(\frac{2}{2l}\right)^2}}, \quad (2)$$

а частота поля

$$\omega_{TE_{112}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{\nu_{11}}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi p}{l}\right)^2} \approx c \sqrt{\left(\frac{1,84}{4,98}\right)^2 + \left(\frac{3,14 \cdot 2}{l}\right)^2}. \quad (3)$$

В условиях резонанса, когда частота внешнего генератора $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1,506 \cdot 10^{10} \text{ } \ddot{A}$ равна частоте поля $\omega_{TE_{112}}$ из (2) находим, что длина резонатора

$$l \approx \frac{\pi p}{\sqrt{\left(\frac{\omega_{TE_{112}}}{c}\right)^2 - \left(\frac{\nu_{11}}{a}\right)^2}} \quad (4)$$

и должна быть равной $l \approx 18,6 \text{ см}$.

КОНСТРУКЦИЯ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Особенностью условий проведения эксперимента является то, что в качестве внешнего магнитного поля для плазменного источника использовалось магнитное поле установки, создаваемое с помощью 20 тонких катушек, включаемых двумя секциями (17 катушек основного поля и 3 – дополнительного в области источника плазмы). Токи в этих двух секциях могли изменяться независимо. В области источника магнитное поле представляло собой поле спадающее с характерным градиентом $40 \div 60 \text{ Э/см}$. Более того, по условиям эксперимента магнитное поле должно изменяться по величине. Продольные профили магнитного поля вычислялись с помощью созданной для этого программы. Результаты расчетов сравнивались с результатами контрольных измерений. Погрешность в определении напряженности поля не превышала $\pm 10\%$ пределах вакуумной камеры [3]. Как видно из формул (3) и (4) расчет параметров резонатора проводился в предположении, что резонатор заполнен воздухом. После пробоя рабочего газа и зажигания разряда диэлектрическая проницаемость среды изменяется. Поэтому для подстройки резонансной длины устройства необходимо было предусмотреть возможность изменения длины резонатора. Подводимая к антенне от внешнего генератора СВЧ мощность могла изменяться от 20 до 150 Вт.

Для измерения параметров плазменных потоков использовались электрические зонды и подвижный секционированный коллектор, состоящий из 20 отдельных сегментов размером $2 \times 2 \text{ мм}$, расположенных симметрично (по 10 сегментов) относительно продольной оси источника. Коллектор мог перемещаться вдоль вакуумной камеры на расстояние до 80 см от источника.

Исходя из этих ограничений, был изготовлен цилиндрический резонатор длиной $l \approx 19$ см и диаметром $2a = 9,86$ см. Электромагнитное поле типа TE_{112} возбуждалось с помощью электрической антенны, введенной через боковую поверхность камеры на расстоянии примерно 4,7 см от одного из торцов резонатора (что соответствует четверти длины волны в резонаторе). Антенна ориентирована вдоль радиуса резонатора, размеры антенны выбирались из соображений ее оптимального согласования. Ближний к антенне торец резонатора был изготовлен подвижным, что позволяло подстраивать резонатор по частоте. Так как структура поля типа TE_{112} такова, что высокочастотные токи текут по боковой и торцевым поверхностям резонатора, для обеспечения надежного контакта подвижный торец был выполнен по принципу короткозамкнутого поршня [5]. Основные измерения проводились при подводимой к антенне СВЧ мощности $20 \div 50$ Вт.

Резонатор размещался в вакуумной камере в области спадающего магнитного поля (см. рис. 2). На рисунке кривая 1 соответствует напряженности внешнего продольного магнитного поля, при которой выполняется

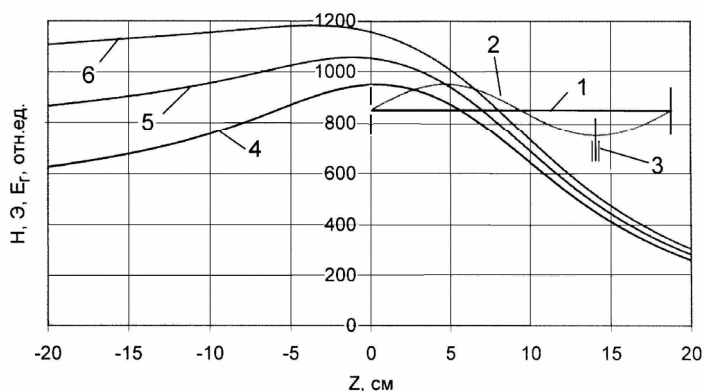


Рис. 2. Продольные профили напряженности магнитного поля (кривые 4, 5, 6), резонансная напряженность внешнего магнитного поля в резонаторе (1) и распределение радиальной компоненты электрического СВЧ поля (2). Цифрой 3 отмечено место расположения электрической антенны.

(кривые 4, 5 и 6), соответствующие следующим токовым режимам – 30 А в основной секции из 17 катушек и 64 А в дополнительной, далее 40 и 64 А, 50 и 64 А. Хорошо видно, что точка резонанса (пересечение кривых 1 и 4, 5, 6, соответственно) перемещается вдоль продольной оси системы так, что условие циклотронного резонанса будет выполняться при амплитудах электрической компоненты поля TE_{112} от максимальной до малой. Это объясняет тот факт, что пробой рабочего газа наблюдался только тогда, когда при фиксированных напряженности магнитного поля и рабочем давлении удавалось достичь напряженности ВЧ поля, превышающего пробойное. Кривая пробоя была измерена только на падающем участке с небольшой точностью, поскольку СВЧ генератор допускал лишь ступенчатую регулировку выходной мощности, а при

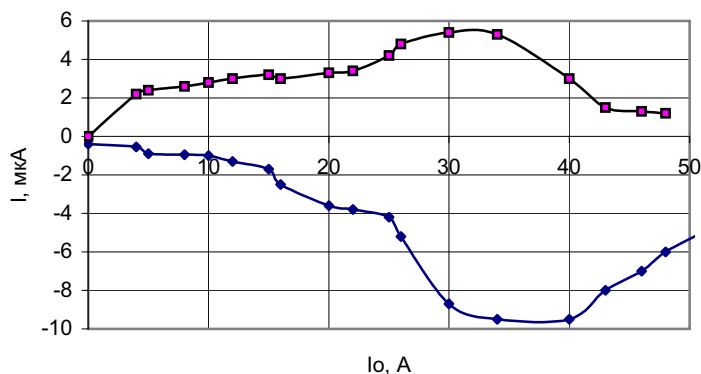


Рис. 3. Зависимости ионного тока насыщения (верхняя кривая) и тока на коллектор (нижняя кривая) от величины тока в основной секции магнитной системы.

увеличении мощности наблюдалось рассогласование антенны. Из этих измерений следует, что пробой рабочего газа происходил при давлениях $(1 \div 3) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. при токах в катушках 10+64 А и подводимой СВЧ мощности в диапазоне $20 \div 75$ Вт.

Измерения зависимости ионного тока насыщения на зонд и тока на коллектор I вблизи выходного окна источника от напряженности магнитного поля показали, что на графиках наблюдаются максимумы при напряженностях магнитного поля, при которых точка резонанса располагалась в максимуме амплитуды СВЧ поля (см. рис. 3). Здесь приведены данные измерений ионного тока насыщения (верхняя кривая, для наглядности значения тока увеличены в 10 раз) и тока на коллектор (нижняя кривая) в зависимости от величины тока в основной секции магнитной системы I_0 . Эти измерения были проведены при давлении рабочего газа $P = 4 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.,

$P_{\text{ген}} = 20$ Вт, $H_{\text{рез}} = 60$ А, зонд располагался в 17 мм от источника на радиусе камеры $r = 0$. При изменении тока в основной секции (в 17 катушках) при фиксированном значении тока в 3 оставшихся катушках магнитной системы точка резонанса перемещается вдоль продольной оси резонатора (как показано на рис. 2). При этом точка резонанса проходит максимум распределения амплитуды радиальной компоненты электрического СВЧ поля, в результате чего на зависимостях $I(H)$ и наблюдаются характерные максимумы. Этот вывод подтверждается анализом распределений напряженности магнитного поля в полости резонатора при соответствующих соотношениях токов в основной и дополнительной секциях магнитной системы. Если точка резонанса выходит за пределы максимума напряженности радиальной компоненты электрического поля в резонаторе, смещается в сторону меньших ее значений, то соответственно уменьшается и плотность создаваемой с помощью СВЧ источника плазмы.

При увеличении вводимой в источник СВЧ мощности наблюдался рост плотности плазмы, который прекращался в случае нарушения условий согласования генератора. В этом случае требовалась дополнительная подстройка резонатора.

По результатам зондовых измерений параметров плазмы вблизи выходного окна СВЧ источника были определены плотность плазмы и температура электронов. При оптимальных параметрах работы источника была получена плазма с максимальной плотностью частиц до 10^{10} см⁻³, температурой электронов $2 \div 5$ эВ. Максимальная плотность тока в плазменном потоке достигала значений 600 мкА/см². По мере распространения потока вдоль продольной оси установки плотность плазмы уменьшалась [3]. Однако при этом сохранялась форма поперечного сечения плазменного потока. Заметим, что конструкция плазменного источника позволяет легко изменять форму сечения потока путем изменения геометрии выходного окна резонатора.

ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты и результаты измерений показали, что созданный СВЧ источник позволяет получать плазму с плотностью частиц до 10^{10} см⁻³, температурой электронов $2 \div 5$ эВ и максимальной плотностью токов в потоке 600 мкА/см². Экспериментальные данные подтверждают правильность методики расчетов параметров резонатора. Управление параметрами плазмы можно осуществлять не только путем изменения амплитуды СВЧ поля, но также и напряженности внешнего магнитного поля в области электронного циклотронного резонанса. С помощью этого источника плазмы можно формировать плазменные потоки с различной геометрией поперечного сечения [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балмашнов А.А., Умнов А.М. и др. Механизм формирования плазмы сверхкритической концентрации в микроволновом источнике CERA-PL // Прикладная физика.-2003.-№1.-С.42-44.
2. Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах.- М.: Мир, 1969. – 206с.
3. Власов В.В. Поведение плавающего потенциала в плазменном потоке в пространственно-неоднородном магнитном поле // Вісник Харківського університету, серія фізична “Ядра, частинки, поля”. - 2003.- №601.- Вип. 2 /22/. – С. 147-149.
4. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны.- М.: Сов. Радио, 1971.- 325с.
5. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ: В 2 Т.- М.: Высшая школа, 1972. - Т.2: Электровакуумные приборы СВЧ. – 374 с.

SUPERHIGH FREQUENCY PLASMA SOURCE

V.V. Vlasov

Department of Physics and Technology, V.N. Karazin Kharkov National University

Kharkov 61108, Kurchatov av., 31.

E-mail: vlasov @ pht.univer. kharkov.ua

The method of the calculation parameter cylindrical resonator is presented in the work, which is used in the SHF source of the plasma in inhomogeneous magnetic field at electronic cyclotron resonance. The results of the study of the conditions of existence SHF discharge at pressure worker gas (the air) of the order 10^{-5} torr is presented in the work too. It is shown, that with its help plasma with density at outlet to 10^{10} sm³, with the maximal density of currents in a plasma stream 600 мкА/см² is created.

KEY WORDS: plasma source, SHF oscillation generator, external spatially-inhomogeneous magnetic field, SHF electromagnetic field, electron cyclotron resonance, plasma density.