

УДК 533.9.07

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОННОМ ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ

А. В. Арсенин, В. Г. Лейман, А. А. Рухадзе, В. П. Тараканов

Разработана численная модель, позволяющая рассчитать поглощение мощности микроволнового излучения в источнике столкновительной плазмы на основе электронно-циклотронного резонанса. Модель основана на 2D электродинамическом коде KARAT. Найдена зависимость поглощаемой в источнике мощности микроволнового излучения от внешнего магнитного поля при заданных параметрах плазмы (плотности и температуре). Показано, что наиболее эффективное поглощение подводимой мощности излучения имеет место при магнитных полях, превышающих резонансное значение, или, что тоже самое, при частотах, меньших резонансной и соответствующих возбуждению в плазме собственной волны.

Источники плазмы на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), характеризующиеся при низких давлениях рабочего газа (≤ 1 Па) высокой плотностью плазмы (до 10^{12} см⁻³), широко используются в современных плазменных технологиях, таких как травление подложек и осаждение тонких пленок, ионное легирование полупроводников и обработка поверхностей [1]. Благодаря этому ЭЦР-источники интенсивно исследуются в последние годы.

В литературе опубликовано большое количество работ по численному моделированию ЭЦР-источников плазмы [2 – 5] (см. также сборник [6] и цитированную там литературу). В подавляющем большинстве работ проводится расчет конкретных технологических плазменных источников и поэтому сопоставление результатов численного

моделирования с теорией, проливающей свет на механизм поглощения излучения, представляется затруднительным. Исключением является работа [7], в которой была развита аналитическая теория радиочастотного ($f_0 = 13.56 \text{ МГц}$) циклотронного источника бесстолкновительной плазмы низкого давления в условиях аномального скин-эффекта.

В настоящей работе, в отличие от [7], предложена модель для расчета эффективности поглощения микроволнового ($f_0 = 2.45 \text{ ГГц}$) излучения столкновительной плазмой и его зависимости от напряженности внешнего магнитного поля. Модель несамосоглашенная в том смысле, что внутренние параметры системы – плотность плазмы и ее температура – считаются заданными, не изменяющимися при поглощении микроволнового излучения. Из внешних параметров системы мы варьировали напряженность магнитного поля при различных давлениях газа и неизменной геометрии источника и подводимой мощности.

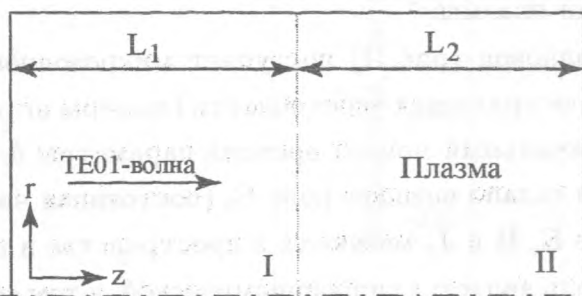


Рис. 1. Геометрия моделируемой системы.

Численное моделирование выполнялось на основе электромагнитного кода KARAT [8]. Геометрия источника представляет собой закороченный волновод, частично заполненный плазмой (рис. 1), является аксиально-симметричной, а поэтому все расчеты выполнялись в цилиндрической r - z геометрии в 2D приближении кода KARAT. Плазма (точнее, плазменный ток) считалась столкновительной и описывалась уравнением

$$\frac{d\mathbf{j}_p}{dt} + \nu_e(T, P_0)\mathbf{j}_p = \frac{\omega_{Le}^2}{4\pi} \mathbf{E} + \frac{e}{mc} [\mathbf{j}_p, \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Здесь $\omega_{Le} = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m}}$ – плазменная частота, ν_e – частота упругих столкновений электронов, n_e – неизменная (заданная) плотность плазмы, e и m – заряд и масса электрона, c – скорость света, \mathbf{j}_p – плазменный ток. Поля \mathbf{E} и \mathbf{B} определялись решением уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_p, \quad (2)$$

которые решались как в области, занятой плазмой (область II на рис. 1), так и вне плазмы (область I). Наконец, частота столкновений электронов определялась из выражения [9]

$$\nu_e = 6 \cdot 10^9 P_0 \sqrt{T} = 2 \cdot 10^{-7} n_0 \sqrt{T}, \quad (3)$$

где n_0 – плотность нейтральных молекул газа в см^{-3} , а T – температура электронов в электронвольтах, P_0 – давление газа в $Torr$. Выражение (3) соответствует предположению о слабой ионизации плазмы.

В момент $t = 0$ в волновод (рис. 1) поступает микроволновое излучение в виде ТЕ01-моды, которое распространяется через область I камеры источника и поглощается плазмой (область II). В начальный момент времени параметры плазмы n и T – заданы и неизменны, также как и задано внешнее поле B_0 (постоянная часть \mathbf{B}), направленное вдоль оси z ; величины же \mathbf{E} , \mathbf{B} и \mathbf{j}_p меняются в пространстве и во времени.

Рассматриваемая модель является гидродинамической, в том смысле, что полностью пренебрегает тепловым движением электронов плазмы. Это накладывает определенные ограничения на выбираемые параметры системы. В частности, в гидродинамическом приближении пренебрегается черенковским (бесстолкновительным) поглощением поля излучения и учитывается только магнитотормозное (столкновительное) поглощение, что в случае циклотронного резонанса справедливо при условии [9]

$$\nu_e \gg kV_{Te} \approx \sqrt{\frac{\Omega_e}{2\nu_e} \frac{V_{Te}}{c}} \omega_{Le}, \quad (4)$$

где $\Omega_e = \frac{eB_0}{mc} \gg \nu_e$ – ларморовская частота вращения электронов во внешнем поле B_0 , $V_{Te} \approx 4 \cdot 10^7 \sqrt{T}$ – их тепловая скорость. Из (4) следует, что для справедливости нашей модели необходимо требовать $\nu_e > 4.5 \cdot 10^3 (B_0 n T)^{1/3} \text{ с}^{-1}$, где B_0 в Γc , а n – в см^{-3} . С учетом (3) заключаем, что давление газа P_0 , а поэтому и ν_e ограничено снизу.

Результаты численного моделирования. Прежде чем привести результаты численного моделирования, укажем основные параметры источника. Как уже говорилось выше, в источник поступает ТЕ01-мода микроволнового излучения с частотой $\omega_0 = 2\pi f_0 \approx$

$1.5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ ($f_0 = 2.45 \text{ ГГц}$) и мощностью 2 кВт. Излучение распространяется в вакуумной области камеры (область I) и покрывает поверхность плазмы, находящейся в области II. Радиус камеры $R = 15 \text{ см}$, а длины областей I и II соответственно $L_1 = L_2 = 15 \text{ см}$. Плотность плазмы, напряженность магнитного поля B_0 и давление газа P_0 (т.е. частота столкновений ν_e) считались заданными, но в расчетах менялись в довольно широких пределах.

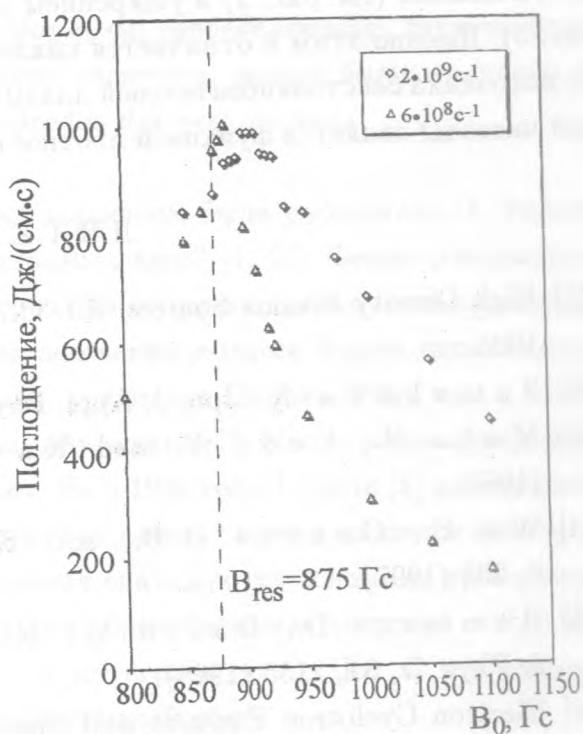
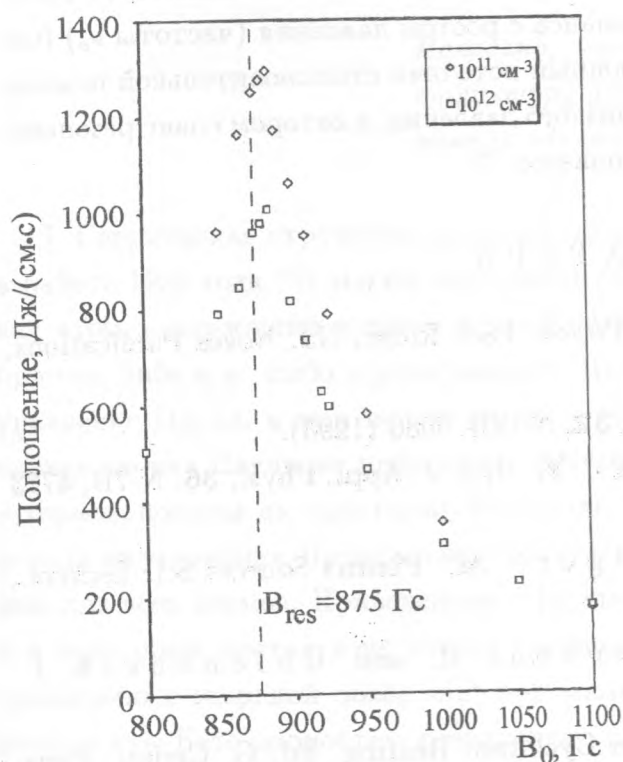


Рис. 2. Зависимость поглощения мощности ТЕ01-моды микроволнового излучения плазмой от величины магнитной индукции при различной концентрации плазмы $n_e = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и 10^{12} см^{-3} . Частота столкновений $\nu_e = 6 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Резонансное магнитное поле равно 875 Гс.

Рис. 3. Зависимость поглощения мощности ТЕ01-моды микроволнового излучения плазмой от величины магнитной индукции для различных частот столкновений: $\nu_e = 6 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ и $2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$. Концентрация плазмы $n_e = 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Результаты вычислений приведены на рис. 2, 3 в виде зависимостей поглощаемой мощности от магнитного поля при различных значениях частоты столкновений (давления газа) и при различных значениях плотности плазмы. На графиках явно виден

резонансный характер поглощаемой мощности, причем резонансная частота соответствует возбуждению собственной циклотронной волны в плазме, и она несколько ниже резонансной ларморовской частоты (которая в нашем случае соответствует полю $B_0 = 875 \text{ Гс}$) [9]

$$\omega = \Omega_e - \nu_e. \quad (5)$$

Эта формула подтверждается также независимостью резонансной частоты от плотности плазмы (см. рис. 2) и уширением резонанса с ростом давления (частоты ν_e) (см. рис. 3). Именно этим и отличается циклотронный источник столкновительной плазмы от источника бесстолкновительной плазмы низкого давления, в котором сдвиг резонансной частоты является функцией плотности плазмы [7].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] High Density Plasma Sources. Ed. O.A. Popov, Park Ridge, NJ, Noyes Publications, 1995.
- [2] Samukawa S. Jpn. J. Appl. Phys., **32**, N 12B, 6080 (1993).
- [3] Muta H., Ueda Y. and Kawai Y. Jpn. J. Appl. Phys., **36**, N 7B, 4773 (1997).
- [4] Wu H., Graves D. B., and Kilgore M. Plasma Sources Sci. Technol., **6**, 231 (1997).
- [5] Hemmers D., David M., Kempkens H. and Uhlenbusch J. J. Phys. D, **31**, 2155 (1998).
- [6] Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Heating. Ed. G. Grrizzi, Paris, World Scientific, 2002.
- [7] Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Рим. Х., Рухадзе А. А. ЖТФ, **74**, вып. 6, 25 (2004).
- [8] Тагакапов V. P. User's Manual for Code KARAT (Springfield, VA: Berkley Research, 1992).
- [9] Александров А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы, М., Высшая школа, 1988.

Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 3 декабря 2004 г.