

УДК 533.9.07

## К ОБОСНОВАНИЮ НЕСАМОСОГЛАСОВАННОЙ ТЕОРИИ РАДИОЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ

К. В. Вавилин<sup>1</sup>, Е. А. Кралькина<sup>1</sup>, А. А. Рухадзе

*Численная самосогласованная модель индуктивных радиочастотных источников плазмы, успешно примененная для описания источников геликонного типа, применяется для обоснования простой аналитической самосогласованной теории. Показано, что последняя в достаточно широком диапазоне изменения параметров источника дает не только качественно, но и количественно правильные результаты.*

В работах [1 – 3] была развита простая самосогласованная аналитическая теория индуктивных радиочастотных источников плазмы, соответственно, в отсутствие внешнего магнитного поля, в условиях циклотронного резонанса и геликонного типа, иными словами, теория источников плазмы с заданными параметрами. Вместе с тем, в работе [4] была построена самосогласованная численная модель радиочастотных индуктивных источников плазмы, которая успешно была применена к источникам геликонного типа. При этом оказалось, что в случае геликонного источника довольно естественным подбором параметров плазмы самосогласованная теория [3] качественно хорошо согласуется с результатами численного счета по самосогласованной модели. В первую очередь это относится к зависимостям эквивалентного сопротивления от магнитного поля и от плотности плазмы.

В связи со сказанным нами были проведены численные расчеты радиочастотного циклотронного источника в самосогласованной модели. Полный анализ результатов этих расчетов будет опубликован в отдельной статье. В настоящей же заметке мы ограничимся обсуждением лишь результатов, касающихся эквивалентного сопротивления циклотронного источника и их сравнения с результатами самосогласованной аналитической теории [2], или, другими словами, обоснованием последней.

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

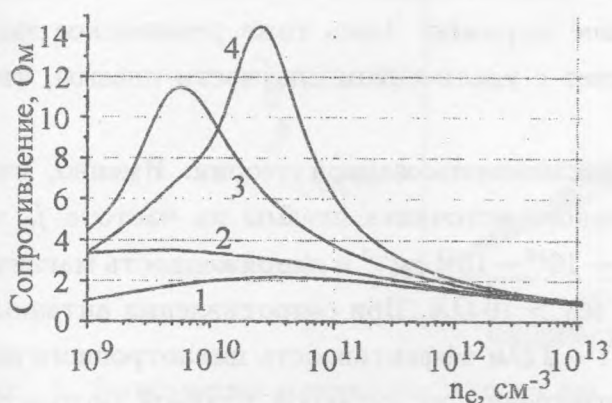


Рис. 1. Зависимость эквивалентного сопротивления от плотности плазмы для напряженностей магнитного поля: 1 – 4 Гс, 2 – 5 Гс, 3 – 7 Гс, 4 – 9 Гс и давления нейтрального газа 1 мТорр по несамосогласованной теории.

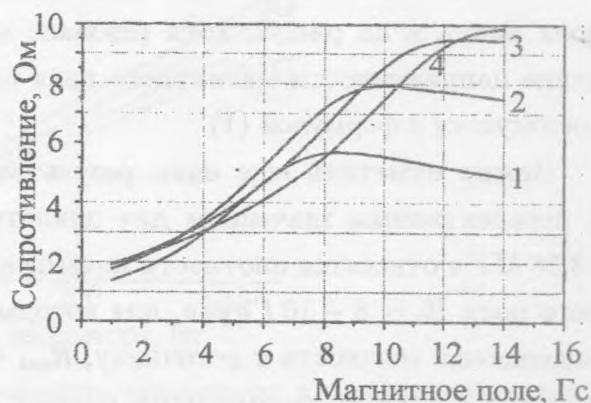


Рис. 2. Зависимость эквивалентного сопротивления от напряженности магнитного поля для концентраций электронов: 1 –  $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , 2 –  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , 3 –  $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , 4 –  $1.1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , и давления нейтрального газа 1 мТорр по несамосогласованной теории.

Основные результаты несамосогласованной теории радиочастотного ( $f_0 = 13.56 \text{ МГц}$ ) циклотронного источника плазмы приведены на рис. 1 и 2 в виде зависимостей эквивалентного сопротивления источника от плотности плазмы при различных значениях внешнего магнитного поля и от магнитного поля при различных плотностях плазмы, соответственно. Расчеты проведены по методике, изложенной в работе [2], и относятся к плоскому дискообразному источнику с радиусом  $R = 10 \text{ см}$  и при давлении нейтрального газа  $P_0 = 1 \text{ мТорр}$ . Длина источника при  $L > 5 \text{ см}$  не существенна. На обоих рисунках виден резонансный характер поведения эквивалентного сопротивления источника. На рис. 1 резонансное значение плотности растет с увеличением напряженности внешнего магнитного поля, что согласуется с поведением резонансного значения частоты циклотронной волны в плазме:

$$\omega_{res} = \Omega_e - \left( \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_p^2 \Omega_e V_{Te}^2}{c^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

Здесь  $\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m}}$  – плазменная частота электронов с плотностью  $n_e$ ,  $\Omega_e = \frac{eB_0}{mc}$  – циклотронная частота вращения электронов в магнитном поле  $B_0$ , а  $V_{Te} = \sqrt{\frac{T_e}{m}}$  – их тепловая скорость при температуре  $T_e$ .

Резонансная зависимость эквивалентного сопротивления от внешнего магнитного поля видна и на рис. 2, хотя резонанс менее выражен. Здесь тоже резонансное значение напряженности магнитного поля растет с увеличением плотности плазмы, что согласуется с формулой (1).

Важно отметить еще один результат несамосогласованной теории. Именно, что к перспективным значениям для циклотронного источника плазмы на частоте  $f_0 = 13.56$  МГц относятся плотности плазмы  $n_e \sim 10^{10} - 10^{11}$  см<sup>-3</sup> и напряженность магнитного поля  $B_0 \sim 8 - 10$  Гаусс, для которых  $R_{pl} > 10$  Ом. При сопротивлении антенны, подводящей мощность к источнику,  $R_{ant} \sim 1 - 2$  Ом эффективность циклотронного источника с такими параметрами плазмы (отношение поглощаемой плазмой мощности радиочастотного поля к полной расходуемой мощности) может превысить 80%. Этот вывод и был сделан в работе [2].

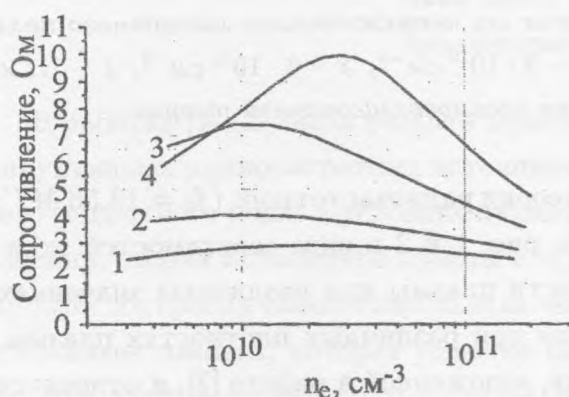


Рис. 3. Зависимость эквивалентного сопротивления от плотности плазмы для напряженностей магнитного поля: 1 – 4 Гс, 2 – 5 Гс, 3 – 7 Гс, 4 – 9 Гс и давления нейтрального газа 1 мТорр по самосогласованной модели.

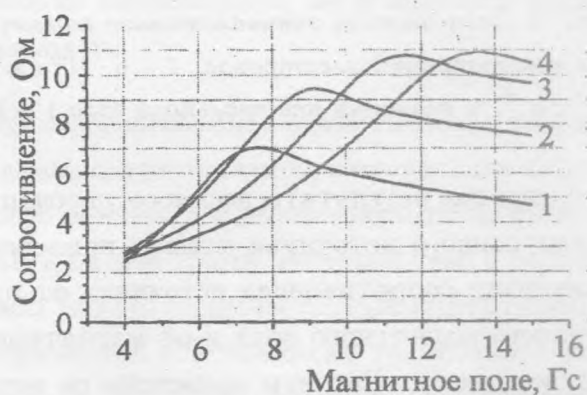


Рис. 4. Зависимость эквивалентного сопротивления от напряженности магнитного поля для мощностей генератора: 1 – 15 Вт, 2 – 50 Вт, 3 – 150 Вт, 4 – 300 Вт и давления нейтрального газа 1 мТорр по самосогласованной модели.

Приведем теперь результаты численного расчета по самосогласованной модели. Как уже отмечалось выше, такая модель была построена в работе [4] и успешно применена к описанию радиочастотного источника плазмы геликонного типа. Здесь мы приведем полученные по этой модели зависимости, соответствующие приведенным на рис. 1 и 2. Они представлены на рис. 3 и 4. Видно качественно хорошее сходство этих рисунков: резонансы по плотности более размыты, а по магнитному полю более выражены.

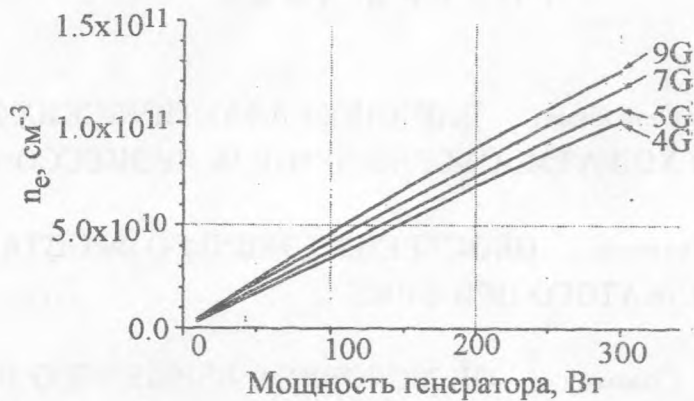


Рис. 5. Зависимость плотности плазмы от мощности генератора при различных напряженностях магнитного поля и давления нейтрального газа 1 мТорр.

Положения максимумов эквивалентного сопротивления практически совпадают. Эти рисунки свидетельствуют о том, что простая аналитическая несамосогласованная теория радиочастотного циклотронного источника плазмы не только качественно, но даже и количественно хорошо согласуется с численной самосогласованной моделью источника.

В заключение несколько слов в обоснование выбранных на рис. 2 концентраций электронов. Оказалось, что связь мощности генератора и концентрации электронов слабо зависит от магнитного поля – рис. 5. Поэтому для рис. 2 выбирались концентрации, характерные для той мощности, которая рассматривалась на рис. 4. В источнике геликонного типа эта зависимость значительно сложнее и такого согласия в широком диапазоне параметров плазмы достичь не удастся [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри Х. М., Рухадзе А. А. ЖТФ, **74**, N 5, 44 (2004).
- [2] Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри Х. М., Рухадзе А. А. ЖТФ, **74**, N 6, 25 (2004).
- [3] Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри Х. М., Рухадзе А. А. ЖТФ, **74**, N 6, 29 (2004).
- [4] Александров А.Ф. и др. Физика плазмы, **30**, N 5, 434 (2004).