

## Диагностика нестационарных возмущений плотности плазмы

© Д.В. Янин, А.В. Костров, А.И. Смирнов, А.В. Стриковский

Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: dyanin@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 8 декабря 2006 г. В окончательной редакции 2 апреля 2007 г.)

Изучены возможности резонансного СВЧ-зонда на отрезке двухпроводной линии применительно к диагностике нестационарных процессов в магнитоактивной плазме, сопровождающихся малыми возмущениями плазменной концентрации.

PACS: 52.70.-m

### Введение

При исследовании электродинамических характеристик веществ в СВЧ-диапазоне широко используются распределенные резонансные системы [1]. При внесении образца в область, занятую полем, резонансная кривая датчика изменяется (например, смещается ее максимум и увеличивается ширина). По этим изменениям можно судить об электрических и магнитных свойствах изучаемого объекта. Простейшим распределенным резонатором в СВЧ-диапазоне является отрезок двухпроводной линии. Сделанные на его основе датчики применяются не только при исследовании опытных образцов, но и для диагностики различных природных и искусственных сред [2].

Для локальных измерений концентрации плазмы, например, успешно используется так называемый резонансный СВЧ-зонд, представляющий собой отрезок двухпроводной линии, закороченный с одной стороны и разомкнутый с другой [3]. В сравнении с традиционно применяемыми в плазменных экспериментах ленгмюровскими зондами результаты измерений с помощью СВЧ-зонда в линейном режиме определяются только плотностью плазмы и не зависят от электронной температуры. В [4] исследовались нелинейные эффекты, связанные со стрикционным воздействием СВЧ-полей на плазму вблизи проводов резонатора, в частности, было показано, что зонд можно применять и для измерений электронной температуры.

В настоящей работе изучаются возможности резонансного СВЧ-зонда на отрезке двухпроводной линии применительно к диагностике нестационарных процессов в магнитоактивной плазме, связанных с малыми возмущениями плазменной концентрации.

### 1. Методика измерений нестационарных возмущений плотности плазмы

Плазменный СВЧ-зонд, используемый для диагностики низкотемпературной плазмы, схематически изображен на рис. 1. Зонд представляет собой четвертьвол-

новый резонатор на отрезке двухпроводной линии, закороченной с одной стороны и разомкнутой с другой, выполненный из медной проволоки длиной 8 и диаметром 0.2 мм, расстояние между проводами — 2 мм. Возбуждение резонатора и прием его отклика осуществляется со стороны закороченного конца при помощи петель магнитной связи диаметром 2 мм. Собственная частота резонатора —  $\omega_0/2\pi = 8$  GHz, добротность —  $Q_0 \approx 100$ .

Резонансная частота  $\omega_{\text{res}}$  СВЧ-зонда, помещенного в плазменный объем, в случае слабомагнитной плазмы ( $\omega_{\text{res}}^2 \gg \omega_{\text{pe}}^2 \gg \omega_{\text{He}}^2$ ,  $\omega_{\text{pe}}$  — плазменная частота,  $\omega_{\text{He}}$  — электронная гирочастота) определяется концентрацией  $N$  плазмы, окружающей резонатор [2]:

$$\omega_{\text{res}}^2 = \omega_0^2 + \omega_{\text{pe}}^2, \quad (1)$$

$$\omega_{\text{pe}} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N}{m}}.$$

Малое возмущение электронной плотности плазмы  $\delta n(t)$ , ( $\delta n \ll N$ ) вызывает изменение резонансной частоты. Для сигнала с фиксированной частотой  $\omega_m$  вариация резонансной частоты  $\delta\omega_{\text{res}}(t)$  приводит к появлению амплитудной модуляции сигнала  $\delta U_{\text{res}}(t)$ , причем

$$\delta U_{\text{res}}(t) \approx \frac{dU_{\text{res}}(\omega_m)}{d\omega} \delta\omega_{\text{res}}(t),$$

где  $U_{\text{res}}(\omega)$  — резонансная характеристика СВЧ-зонда в плазме с плотностью  $N$ .

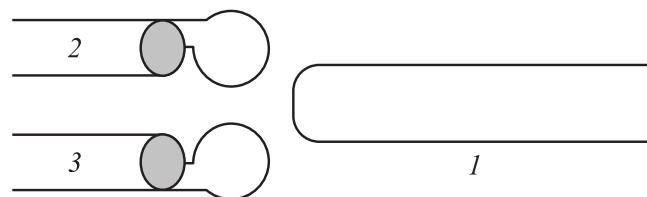


Рис. 1. Схема СВЧ-зонда: 1 — резонатор, 2 и 3 — возбуждающая и приемная линии.

Если выбрать рабочую точку на резонансной кривой в области ее наибольшей крутизны, то

$$\delta U_{\text{res}}(t) \approx Q \frac{\max(U_{\text{res}})}{\omega_{\text{res}}} \delta \omega_{\text{res}}(t), \quad (2)$$

$Q = \frac{\omega_{\text{res}}}{\Delta \omega}$  — добротность системы,  $\Delta \omega$  — полуширина резонансной кривой.

Учитывая (1) и (2), нетрудно получить связь  $\delta U_{\text{res}}(t)$  с величиной возмущения плотности  $\delta n(t)$  [3]:

$$\frac{\delta U_{\text{res}}(t)}{\max(U_{\text{res}})} \approx \frac{Q}{2(1 + \frac{\omega_0^2}{\omega_{\text{pe}}^2})} \frac{\delta n(t)}{N}. \quad (3)$$

Ограничения данного способа диагностики  $\delta n$  связаны с характерным временем возмущения  $T$ , величина которого должна быть больше времени затухания колебаний в резонаторе  $Q/\omega_{\text{res}}$

$$T > Q/\omega_{\text{res}} \sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ s.}$$

## 2. Описание экспериментальной установки

Исследования возможностей резонансного СВЧ-зонда на отрезке двухпроводной линии для диагностики нестационарных возмущений плотности плазмы проводились на экспериментальной установке „Крот“ [4]. Стенд представляет собой вакуумную камеру диаметром 3 и длиной 10 м (рис. 2). Плазма создавалась с помощью индукционного высокочастотного пробоя ( $f = 5 \text{ MHz}$ ,  $\tau_{\text{pulse}} = 1 \text{ ms}$ ,  $B_0 = 80 \text{ G}$ ) в атмосфере аргона при давлении  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$ . Эксперименты проводились в режиме распадающейся плазмы, т.е. после выключения высокочастотного источника. Характерное время распада плазмы порядка 10 ms.

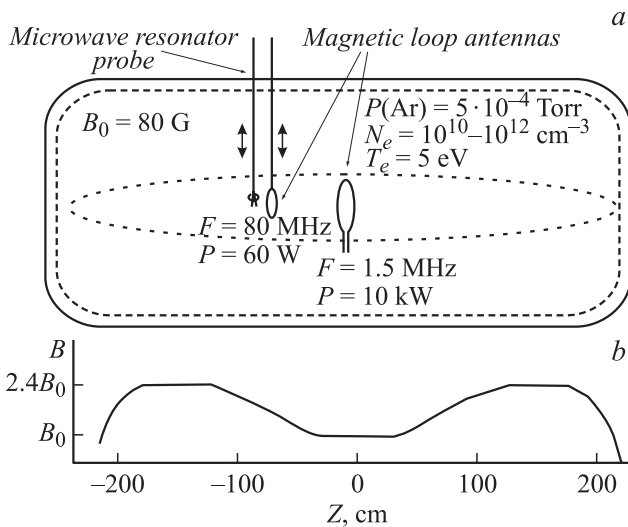


Рис. 2. Схема экспериментальной установки „Крот“ (а); распределение магнитного поля (b).

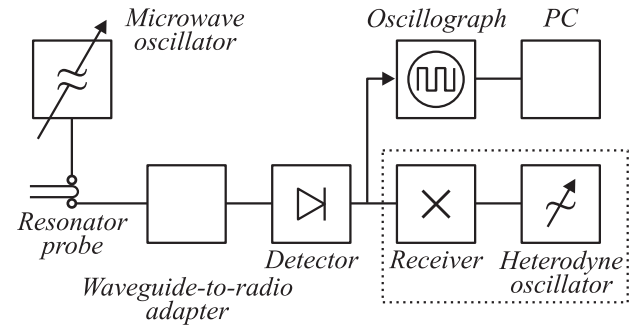


Рис. 3. Блок-схема системы для измерения малых возмущений плотности плазмы.

В экспериментах использовались две экранированные рамочные антенны: одновитковая, радиусом 1 см, толщина провода 3 мм, и двухвитковая, радиусом 10 см, сделанная из провода диаметром 2.5 см. Плоскости рамок ориентированы вдоль линий внешнего магнитного поля. К антеннам прикладывался импульс высокочастотного тока длительностью  $\tau_{\text{pulse}} = 1 \text{ ms}$ . Флуктуации электронной плотности фиксировались при помощи подвижного в радиальном направлении СВЧ-зонда.

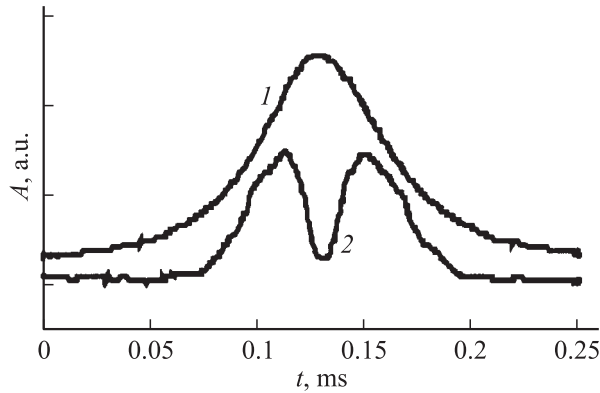
Блок-схема системы измерения представлена на рис. 3. Генератор при помощи коаксиального кабеля подключался к возбуждающей петле связи СВЧ-зонда. Сигнал с приемной петли связи передавался на коаксиально-волноводный переход (КВП), после которого детектировался. Сигнал с детектора, соответствующий резонансной кривой зонда, подавался на вход гетеродинного приемника (полоса  $\Delta f = 100 \text{ kHz}$ , чувствительность  $\sim 1 \mu\text{V}$ ), регистрирующего величину амплитудной модуляции резонансной кривой СВЧ-зонда, вызванную малыми возмущениями плотности плазмы. Видеосигнал с приемника оцифровывался осциллографом и записывался в компьютер.

## 3. Обсуждение экспериментальных результатов

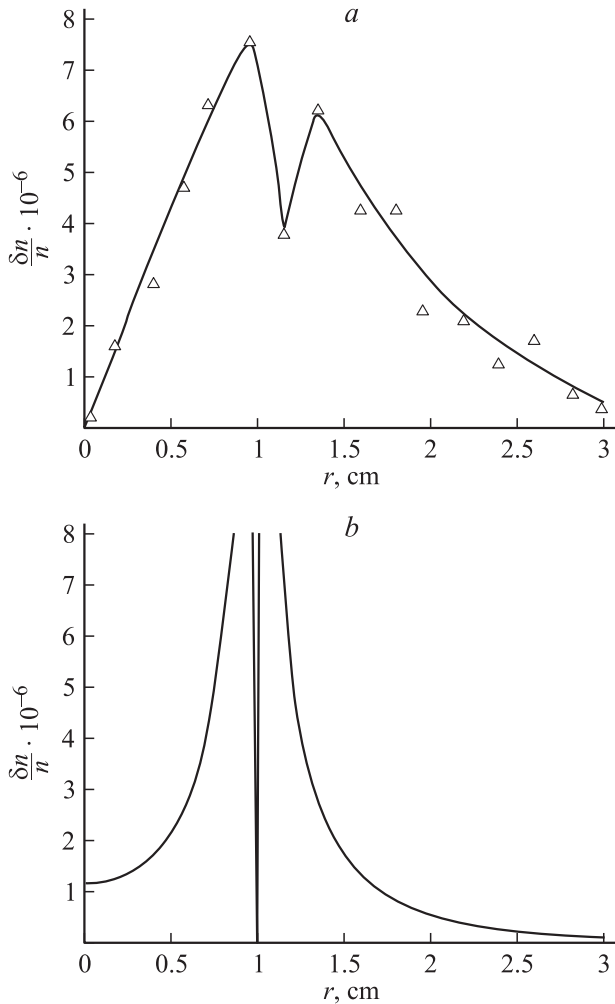
Измерения проводились в плазме с плотностью  $N = 3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  и температурой  $T_e = 1.5 \text{ eV}$  при величине магнитного поля  $B_0 = 80 \text{ G}$  на разных расстояниях от плоскости излучающей рамочной антенны радиусом  $R = 1 \text{ cm}$ . Частота сигнала, подводимого к антенне, 80 MHz, мощность генератора 60 W.

Характерные осциллограммы сигналов после детектора и на выходе приемника, соответствующие резонансной кривой СВЧ-зонда в распадающейся плазме и ее изменению при появлении в плазме возмущений плотности с частотой 80 MHz, представлены на рис. 4.

На рис. 5, а изображено радиальное распределение амплитуды колебаний электронной плотности  $\delta n$  на расстоянии 1 см от плоскости рамочной антенны. Как видно из этого рисунка,  $\delta n$  имеет минимум при  $r = 0$ , увеличивается на интервале от 0 до  $R$  и затем спадает с



**Рис. 4.** Характерные осциллограммы: 1 — сигнал после детектора, соответствующий резонансной кривой СВЧ-зонда в распадающейся плазме; 2 — сигнал на выходе приемника, соответствующий изменению резонансной кривой при появлении в плазме возмущений плотности с частотой 80 МГц.



**Рис. 5.** Радиальное распределение  $\delta n$  на расстоянии 1 см от плоскости рамочной антенны радиусом 1 см: *a* — эксперимент; *b* — теория.

характерными масштабам  $\sim R$ . Величина относительно возмущения плотности  $\delta n/N \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ .

Сравним экспериментальные результаты с теоретическим расчетом нестационарных возмущений электронной плотности  $\delta n(\mathbf{r}, t)$ , создаваемых кольцевым электрическим током в нижнегибридном диапазоне частот, что соответствует условию эксперимента.

Итак, пусть плотность тока задается соотношением

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = \varphi^0 I_0 \delta(r - a) \delta(z) e^{i\omega t} \quad (4)$$

( $a$  — радиус кольца;  $r, \varphi, z$  — цилиндрические координаты), а частота  $\omega$  лежит в интервале

$$\sqrt{\omega_{\text{He}} \omega_{\text{Hi}}} < \omega < \omega_{\text{He}} \ll \omega_{\text{pe}}$$

( $\omega_{\text{He}}$  и  $\omega_{\text{Hi}}$  — соответственно циклотронные частоты электрона и иона,  $\omega_{\text{pe}}$  — плазменная электронная частота).

Нестационарная компонента плотности  $\delta n(\mathbf{r}, t)$ , возбуждаемая током (4), связана с электрическим полем в области витка уравнением Максвелла

$$\text{div } \mathbf{E} = 4\pi e \delta n(\mathbf{r}, t).$$

Таким образом, задача о пространственном распределении флуктуаций плотности плазмы сводится к определению дивергенции создаваемого источником электрического поля. Для численного расчета  $\delta n(\mathbf{r}, t)$  можно воспользоваться результатом работы [5], где поля рамочной антенны записываются в виде спектрального разложения по собственным волнам магнитоактивной плазмы. В соответствии с [6] в цилиндрической геометрии компоненты электрического поля  $\Phi_m = (E_r, E_z)$  представимы в следующем виде:

$$\Phi_m = \sum_{l=e,o} \chi_l \int_0^\infty F_{lm}(k_\perp) J_n(k_\perp r) \exp(-ik_{l\parallel}|z|) dk_\perp,$$

$$F_{lm}(k_\perp) = I_0 \frac{2\pi}{c} k_0^2 a \frac{g}{\varepsilon_\parallel} \times \frac{k_\perp f_{lm}(k_\perp) J_1(k_\perp a)}{[k_\perp^4 (1 - \varepsilon_\perp / \varepsilon_\parallel)^2 - 4k_\perp^2 k_0^2 g^2 / \varepsilon_\parallel + 4k_0^4 g^2]^{1/2}},$$

$$f_{l_1} = -i \frac{k_\perp^2 - k_0^2 \varepsilon_\parallel}{k_{l\parallel}^2}, \quad f_{l_2} = \frac{k_\perp}{k_0} \text{sign}(z),$$

$$k_{\parallel e,o} = \left[ k_0^2 \varepsilon_\perp - \frac{k_\perp^2}{2} \left( 1 + \frac{\varepsilon_\perp}{\varepsilon_\parallel} \right) + \chi_{e,o} \sqrt{\frac{k_\perp^4}{4} \left( 1 - \frac{\varepsilon_\perp}{\varepsilon_\parallel} \right)^2 - k_\perp^2 k_0^2 \frac{g^2}{\varepsilon_\parallel} + k_0^4 g^2} \right]^{1/2},$$

$$n = 0 (m = 2), \quad n = 1 (m = 1), \quad \chi_o = -1, \quad \chi_e = 1.$$

Индексы „*o*“ и „*e*“ отвечают волновым векторам соответственно обыкновенной (экспоненциально затухающей) и необыкновенной (распространяющейся) волн;

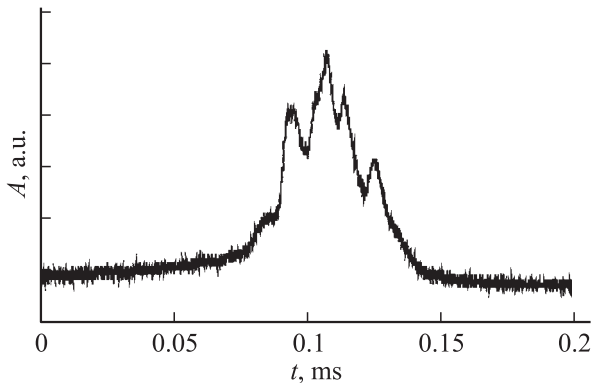
$\varepsilon_{\perp}$ ,  $g$ ,  $\varepsilon_{\parallel}$  — компоненты тензора комплексной диэлектрической проницаемости плазмы:

$$\varepsilon_{\perp} = 1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{He}^2 - \omega^2}, \quad g = -\frac{\omega_{pe}^2 \omega_{He}}{\omega(\omega_{He}^2 - \omega^2)},$$

$$\varepsilon_{\parallel} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}.$$

Параметры плазмы и характеристики излучающей рамочной антенны в численном моделировании соответствовали условиям эксперимента. Расчет показывает, что возмущения электронной плотности плазмы, вызванные ближним ВЧ-полем антенны, локализованы вблизи провода рамки. На рис. 5, *b* приведена теоретическая зависимость модуля относительного возмущения электронной плотности на частоте 80 МГц от радиуса при  $a = 1$  см на расстоянии 1 см от плоскости кольца. Эта зависимость качественно совпадает с экспериментальной (рис. 5, *a*). Отсутствие резкого провала вблизи провода у экспериментальной кривой и более плавное спадание при удалении, по сравнению с теоретическими результатами, связано с конечной длиной СВЧ-резонатора (зонд фиксирует лишь интегральное значение плотности на длине четвертьволнового отрезка) и с конечной толщиной провода рамки, не учитываемой в теоретических идеализациях. В работе [7] при исследовании ближнего магнитного поля рамочной антенны наблюдалось подобное расхождение экспериментальных результатов и численных расчетов, выполненных для витка из бесконечно тонкого провода.

В качестве еще одного примера демонстрации возможностей резонансного СВЧ-зонда для диагностики нестационарных возмущений плазменной концентрации рассматривается случай взаимодействия интенсивного высокочастотного излучения с магнитоактивной плазмой на частотах, близких к негидридной ( $\omega \sim \omega_{lh}$ ). Антенна радиусом 10 см подключалась к генератору с частотой 1.5 МГц и мощностью 10 кВт. Внешнее магнитное поле составляло 80 Г. Во время работы накачки в камере оказывалось реализованным условие  $\omega_{pe} \gg \omega_{He}$ ,



**Рис. 6.** Осциллограмма резонансной кривой в области нижнегибридного резонанса. Частота возмущения плотности  $f \approx 56$  кГц,  $\delta n/N \sim 10\%$ .

при этом частота нижнегибридного резонанса не зависела от плотности плазмы и определялась только величиной магнитного поля:  $\omega_{lh} = \sqrt{\omega_{Hi}\omega_{He}}$ .

Из-за неоднородности внешнего магнитного поля (рис. 2, *b*) на расстоянии 100 см от плоскости рамки частота нижнегибридного резонанса  $\omega_{lh}$  совпадает с частотой подводимого к антенне сигнала, т. е. реализуется условие  $\omega_{ramp} = \omega_{lh}$ . В этой области из-за интенсивного взаимодействия волны накачки с плазмой при помощи СВЧ-зонда зафиксирована низкочастотная модуляция плотности плазмы.

На рис. 6 показана характерная осциллограмма резонансной кривой, соответствующая возмущениям электронной плотности порядка 10% на частота  $f \approx 56$  кГц.

## Заключение

Таким образом, можно утверждать, что резонансный СВЧ-зонд позволяет фиксировать гармонические возмущения плотности  $\delta n/n$  порядка  $10^{-5}$ – $10^{-6}$ . Полученная с его помощью информация о пространственной структуре  $\delta n$  хорошо согласуется с теоретическими расчетами. Пространственное разрешение измерительной системы ограничивается лишь размерами резонатора, фиксирующего интегральное значение плотности плазмы на длине четвертьволнового отрезка. Следует особо отметить, что пользоваться предлагаемой методикой можно только для возмущений с характерной длительностью, превышающей время затухания колебаний в резонаторе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-02-01023-а), Федерального агентства по науке и инновациям (ФЦНТП „Исследования и разработка по приоритетным направлениям развития науки и техники“ и грант НШ-1087.2006.2).

## Список литературы

- [1] Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 404 с.
- [2] Костров А.В., Костров В.А., Смирнов А.И., Янин Д.В., Стриковский А.В., Пантелева Г.А. Диагностика неоднородных и нестационарных сред с помощью резонансного СВЧ-зонда на отрезке двухпроводной линии. Препринт ИПФ РАН № 707. Н. Новгород, 2006. 24 с.
- [3] Stenzel R.L. // Rev. Sci. Instr. 1976. Vol. 47. N 5. P. 603–607.
- [4] Кондратьев И.Г., Костров А.В., Смирнов А.И., Стриковский А.В., Шапурин А.В. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 11. С. 977–983.
- [5] Костров А.В., Стриковский А.В., Чугунов Ю.В., Шапурин А.В. и др. Экспериментальный стенд „Крот“ для лабораторного моделирования космических явлений. Препринт ИПФ РАН № 510. Н. Новгород, 1999. 30 с.
- [6] Заборонкова Т.М., Костров А.В., Кудрин А.В., Смирнов А.И., Шайкин А.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 2. С. 192–202.
- [7] Коробков С.В., Гуцин М.Е., Костров А.В., Стриковский А.В., Краффт К. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 2. С. 120–127.