

04;09;12

## **Эксперименты по интерферометрическому усиленному рассеянию в плазме с неоднородным магнитным полем**

© *Е.З. Гусаков, Н.М. Каганская, М. Кремер,  
П. Морсинчик, В.Л. Селенин*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Рурский университет, Бохум, Германия

*Поступило в Редакцию 15 мая 1998 г.*

Представлены результаты первых экспериментов по интерферометрическому усиленному рассеянию (ИУР) в плазме, помещенной в неоднородное магнитное поле. В геометрии эксперимента, моделирующей конфигурацию токамака, получено удовлетворительное соответствие измерений нижнегибридных флуктуаций плотности плазмы методом ИУР и методом ВЧ-зондов.

Увеличение эффективности рассеяния электромагнитной волны в области ее гибридного резонанса (ГР) на протяжении последнего десятилетия широко используется для исследования флуктуаций и волн в замагниченной плазме [1]. Метод усиленного рассеяния (УР), основанный на этом эффекте, имеет высокую чувствительность к мелкомасштабным флуктуациям и хорошее пространственное разрешение. Существенным достоинством метода является также его интегральность по волновым числам, что уменьшает требования на объем необходимой априорной информации о свойствах исследуемых волновых явлений и значительно упрощает постановку экспериментов. Вместе с тем интегральность метода, естественно, снижает его разрешение по волновым векторам исследуемых флуктуаций.

Недавно были предложены две модификации диагностики УР, сочетающие основные достоинства метода с возможностью осуществить разрешение по волновым векторам исследуемых колебаний. Первая, времяпролетная, модификация метода УР основана на линейной зависимости времени задержки рассеянного из ГР излучения от волнового вектора рассеивающих колебаний [2]. Вторая, корреляционная или

интерферометрическая, модификация (ИУР) использует зависимость рассеянного сигнала  $A_{ES}$  от фазы флуктуаций в точке ГР [3,4].

Согласно [4], в случае, когда излучающая антенна является одновременно принимающей, рассеянный обратный сигнал выглядит следующим образом:

$$A_{ES}(t, x_r) = \frac{i\omega_i A_i}{16\pi} \int \frac{d\Omega d^3 \mathbf{q} dk_{iy} dk_{iz}}{(2\pi)^6} \frac{\delta n_{\Omega, \mathbf{q}}}{n_e} e^{i\Omega t - iq_x(\omega_i) - iq_z z_i - iq_y y_i} \times f(k_{iy}, k_{iz}) f(q_y - k_{iy}, q_z - k_{iz}) \cdot \Theta \cdot I(\mathbf{q}), \quad (1)$$

где  $|A_{ES}|^2$  и  $|A_i|^2$  — мощности рассеянного и зондирующего излучения;  $\delta n_{\Omega, q}$  — Фурье-гармоника флуктуации электронной плотности;  $q$  — проекция волнового вектора флуктуации на направление неоднородности плазмы;  $q_z$  и  $q_y$  — проекции волнового вектора флуктуации на соответственно направление магнитного поля и перпендикулярно ему и направлению неоднородности плазмы;  $f(k_{iy}, k_{iz})$  — диаграмма передающей и принимающей антенны;  $z_i$  и  $y_i$  — координаты антенны,  $\Theta$  — часть мощности зондирующего излучения, поглощающаяся в ВГР;  $I(q)$  — фактор усиления, описывающий эффективность УР [1,5].

В случае усиленного рассеяния в верхнем гибридном резонансе (ВГР), в холодной плазме, имеющей малые геометрические размеры  $l = \left(\frac{l}{n} \frac{dn}{dx}\right)^{-1} \ll c/\omega_i$ ,  $q < (l\rho_{He}^2)^{-1}$ , согласно [1],  $I(q) \sim q$ . Как видно из уравнения (1), сигнал УР зависит от положения гибридного резонанса  $x_r(\omega_i)$ . Если возмущения плотности являются гармоническими и одномерными  $\delta n_{\Omega} \sim \delta(\Omega - \Omega_0)\delta q_y \delta q_z$ , эту зависимость можно использовать для реконструкции относительного возмущения плотности плазмы в волне с помощью интерферометрических измерений [4]. Действительно, при этом

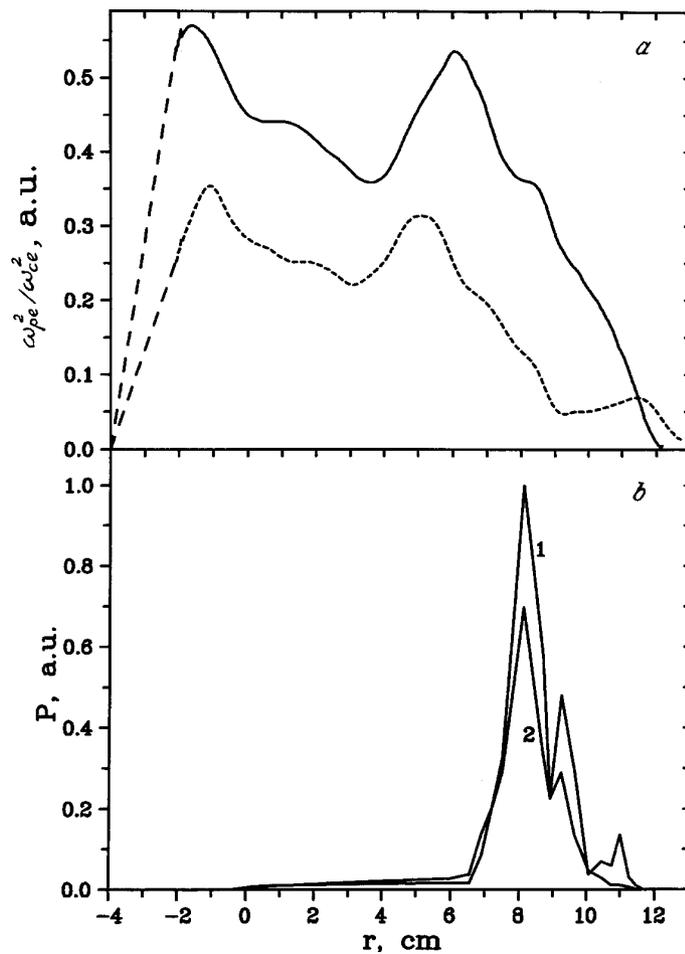
$$\delta n_{\Omega}(x) \sim N_{IES}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dq}{2\pi q} e^{-iqx} \int_{-\infty}^{+\infty} dx_r e^{iqx_r} A_{IES}(x_r), \quad (2)$$

где  $A_{IES}(x_r) = \langle e^{-i\Omega t} A_{ES}(t, x_r) \rangle_t$ .

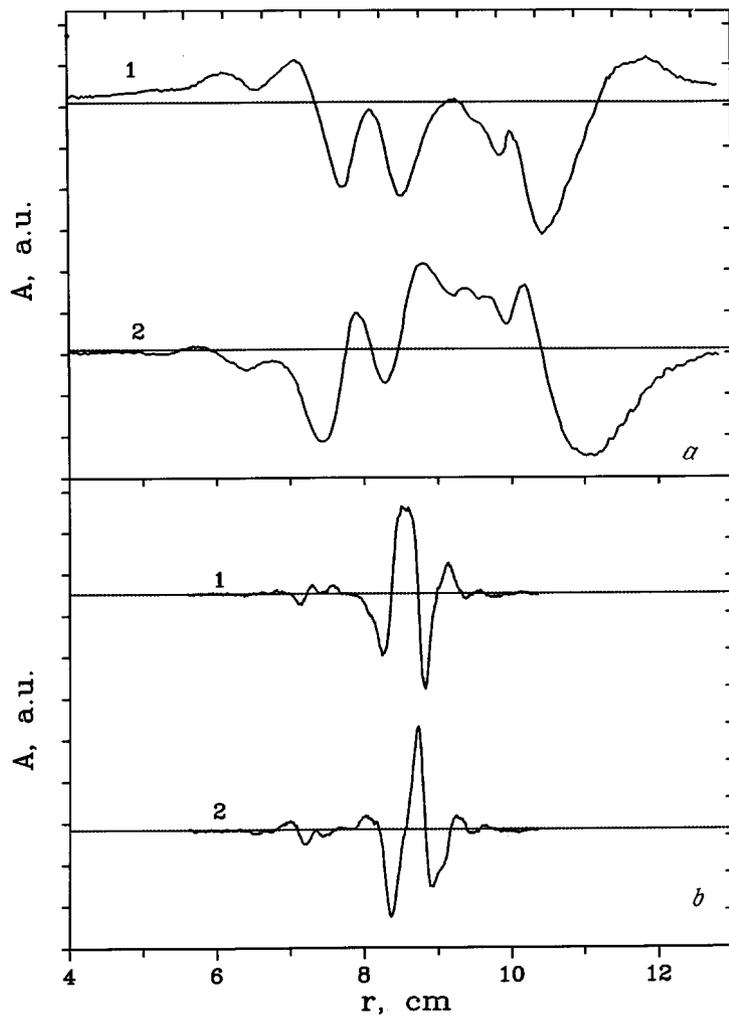
В случае более сложных неодномерных возмущений плотности ИУР может быть использован для оценки характерных длин волн, распространяющихся в плазме гармонических колебаний.

В настоящей работе методика ИУР впервые применяется в ситуации, когда магнитное поле неоднородно и область ВГР доступна для волн, возбуждаемых извне. Результаты измерений пространственного распределения тестовых волн нижнегибридного частотного диапазона сопоставляются с данными независимых измерений, выполненных с помощью интерферометрической зондовой методики. Эксперименты выполнены на линейной установке "Boxes" [6], в которой токамакоподобная конфигурация магнитного поля создавалась некоторым разворотом магнитных катушек относительно друг друга. Эффективный "большой радиус токамака" равнялся 70 см. Плазма создавалась с помощью импульсного ВЧ-разряда между двумя плоскими электродами, помещенными в торцах камеры ( $f_{RF} = 55 \text{ MHz}$ ,  $P_{RF} < 200 \text{ W}$ ,  $\tau_{RF} = 20 \mu\text{s}$ ). Параметры плазмы в импульсе  $n_e \leq 2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_e < 4 \text{ eV}$ ,  $P = 1 \text{ Pa}$ .

Распределение электронной плотности плазмы вдоль направления неоднородности магнитного поля показано на рис. 1, *a*. Сплошная линия соответствует времени ВЧ-импульса, пунктирная линия — по прошествии некоторого времени после окончания импульса, когда и проводились интерферометрические измерения. Нижнегибридная антенна, возбуждающая тестовую волну, расположена со стороны слабого магнитного поля установки при  $x = 9 \text{ cm}$  (рис. 1, *a*) и смещена на 12 см вдоль по магнитному полю относительно плоскости симметрии установки. Использовалась схема возбуждения зондирующей волны, аналогичная экспериментам в токамаке. СВЧ-излучение на частоте  $f_i = 2.45 \text{ GHz}$  мощностью  $P_i = 100 \text{ mW}$  заводилось в плазму со стороны сильного магнитного поля с помощью волноводной антенны, расположенной в экваториальной плоскости при  $x = -2 \text{ cm}$ . Поведение сигнала УР соответствовало случаю токамачной геометрии магнитного поля, что было особенно четко продемонстрировано в эксперименте по рассеянию на спонтанных флуктуациях плазмы. Зависимость сигнала, рассеянного назад на спонтанных флуктуациях плазмы от положения ВГР, рассчитанного по формуле  $\omega_i^2 = \omega_{pe}^2(x_r) + \omega_{ce}^2(x_r)$ , показана на рис. 1, *b*. Сканирование положения ВГР осуществлялось с помощью изменения частоты зондирующего излучения. Обе компоненты спектра рассеяния, сдвинутые в красную (кривая 1) и в синюю (кривая 2) стороны наблюдались лишь при выполнении условий существования ВГР внутри плазмы. Своего максимального значения сигнал УР достигал в области  $6 \text{ cm} < x_r < 10 \text{ cm}$ , когда электронно-циклотронный слой расположен внутри плазмы и ВГР доступен. Такое поведение сигнала УР характерно для эксперимента на токамаке [1].



**Рис. 1.** *a* — распределение электронной плотности плазмы вдоль направления неоднородности магнитного поля. Сплошная линия соответствует времени ВЧ-импульса, пунктирная линия — по прошествии некоторого времени после окончания импульса, когда и проводились интерферометрические измерения. *b* — зависимость сигнала, рассеянного назад на спонтанных флуктуациях плазмы, от положения ВГР. Компоненты спектра рассеяния, сдвинутые в красную (кривая 1) и в синюю (кривая 2) стороны.

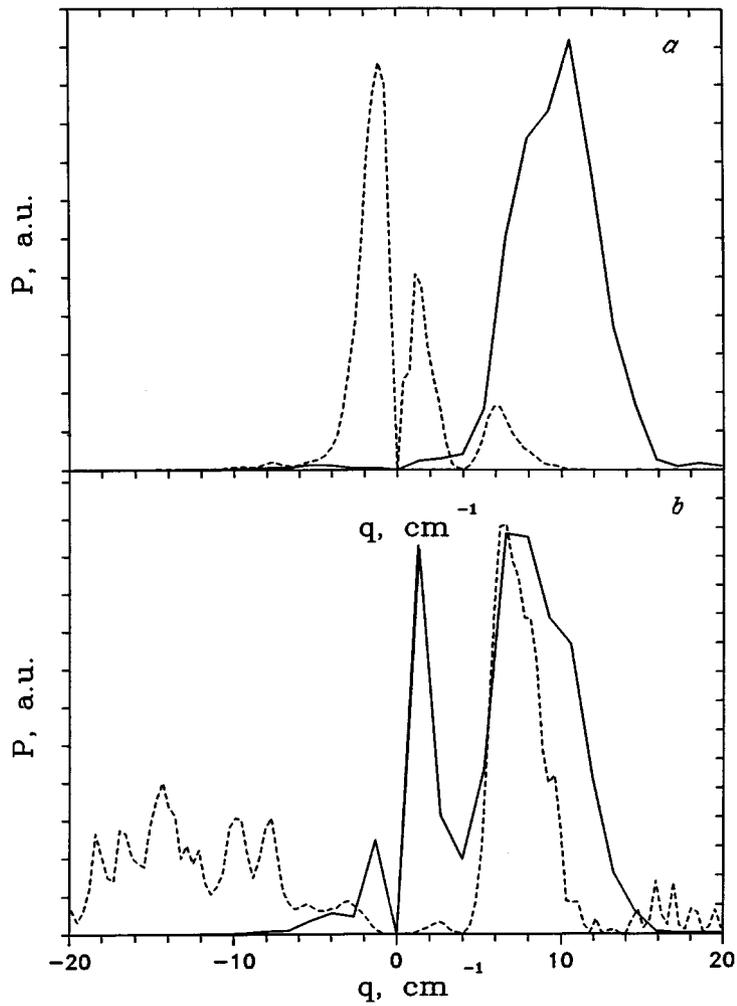


**Рис. 2.** Интерферограммы, полученные с помощью высокочастотных зондов (*a*) и метода ИУР (*b*) для НГ тестовой волны на частоте  $f_0 = 23$  MHz при двух значениях фазы опорного сигнала, сдвинутых друг относительно друга на  $90^\circ$  (кривые 1 и 2).

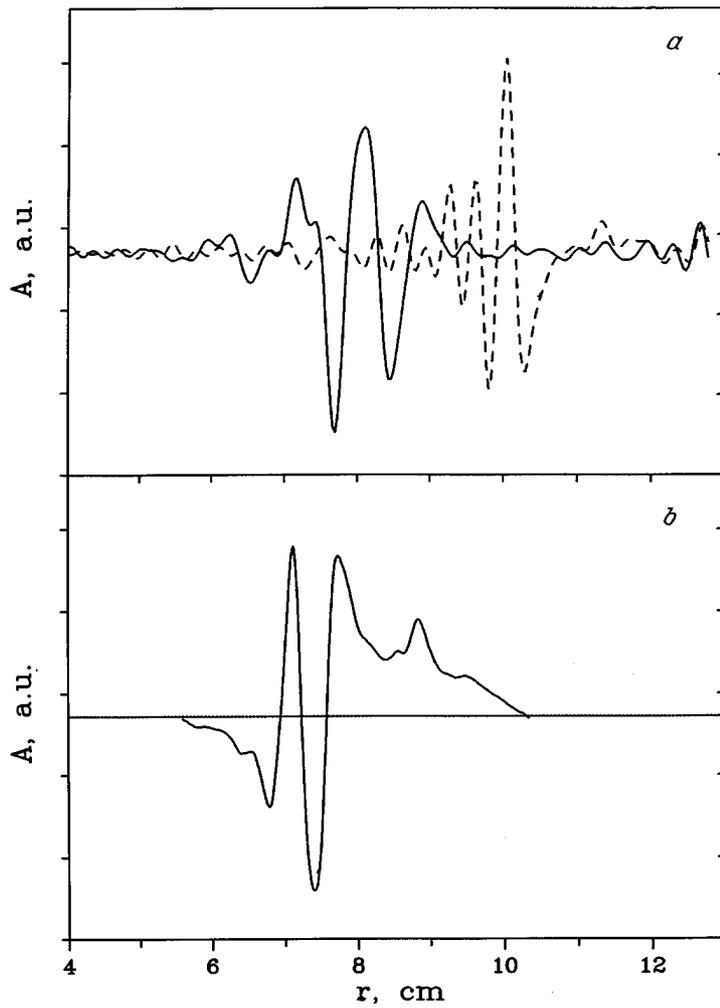
Результаты эксперимента по ИУР показаны на рис. 2, *b* для НГ тестовой волны на частоте  $f_0 = 23$  МГц. Интерферограммы снимались при двух значениях фазы опорного сигнала, сдвинутых относительно друг друга на  $90^\circ$  (кривые 1 и 2). Как видно, сигнал ИУР локализован на внешнем участке профиля плотности плазмы (рис. 1, *a*). В то же время интерферограммы, полученные с помощью ВЧ-зондов и представленные на рис. 2, *a*, имеют более широкое пространственное распределение и занимают всю градиентную область (кривые 1 и 2 также соответствуют фазам опорного сигнала, сдвинутым друг относительно друга на  $90^\circ$ ).

Фурье-спектры, полученные из этих интерферограмм и изображенные на рис. 3, *a*, сильно отличаются друг от друга. Пространственный спектр сигнала УР  $P(q)$  ( $P \sim \tilde{A}_{IES}^2$ ) (сплошная линия) локализован в области положительных волновых векторов  $q$ , что соответствует фазе волны, распространяющейся из плазмы. Это согласуется с НГ природой тестовой волны. Пространственный спектр сигнала ВЧ-зондов  $P(q)$  ( $P \sim \tilde{A}_{RF}^2$ ) (пунктирная линия) тоже асимметричен, но в нем доминирует компонента, локализованная в области отрицательных  $q$ . Другим существенным отличием спектра УР является его сравнительная коротковолновость. Это отличие может быть объяснено, если учесть различную чувствительность данных диагностик к различным диапазонам длин волн. ВЧ-зонды измеряют потенциал плазмы и более чувствительны к длинноволновым возмущениям плотности плазмы, в то время как УР, в силу пропорциональности фактора усиления  $I(q) \sim q$ , к коротковолновой части спектра. Такая различная чувствительность этих диагностик к флуктуациям различного пространственного масштаба может быть учтена при реконструкции пространственной структуры возмущений плотности. Действительно, из уравнения Пуассона  $\Delta\varphi = -4\pi(\rho_i + \rho_e)$  следует, что возмущения плотности  $\tilde{N}_{RF}(q) \sim q^2 \tilde{A}_{RF}$ , в то время как выражение (2) дает  $\tilde{N}_{IES}(q) \sim q^{-1} \tilde{A}_{IES}$ .

Части спектров  $\tilde{N}_{IES}(q)$  (сплошная линия) и  $\tilde{N}_{RF}(q)$  (пунктирная линия) ( $P \sim \tilde{N}^2(q)$ ), лежащие в области положительных  $q$ , совпадают, в области же отрицательных  $q$  такого соответствия нет, как видно из рис. 3, *b*. Причину такого расхождения можно объяснить на основании рис. 4, *a*, где представлены зависимости  $\delta N_{RF}(x)^{q < 0}$  (пунктирная линия) и  $\delta N_{RF}(x)^{q > 0}$  (сплошная линия), восстановленные по Фурье-спектру рис. 3, *b*, а также на основании рис. 4, *b*, где представлена зависимость  $\delta N_{IES}(x)$ , восстановленная по Фурье-спектру рис. 3, *b*. Как видно из рис. 4, положение и пространственная структура возмущения плотности,



**Рис. 3.** *a* —пространственные Фурье-спектры, полученные из интерферограмм, изображенных на рис. 2. Пунктирная линия — спектр ИУР, сплошная линия — спектр ВЧ-зондов. *b* — спектры  $\tilde{N}_{IES}(q)$  (сплошная линия) и  $\tilde{N}_{RF}(q)$  (пунктирная линия) ( $P \sim \tilde{N}^2(q)$ ), полученные из данных рис. 3, *a*.



**Рис. 4.** *a* — пространственная структура возмущения электронной плотности  $\delta N_{RF}(x)$ , восстановленная из данных ВЧ-зондов рис. 3, *b*:  $\delta N_{RF}(x)^{q>0}$  (сплошная линия),  $\delta N_{RF}(x)^{q<0}$  (пунктирная линия). *b* — пространственная структура возмущения электронной плотности  $\delta N_{IES}(x)$ , восстановленная из данных ИУР рис. 3, *b*.

восстановленная из данных ИУР  $\delta N_{IES}(x)$  в основном совпадает с восстановленной из положительной части Фурье-спектра  $\delta N_{RF}(x)^{q>0}$ , полученного с помощью ВЧ-зондов. Они расположены на внешней части профиля плотности (рис. 1, *a*), который доступен для зондирования СВЧ-излучением в методе УР. Возмущение плотности  $\delta N_{RF}(x)^{q<0}$  расположено в области небольшого "горба" на распределении плотности рис. 1, *a*. Эта часть плазмы недоступна для зондирующей волны (рис. 1, *b*). Именно этим, видимо, можно объяснить подавление отрицательной части спектра в сигнале ИУР.

В заключение нужно отметить, что представленные здесь результаты являются первым применением ИУР в условиях, когда конфигурация магнитного поля приближена к условиям токамака. В работе показано хорошее соответствие результатов восстановления флуктуации плотности плазмы в НГ волне с помощью двух диагностик ИУР и ВЧ-зондов, что позволяет обосновать применение этой диагностики для исследования коротковолновых колебаний в тороидальной плазме.

Данная работа поддержана DFG грантами SFB 191 и 146 113/146, грантом РФФИ 96-02-17913 и грантом научной школы 96-15-96367.

## Список литературы

- [1] *Novik K.M., Piliya A.D.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1993. V. 35. P. 357.
- [2] *Arkhipenko V.I. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1995. V. 37. P. 347.
- [3] *Arkhipenko V.I., Budnikov V.N., Gusakov E.Z., Selenin V.L., Simonchik L.V.* // Tech. Phys. Lett. 1993. V. 19. P. 20.
- [4] *Gusakov E.Z., Kaganskaya N.M., Lvov M.V., Selenin V.L.* // Contr. papers ICPP. 1996. V. 2. Nagoya.
- [5] *Bruesenhaber B., Gusakov E.Z., Kraemer M., Piliya A.D.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. V. 36. P. 997.
- [6] *Bruesenhaber B., Kraemer M.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1997. V. 39. P. 389.