

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, Θ — 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 ($f_{RF} = 55$ МГц, $P_{RF} < 200$ Вт, $\tau_{RF} = 20$ мкс). Параметры плазмы в импульсе $n_e \leq 2 \cdot 10^{10}$ см⁻³, $T_e < 4$ эВ, $P = 1$ Па.

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 $x = 9$ см (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 $f_i = 2.45$ GHz мощностью $P_i = 100$ мВт заводилось в плазму со стороны сильного магнитного поля с помощью волноводной антенны, расположенной в экваториальной плоскости при $x = -2$ см. 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 см $< x_r < 10$ см, когда электронно-циклотронный слой расположен внутри плазмы и ВГР доступен. Такое поведение сигнала УР характерно для эксперимента на токамаке [1].

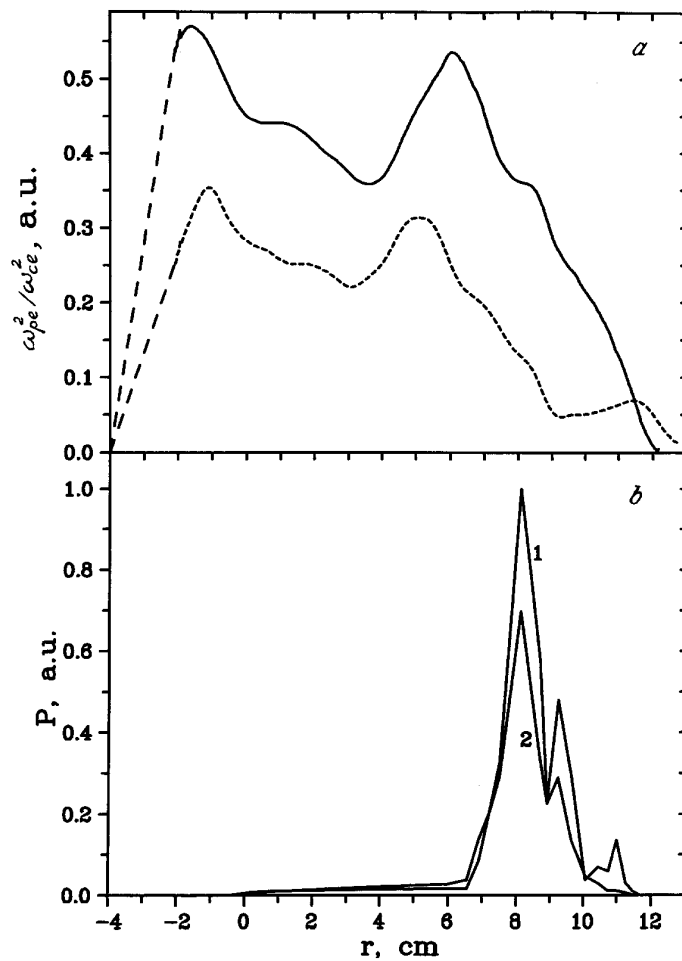


Рис. 1. *a* — распределение электронной плотности плазмы вдоль направления неоднородности магнитного поля. Сплошная линия соответствует времени ВЧ-импульса, пунктирная линия — по прошествии некоторого времени после окончания импульса, когда и проводились интерферометрические измерения. *b* — зависимость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

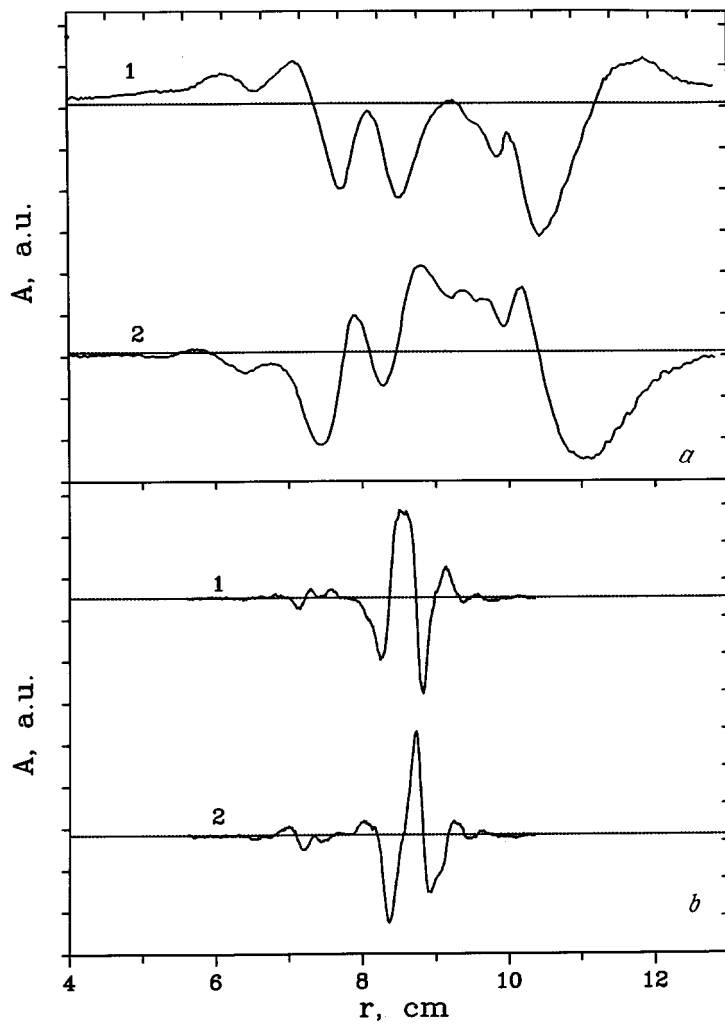


Рис. 2. Интерферограммы, полученные с помощью высокочастотных зондов (*a*) и метода ИУР (*b*) для НГ тестовой волны на частоте $f_0 = 23$ MHz при двух значениях фазы опорного сигнала, сдвинутых друг относительно друга на 90° (кривые 1 и 2).

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° (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°).

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,

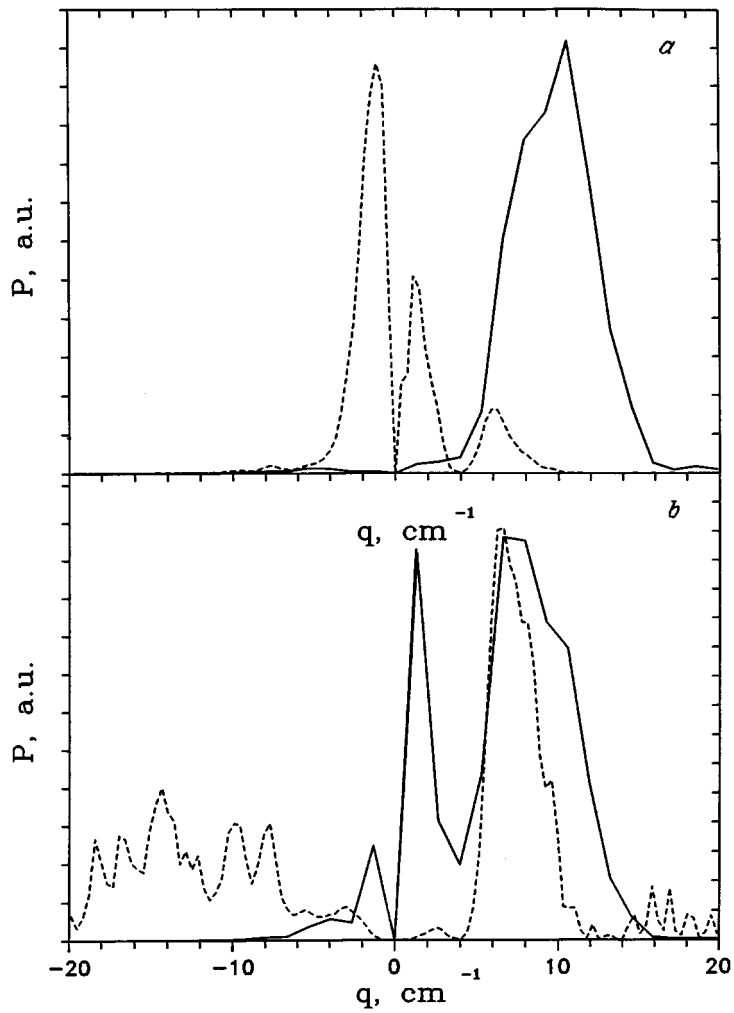


Рис. 3. *a* —пространственные Фурье-спектры, полученные из интерферограмм, изображенных на рис. 2. Пунктирная линия — спектр ИУР, сплошная линия — спектр ВЧ-зондов. *b* — спектры $\tilde{N}_{IES}(q)$ (сплошная линия) и $\tilde{N}_{RF}(q)$ (пунктирная линия) ($P \sim \tilde{N}^2(q)$), полученные из данных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

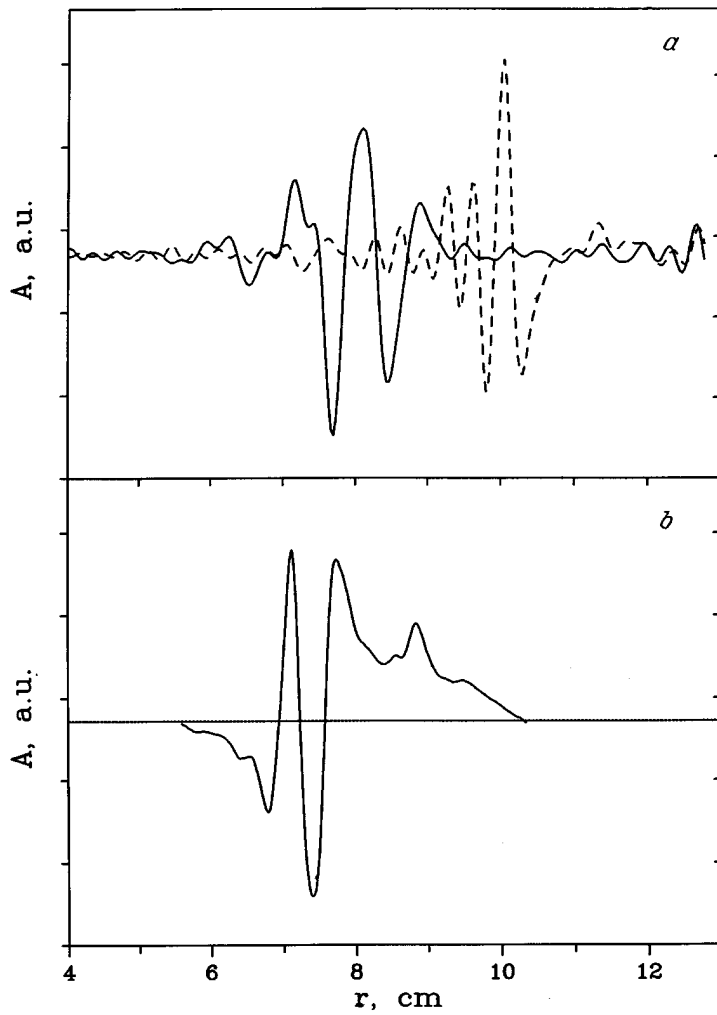


Рис. 4. *a* — пространственная структура возмущения электронной плотности $\delta N_{RF}(x)$, восстановленная из данных ВЧ-зондов рис. 3, *b*: $\delta N_{RF}(x)^{q>0}$ (сплошная линия), $\delta N_{RF}(x)^{q<0}$ (пунктирная линия). *b* — пространственная структура возмущения электронной плотности $\delta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