

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ КАК МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

*Н.Г.Басов, В.Ю.Быченко, Н.Н.Зорев,
М.В.Осипов, А.А.Рупасов, В.П.Силин
Г.В.Склизков, А.Н.Стародуб, В.Т.Тихончук,
А.С.Шиканов*

Излагаются результаты экспериментального исследования комбинационного рассеяния зондирующего излучения при сферическом лазерном нагреве оболочечных мишеней на установке "Кальмар". Для зондирования плазмы использовалось излучение второй гармоники Nd-лазера. Зарегистрированы излучения на частотах $3/2\omega_0$, $5/2\omega_0$ и $3\omega_0$ (ω_0 – частота Nd-лазера).

Эффективным методом диагностики плотной плазменной "короны", нагреваемой мощными световыми импульсами [1], является исследование рассеяния излучения дополнительного лазера [2]. В настоящей работе предложен и реализован новый для нестационарной сверхплотной плазмы метод, позволяющий по комбинационному рассеянию (см., например, [3]) зондирующего излучения оценить не только форму спектра и уровень плазменных колебаний в точках профиля плазменной "короны" с фиксированной плотностью, но и установить относительный вклад в поглощение каждого из развивающихся нелинейных процессов.

Эксперименты проводились на девятиканальном неодимовом лазере "Кальмар" [1]. Лазерное излучение фокусировалось на оболочечную мишень, помещенную в вакуумной камере (рис. 1). Длительность импульса составляла $\approx 2,5$ нсек по основанию. Плазма зондировалась излучением второй гармоники волны накачки, получаемым с помощью кристалла KDP (2), установленного в одном из пучков. Энергия лазера достигала 200 Дж, что при диаметре пятна фокусировки ≈ 150 мкм соответствовало плотности потока $q_0 \approx 2 \cdot 10^{14}$ Вт/см². Энергия зондирующего излучения составляла ≈ 1 Дж при $q_1 \approx 2 \cdot 10^{12}$ Вт/см². Ширина спектра греющего и зондирующего излучений составляла $\approx 5 \text{ \AA}$ по половине интенсивности. Исследование рассеянного излучения осуществлялось в двух каналах регистрации. В первом, направление которого составляло угол 105° с осью зондирующего пучка, изображение мишени передавалось объективом (3, рис. 1) на щель спектрографа ИСП-51 (4), регистрирующего излучение в диапазоне, включающем частоты $3/2\omega_0$, $2\omega_0$, $5/2\omega_0$ (ω_0 – частота греющего излучения). Щель спектрографа располагалась в плоскости рассеяния зондирующего пучка и проходила через центр изображения мишени (см. рис. 2, г). Пространственное разрешение по объекту составляло ≈ 15 мкм. Кроме того регистрировались изображения мишени в излучениях вблизи частот $3/2\omega_0$ и $2\omega_0$, выделяемых светофильтрами (5, 6, 7 рис. 1). Регистрация излучения плазмы вблизи частоты $3\omega_0$ осуществлялось во втором канале под углом 25° к оси зондирующего пучка (8, рис. 1).

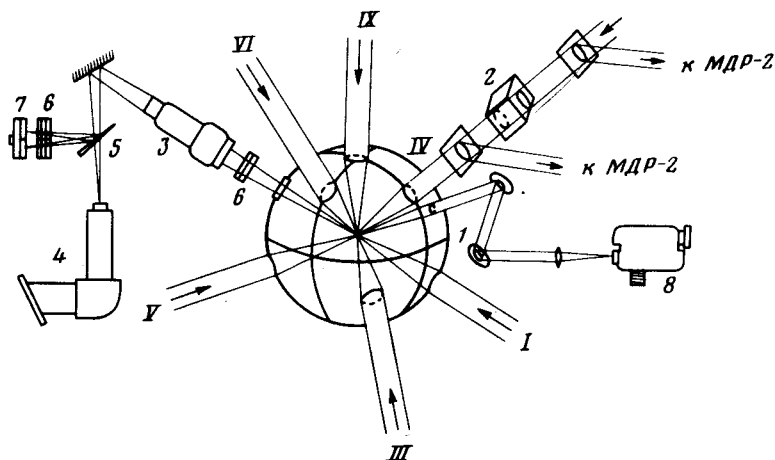


Рис. 1. Схема расположения греющих пучков (римские цифры) и спектральной диагностической аппаратуры: 1 – вакуумная камера; 2 – кристалл KDP; 3 – объектив; 4 – спектрограф ИСП-51; 5 – клин; 6 – светофильтры; 7 – кассеты; 8 – монохроматор ДМР-4

При нагреве как стеклянных, так и полистирольных оболочечных мишеней при наличии зондирующего излучения обнаружено излучение вблизи частоты $5/2\omega_0$ (рис. 2, в). Это излучение имеет двухкомпонентную структуру спектра и локализовано, как правило, в двух областях плазменной короны (А и В рис. 2, в), причем в той ее части, которая находится под воздействием зондирующего излучения. В отсутствие зондирующего света такое излучение не было зарегистрировано. Спектральная ширина излучения по уровню $0,1I_{max}$ составляет $\approx 30+40\text{Å}$, а расстояние между спектральными компонентами $\approx 19\text{Å}$.

В отсутствие зондирующего излучения при $q_0 \approx 2 \cdot 10^{14}$ Вт/см² как и ранее [4] имеет место генерация гармоники $3/2\omega_0$. При наличии зондирующего излучения наряду с излучением вблизи $5/2\omega_0$ на спектрограммах гармоники $3/2\omega_0$ были обнаружены дополнительные области свечения, локализованные по плазменной короне точно так же, как области свечения на частоте $5/2\omega_0$. Такая спектрограмма в диапазоне $3/2\omega_0$ представлена на рис. 2, б. Ниже (рис. 2, д) приведены спектральные распределения интенсивности для трех областей свечения, две из которых (А и В) соответствуют областям свечения вблизи $5/2\omega_0$ (рис. 2, в). Возникающее дополнительное излучение вблизи частоты $3/2\omega_0$ (также, как и вблизи частоты $5/2\omega_0$) имеет двухкомпонентную структуру спектра с полной шириной $\approx 185\text{Å}$ по уровню $0,1I_{max}$ и расстоянием между компонентами $\approx 37\text{Å}$. В направлении регистрации яркость дополнительного излучения того же порядка или даже больше яркости собственного излучения гармоники $3/2\omega_0$, составляющей для области С рис. 2, а, б $\approx 5 \cdot 10^6$ Вт/см²·стерад.

Для спектрограмм 2, б и в энергия, заключенная в дополнительном излучении в области $3/2\omega_0$, приблизительно в 50 ± 15 раз больше энергии, содержащейся в излучении вблизи $5/2\omega_0$.

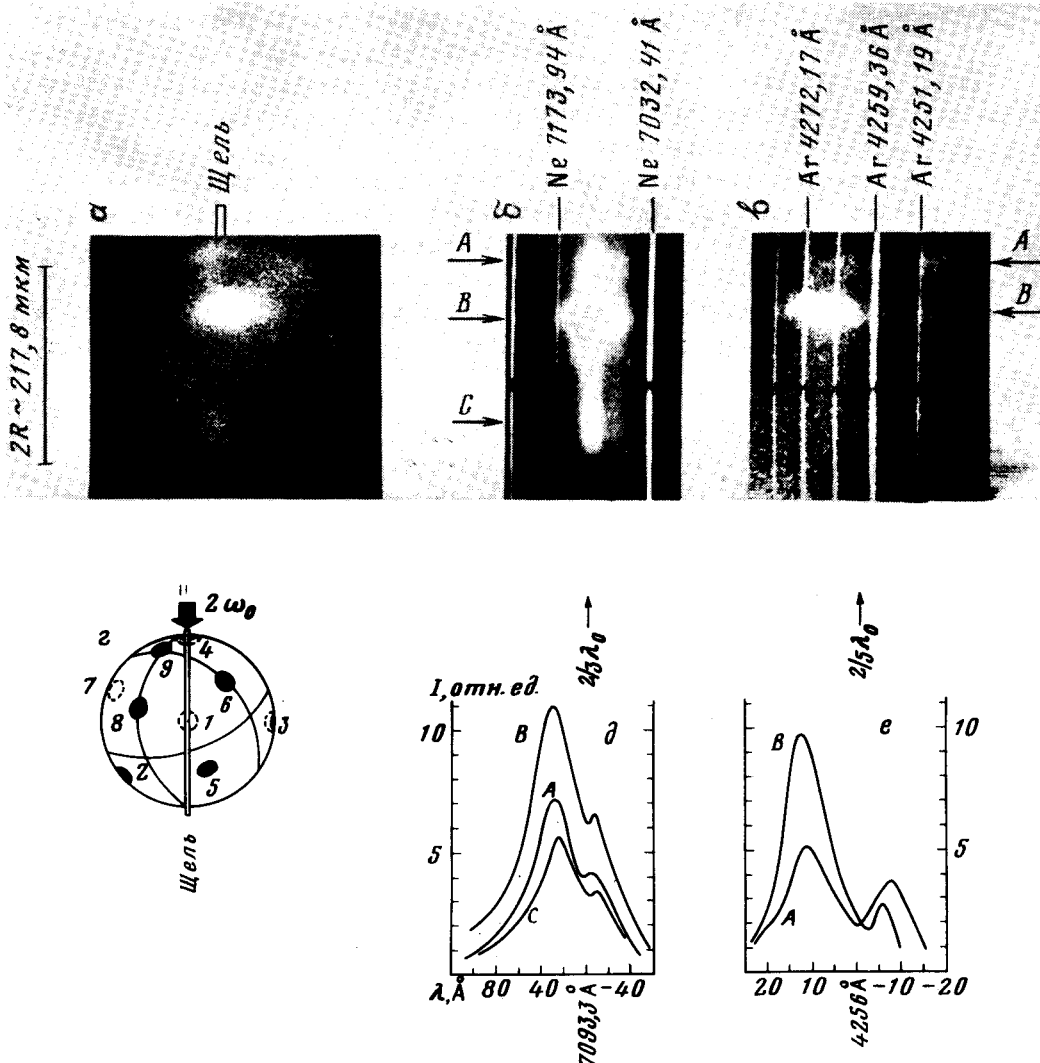


Рис. 2. Фотография свечения плазменной короны в излучении вблизи $3/2\omega_0$ (а). Спектрограммы и спектральные распределения интенсивности излучения плазмы вблизи $3/2\omega_0$ (б, д) и $5/2\omega_0$ (в, е). Схема расположения щели спектрографа по изображению мишени (г) (цифры обозначают оптические оси лазерных пучков; зондирующее излучение указано стрелкой). Мишень — полая микросфера из $(C_8D_8)_n$ диаметром $2R \approx 217,8$ мкм с толщиной стенки $\Delta R \approx 2,1$ мкм

Во втором канале зарегистрировано излучение вблизи частоты $3\omega_0$. Оно имеет однокомпонентную структуру спектра с шириной (по уровню $0,5 I_{max}$) $\lesssim 5 \text{ \AA}$ и максимумом, смещенным относительно точного значения $1/3\lambda_0 = 3546,7 \text{ \AA}$ в сторону больших длин волн на величину $\sim 3 \text{ \AA}$.

Факт регистрации рассеянного излучения на частотах $3/2\omega_0$, $5/2\omega_0$ и $3\omega_0$ свидетельствует о наличии в плазме интенсивных флуктуаций продольных ленгмюровских волн на частотах ω_0 и $1/2\omega_0$, воз-

буждаемых соответственного в областях критической n_c и четверти критической плотности $n_c/4$ (для Nd-лазера $n_c \approx 10^{21}$ см $^{-3}$). Отметим, что наличие интенсивных ленгмюровских волн в области четверти критической плотности для излучения CO $_2$ -лазера ($\approx 2,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$) было установлено в работе [5].

Наличие двухкомпонентной структуры спектра на частотах дробных гармоник ($3/2\omega_0$ и $5/2\omega_0$) подтверждает представления [4, 6] об излучении плазмы из области четверти критической плотности. Именно, двухкомпонентная структура спектра связана с рассеянием зондирующего или греющего излучения на плазменных волнах вглубь плазмы (синие сателлиты) и наружу из плазмы (красные сателлиты).

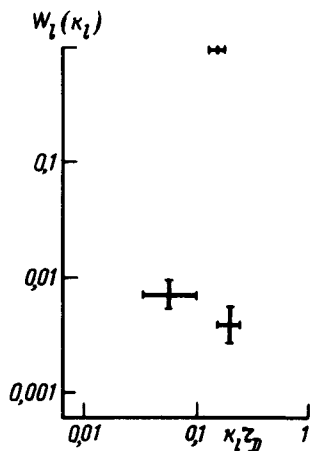


Рис. 3. Результат восстановления спектра плазменной турбулентности в области $n_c/4$ по данным эксперимента ($T_e \approx 0,5$ кэВ, r_D — дебаевский радиус электрона)

При этом расстояние между сателлитами в спектре $3/2\omega_0$ должно быть в 1,6 раза больше соответствующей величины для гармоники $5/2\omega_0$, что согласуется с экспериментально наблюдаемым отношением $\Delta\lambda_{3/2}/\Delta\lambda_{5/2} \approx 1,9$. Формула, связывающая $\Delta\lambda_{3/2}$ с электронной температурой T_e [6], даёт среднее по времени действия греющего импульса значение $T_e = 0,5 \pm 0,6$ кэВ в области $n_c/4$.

Интенсивность рассеянного излучения определяется величиной спектральной плотности энергии ленгмюровских волн $W_l(k_l)$. Поэтому одновременное измерение интенсивностей линий $3/2\omega_0$ и $5/2\omega_0$ комбинационного рассеяния зондирующего излучения и гармоники $3/2\omega_0$ позволяет восстановить зависимость W_l от волнового числа ленгмюровских волн k_l . На рис. 3 приведен результат обработки данных эксперимента в предположении об изотропии возбуждаемой турбулентности. Измеренная экспериментально яркость излучения плазмы на частоте $3/2\omega_0$ позволяет оценить полную напряженность поля ленгмюровских волн E_l в области $n_c/4$. Для параметров нашего эксперимента ($T_e \approx 0,5$ кэВ, размер неоднородности плотности $L \approx 20 - 30$ мкм) получаем $E_l \approx 0,3E_0$. Эта оценка E_l не противоречит современным теоретическим результатам [7] и указывает на то, что в области $n_c/4$ за счет параметрических неустойчивостей поглощается не более 10% энергии греющего излучения.

Что касается излучения на частоте $3\omega_0$, то малая ширина спектра позволяет связать его возникновение с рассеянием зондирующего излучения на упорядоченной структуре ленгмюровских плазменных волн в области n_c , возникающих за счет процесса линейной трансформации греющего излучения [8].

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
19 июля 1979 г.

Литература

- [1] Ю.В.Афанасьев, Н.Г.Басов, О.Н.Крохин, В.В.Пустовалов, В.П.Силин, Г.В.Склизков, В.Т.Тихончук, А.С.Шиканов. Взаимодействие мощного лазерного излучения с плазмой. Изд. ВИНТИ, сер. Итоги науки и техники. "Радиотехника", т. 17, 1978.
- [2] А.А.Рупасов, Г.В.Склизков, В.П.Цапенко, А.С.Шиканов. ЖЭТФ, 65, 1898, 1973.
- [3] Дж.Бекефи. Радиационные процессы в плазме, М., изд. Мир, 1971.
- [4] А.И.Авров, В.Ю.Быченков, О.Н.Крохин, В.В.Пустовалов, А.А.Рупасов, В.П.Силин, Г.В.Склизков, В.Т.Тихончук, А.С.Шиканов. Письма в ЖЭТФ, 24, 293, 1976; ЖЭТФ, 72, 970, 1977.
- [5] H.A.Baldis, J.C.Samson, P.V.Corkum. Phys. Rev. Lett., 41, 1719, 1978.
- [6] В.Ю.Быченков, В.П.Силин, В.Т.Тихончук. Физика плазмы, 3, 1314, 1977.
- [7] В.П.Силин, В.Т.Тихончук. Письма в ЖЭТФ, 27, 504, 1978.
- [8] А.Б.Владимирский, В.П.Силин, А.Н.Стародуб. Краткие сообщения по физике, ФИАН, №12, 34, 1978.