

ОБРАБОТКА ИНТЕРФЕРОГРАММ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С РЕЗКИМ ГРАДИЕНТОМ НА ПРОФИЛЕ ПЛОТНОСТИ

С.Ф. Гончаров, Р.В. Серов, В.П. Яновский

Предлагается метод обработки интерферограмм лазерной плазмы со слиянием интерференционных полос. В предположении, что полосы сгущаются, найдено пространственное распределение плотности с резким градиентом вне фокального пятна.

При исследовании лазерной плазмы большое значение имеет определение пространственного распределения и временной эволюции профиля электронной концентрации. На установке УМИ-35 ИОФАН СССР определение электронной плотности по интерферометрическим измерениям производится с помощью применения интерактивной системы обработки ОПТИК, разработанной в ИПМ АН СССР /1/. Эта система использует регуляризованные алгоритмы определения неизвестных функций, основанные на оптимальных с информационной точки зрения их представлениях, что дает хорошие результаты даже в том случае, когда искомые функции являются быстроменяющимися или имеют особенности.

Однако в последних экспериментах при прослеживании линий экстремумов в интерактивном режиме возникли затруднения, связанные с неоднозначностью в положении экстремумов. На интерферограммах плазмы, создаваемой при облучении тонких ($3 \div 25$ мкм) лавсановых пленок лазером с энергией $50 \div 100$ Дж (длительность импульса 8 нс, диаметр фокального пятна 0,4 мм) наблюдаются места слияния интерференционных полос (рис. 1), представляющие собой коническую структуру толщиной $100 \div 200$ мкм с радиусом $1 \div 1,5$ мм у поверхности мишени. Теневая фотография показала, что в этих местах находятся плотные области плазмы.

Подобная структура наблюдалась на установке Мишень-2 /2/ и объяснялась столкновением горячей расширяющейся плазмы, образующейся в центральных областях фокального пятна, с холодной плазмой, создаваемой в периферийных областях "крыльями" распределения интенсивности излучения на поверхности мишени. Причем подобная структура наблюдалась только при облучении мишени с большими поперечными размерами, и углы раствора конусов были разными для мишеней из различных материалов. Однако на представленных интерферограммах установки Мишень-2 каждая интерференционная полоса просматривается ("неразвитая" коническая структура), т.е. нет слияния полос в одну. Следовательно, все поле можно обработать традиционными математическими методами.

В настоящем сообщении предлагается метод обработки интерферограмм со слиянием интерференционных полос, подобных представленной на рис. 1. Для того, чтобы применить предлагаемый подход в математически строгой системе обработки ОПТИК, он сначала исследовался при ручной обработке с последующим восстановлением профиля электронной концентрации по методу Нестора — Олсена /3/.

При восстановлении электронной концентрации предполагается, что плазменное образование аксиально симметричное. Тогда задача сводится к решению известного уравнения Абея для каждого сечения $N = \text{const}$ сетки разностной аппроксимации. Так как решение этого уравнения неустойчиво, то строится некоторое регуляризованное решение. Выберем некоторое сечение $N = \text{const}$ (рис. 1, пунктирная линия), совпадающее с начальным положением невозмущенной полосы, и определим сдвиг фаз ΔK (в числе полос) этой полосы вдоль сечения. В предположении, что все интерференционные полосы в месте слияния не исчезают и не перепутываются, а просто сгущаются, зависимость сдвига фаз ΔK от расстояния от оси симметрии R приведена на рис. 2а. Обращает на себя внимание наличие побочного максимума на зависимости $\Delta K(R)$, причем сам профиль гладкий, без разрывов. Решая для этого сечения уравнение Абея по методу Нестора — Олсена, получим восстановленный профиль $N_e(R)$ для этого сечения (рис. 2б), на котором такая структура с побочным максимумом еще более выражена.

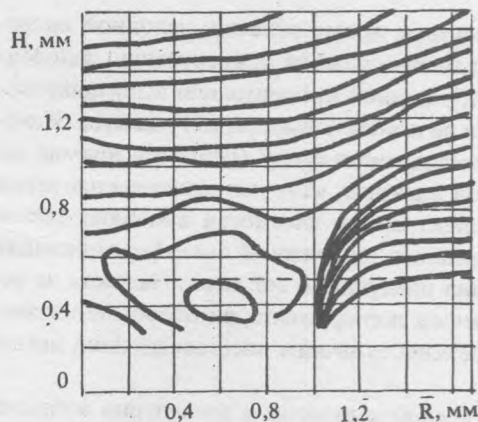


Рис. 1. Фрагмент интерферограммы со слиянием полос лазерной плазмы, полученной в эксперименте. Излучение падает сверху вдоль оси H , R – расстояние от оси симметрии. Пунктирная линия – некоторое сечение ($H = \text{const}$), вдоль которого решается уравнение Абеля.

Рис. 2. а) Зависимость сдвига фаз ΔK от расстояния R для выделенного сечения, б) Восстановленный профиль $N_e(R)$ электронной концентрации для этого сечения (сплошная линия); измененный профиль $N_e(R)$: амплитуда побочного максимума увеличена в 2 раза (пунктирная линия), гладкий профиль без побочного максимума (штрих-пунктирная линия).

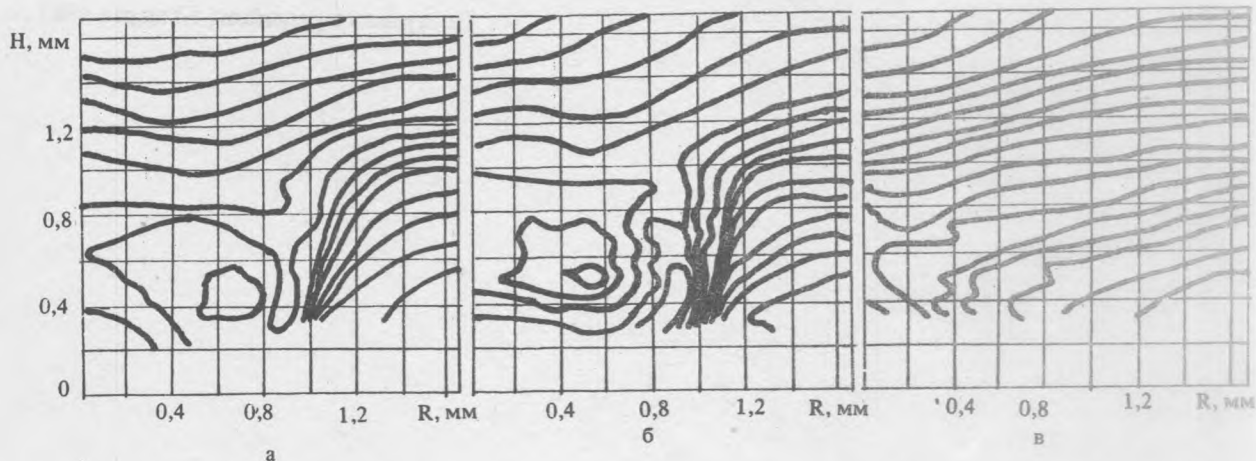
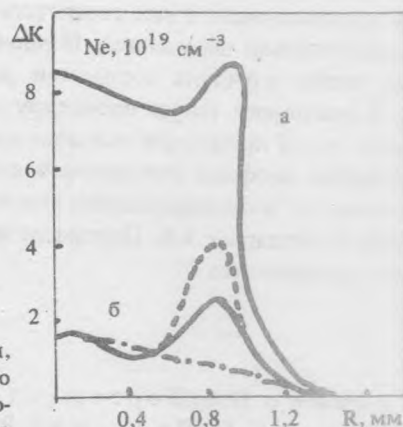


Рис. 3. Восстановленная (после решения прямой задачи) интерферограмма: для профиля плотности, полученного из исходной интерферограммы (а); для измененного профиля плотности с увеличенной в 2 раза амплитудой побочного максимума (б); для измененного гладкого профиля без побочного максимума (в).

Таким образом можно восстановить все распределение $N_e(R, H)$. Решая теперь прямую задачу, которая вполне корректна, из зависимости $N_e(R, H)$ можно получить исходную интерферограмму при условии, что найдено верное решение. На рис. 3а дана для сравнения с исходной (рис. 1) восстановленная путем решения прямой задачи интерферограмма. Видно их общее сходство. Небольшое отличие в центре ($\sim 10\%$) связано с применением ручной обработки интерферограммы (рефракция не учитывалась).

Для проверки существования побочного максимума на профиле электронной концентрации проводился вычислительный эксперимент. Было проведено восстановление интерферограмм с измененным профилем $N_e(R, H)$ (рис. 2) в двух случаях. В первом амплитуда побочного максимума была увеличена в 2 раза (рис. 3б), во втором использовался гладкий профиль без побочного максимума (рис. 3в). Видно резкое отличие интерферограмм от исходной (рис. 1).

Итак, профиль электронной концентрации с побочным максимумом может отвечать исходной интерферограмме. Предлагается следующая схема восстановления профиля электронной концентрации, основанная на методе итерации. Сначала рассчитывается распределение электронной концентрации в предположении, что интерференционные полосы в месте слияния не исчезают и не перепутываются, а сгущаются. Исходя из полученного распределения, определяется ход лучей через исследуемую среду (решается прямая задача) и предсказывается вид соответствующей интерференционной картины, которая сравнивается затем с экспериментально полученной. Первоначальное распределение электронной плотности изменяют таким образом, чтобы улучшить совпадение рассчитанной и экспериментально полученной интерференционных картин, и повторяют такую процедуру несколько раз до получения наилучшего согласия. Надежда на устойчивость такой процедуры основана на результатах вычислительного эксперимента, в котором показано, что изменения профиля электронной концентрации приводят к резким отличиям восстановленной интерферограммы от экспериментально полученной.

Авторы благодарны А.Х. Пергамент за обсуждение и В.П. Дегтяревой за помощь в проведении вычислительного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марченко Н.А., Пергамент А.Х. Препринт ИПМ АН СССР № 42, М., 1982; Гончаров С.Ф., Марченко Н.А., Яновский В.П. Препринт ИПМ АН СССР № 47, М., 1985.
2. Бондаренко Ю.А. и др. ЖЭТФ, 81, 170 (1981).
3. Nestor O.H., Olsen H.N. SIAM Rev., 2, 200 (1960).

Поступила в редакцию 13 марта 1987 г.