

64
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт 40

Г.Г. Долгов-Савельев, Э.П. Кругляков,
В.К. Малиновский, В.М. Федоров

Оптическая интерферометрия плазмы



✓
НОВОСИБИРСК 1966

Методы оптической интерферометрии находят все более широкое применение в различных областях науки и техники; аэродинамика, химия, метрология, биология, вот далеко не полный перечень областей, где эти методы давно и успешно используются.

В последнее время они начинают применяться в термоядерных исследованиях [1,2,3] для измерения электронной концентрации плазмы.

Возможность использования оптических интерферометров основана на хорошо известной зависимости диэлектрической проницаемости плазмы ϵ от электронной концентрации N_e .

$$\epsilon = 1 - \frac{N_e e^2 \lambda^2}{\pi m c^2} \quad (1)$$

где e , m - заряд и масса электрона

λ - длина волны зондирующего излучения.

Оптическая разность хода, вносимая плазмой, есть:

$$\begin{aligned} \delta m &= \frac{1}{\lambda} \int_0^L (\sqrt{\epsilon(x)} - 1) dx = \\ &= -4,46 \cdot 10^{-14} \lambda \int_0^L N_e(x) dx \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно из (2) метод позволяет определить полное число электронов (см. см^{-3}) в направлении распространения света, а при известном поперечном размере - среднюю электронную концентрацию.

Другой важный параметр, который может быть определен рассматриваемым методом - степень ионизации плазмы. Как известно, показатель преломления нейтрального газа вдали от резонансных линий практически не зависит от длины волны. Поэтому сдвиг интерференционных полос, обусловленный нейтральным газом, пропорционален $1/\lambda$. Оптическая разность хода, выраженная в числе длин волн, может быть представлена в виде:

$$\delta m = -A N_e \ell \lambda + B N_a \ell \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

(N_a — концентрация нейтральных атомов, $A, B > 0$, — константы). Как видно из (3), одновременная регистрация смещений интерференционных полос в двух длинах волн позволяет, в принципе, определить N_e и N_a , следовательно, степень ионизации плазмы. Подобная возможность может быть реализована, когда достоверно известен показатель преломления нейтрального газа $\frac{1}{4}$, $\frac{5}{1}$.

Описание интерферометров

На рис. I приведена принципиальная схема одного из оптических интерферометров с полем интерференции 150 мм, применяемого в Институте ядерной физики СО АН СССР. Для уменьшения поперечных размеров прибора было использовано поворотное зеркало 3. Разделение интерферирующих пучков осуществлялось с помощью пластины P . Интерференционные полосы локализованы на зеркалах 1, 2, расположенных в фокусах освещающего (O_2) и выходного (O_3) объективов. Изображение поля интерференции регистрируется в фокальной плоскости объектива O_4 .

При использовании немонахроматических источников света с шириной спектрального интервала $\delta\lambda$ в случае наличия стекла в одном из плеч интерферометра для получения достаточно контрастной картины интерференции должно быть выполнено условие:

$$\delta\lambda \ll \frac{\lambda^2}{2\delta\ell} \left| 1 - \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (4)$$

($\delta\ell$ — разность толщин стекла в обоих плечах). Другими словами это означает, что должны быть равны геометрические размеры плеч; стекла, находящиеся в плечах интерферометра, должны иметь одинаковый показатель преломления и дисперсию.

Обычно это достигается установкой в оба плеча интерферометра равного количества пластин, предварительно подогнанных попарно под одинаковую толщину. Функцию компенсатора может выполнить разделяющая пластина, если она установлена отражающим слоем так, как показано на рис. I, а. При этом должно быть выполнено условие:

$$d = 2\ell \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} \quad (5)$$

(d, ℓ — толщины разделяющей пластины и окон вакуумной камеры, n — показатель преломления стекла).

В этом случае возможно наблюдение интерференции в белом свете.

На рис. I, б, изображена оптическая схема интерферометра с полем зрения 250 мм. В связи с большой стоимостью каждого элемента интерферометра функции объективов O_2, O_3 (рис. I, а) совмещены в одном.

Если в случае схемы, изображенной на рис. I, а величина коэффициента отражения разделяющей пластины не очень существенна (она определяет только интенсивность полос), то при использовании одного объектива для получения хорошего контраста необходимо подобрать коэффициенты отражения и пропускания разделяющей пластины настолько возможно близкими.

Поскольку интерферометры должны работать в непосредственной близости от экспериментальных установок, важную роль играет защита их от вибраций. В связи с этим зеркала 1, 2 и разделяющая пластина P монтировались на массивном основании, сваренном из швеллеров, и полностью развязанном от экспериментальной камеры. Установкой станины на многослойные демпферы (резина, войлок, пенопласт) толщиной порядка 20 см удалось существенно понизить уровень вибраций.

Колебания станины особенно опасны при больших размерах поля интерференции ($d > 150$ мм). В этом случае наблюдаются местные искажения поверхности торцевых зеркал, возникающие вследствие упругих колебаний последних. Эти колебания устраняются при развязке зеркал от оправ с помощью резиновых прокладок.

В результате механических напряжений в пластинках (особенно в окнах вакуумного объема) интерференционные полосы оказываются искривленными даже при точном изготовлении поверхностей, что затрудняет регистрацию малых смещений полос. Интерференционное поле удалось скорректировать путем обработки по-

верхности одной из пластин с ошибкой обратного знака. После такой доводки кривизна полос по всему полю не превышала 0,1 (рис.2).

Источники света для оптических интерферометров

Наиболее удобными источниками света для целей интерферометрии плазмы являются оптические квантовые генераторы. Они могут быть использованы как для получения отдельных кадров с малыми экспозициями, так и в режиме хронографической развертки. Нами применялись лазеры на основе рубина и стекла с примесью неодима в режимах импульсной добротности и квазинепрерывной генерации.

Основные параметры использовавшихся квантовых генераторов приведены в табл. I.

Таблица I

Тип ОКГ	Длительность импульса генерации τ , сек.	Длина волны λ , мк.	Спектральная ширина $\delta\lambda$, Å.
Лазер с импульсной добротностью на рубине	$1,5 \cdot 10^{-8}$	0,6943	0,1
Лазер с импульсной добротностью на стекле с примесью неодима	$2,5+3 \cdot 10^{-8}$	1,06	20
Лазер с квазинепрерывной генерацией на рубине	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,6943	-

Конструкции квантовых генераторов были достаточно виброустойчивы и могли работать длительное время без дополнительной юстировки.

Для модуляции добротности лазеров использовались ячейки Керра ($\lambda/4$) на нитробензоле с дополнительной призмой из Исландского шпата. Введение последней позволяло в достаточно широких пределах менять генерируемую мощность.

Квазинепрерывная генерация достигалась помещением рубина в конфокальный резонатор.

Иногда использование оптических квантовых генераторов оказывается неэффективным. Так, например, при быстром нарастании электронной концентрации плазмы во времени (в пространстве) отклонение полос, полученных в монохроматическом свете, из исходного положения в смещенное полностью проследить не удается, и расшифровка интерферограмм оказывается подчас невозможной.

В подобных случаях задача может быть резко упрощена применением "белых" источников света, когда на интерференционном поле видна ахроматическая полоса. Вышеизложенное хорошо иллюстрируется интерферограммой ударной волны, представленной на рис.3. Хотя монотонное смещение полос на скачке проследить не удастся, абсолютная величина отклонения может быть легко определена. В подобных случаях нами использовались ксеноновые лампы типа ИФП-2000 для хронографических разверток и специально изготовленные "точечные" лампы на ксеноне под давлением для получения коротких вспышек ($\sim 0,1$ мксек).

В комбинации с интерференционными фильтрами, выделяющими два спектральных интервала с различными длинами волн, лампы использовались для определения степени ионизации плазмы аналогично тому, как это сделано в /5,6/.

Системы регистрации

Для определения изменения электронной концентрации (степени ионизации) плазмы во времени наиболее удобно использовать скоростной фоторегистратор (два синхронизированных фоторегистратора). В этом случае полосы располагаются перпендикулярно щели фоторегистратора. Для удобства отсчета смещений по-

дос поперек щели натянута тонкая реперная нить. При таком способе регистрации отклонение полос может быть измерено с точностью до 0,01 а временное разрешение достигает 0,1+1 мксек. Для получения интерферограмм с более высоким временным разрешением $\leq 10^{-8}$ сек применялись электронно-оптические преобразователи с разверткой изображения.

В экспериментах по исследованию ускорения плазмы в рельсотроне /7/, по изучению ударных волн в плазме и некоторых других регистрациях производилась в режиме одиночных кадров.

В том случае, когда в качестве источника света был использован рубиновый лазер с модуляцией добротности, регистрация производилась непосредственно на фотопленку.

При использовании лазера на стекле с примесью неодима в режиме гигантского импульса для визуализации поля интерференции применялся ЭОП с кислородно-цезиевым фотокатодом.

В режиме регистрации одиночных кадров точность определения смещений полос $\sim 0,1$, однако, применяя специальные методы обработки интерферограмм, можно увеличить точность в несколько раз.

Перспективы метода оптической интерферометрии

В классической схеме метода (интерферометр Маха-Цендера, $\lambda \approx 5000 \text{ \AA}$) минимально обнаружимая электронная концентрация достигает примерно $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при размере плазменного объекта $l = 10 \text{ см}^+$). Применение интерферометра Майкельсона повышает чувствительность вдвое.

Как следует из (2) точность метода растет с увеличением длины волны. Использование неодимого лазера в схеме интерферометра Майкельсона позволяет определять $N_{e \text{ min}} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при вышепринятых размерах плазмы и точности регистрации смещений полос.

Другим путем увеличения точности является применение комбинированных интерферометров.

+) при точности регистрации смещений $\delta m = 0,01$.

Нами была испытана схема, состоящая из интерферометров Майкельсона и Фабри-Перо (рис.6).

Используя данную схему, удалось осуществить шестикратное прохождение света сквозь плечо с плазмой. В принципе таким путем чувствительность метода может быть увеличена в 10-20 раз, однако, комбинированный интерферометр из-за вибраций, по-видимому, не сможет работать без специального фундамента.

Достаточно хорошие результаты могут быть получены в схеме трехзеркального интерферометра на основе He-Ne лазера /8/ с использованием интерферометра Фабри-Перо /9/ и в гетеродинной схеме на He-Ne лазерах /9/, /10/. Однако, последняя группа методов не позволяет получить визуализацию поля интерференции и не обладает достаточно высоким пространственным разрешением.

Подписи к рисункам

- Рис. 1. Схемы интерферометров с полем зрения 150 мм (а) и 250 мм (б).
- Рис. 2 Вид поля интерференции после коррекции пластин.
- Рис. 3 Интерферограмма ударной волны.
- Рис. 4 Схема комбинированного интерферометра. 1, 2 зеркала интерферометра Фабри-Перо, 3, 4 - торцевые зеркала интерферометра Майкельсона. Интерференционные полосы наблюдаются, когда расстояние, на которое перенесено торцевое зеркало (4-4) кратно удвоенной толщине интерферометра Фабри-Перо.

Л и т е р а т у р а

- /1/ R. D. Medford, A. L. T. Powell, A. G. Hunt and J. K. White. Proc. Fifth Int. Conf. on Ionization Phenomena in Gases, Munich, 1961.
- /2/ Los Alamos Sci. Lab. Semiannual status report, May, 1964.
- /3/ E. Fünfer, K. Hain, H. Herold, P. Jørgensen and F. P. Küpper. Naturforsch., 17a, 967 (1962)
F. P. Küpper. Naturforsch., 18a, 895 (1963)
- /4/ U. Ascoli - Bartoli, A. De Angelis and Martellucci. Nuovo Cim., 18, 1116 (1960)
- /5/ R. A. Alpher and D. R. White. Phys. Fluids 1, n 5, 452 (1958) and Phys. Fl. 2, n 2, 162 (1959)
- /6/ Э. П. Кругляков, В. К. Малиновский, В. Е. Нестерихин. Магнитная гидродинамика, I, № 2 (1965).
- /7/ Э. П. Кругляков, В. К. Малиновский, В. М. Федоров. Доклад на УП Международной конференции по явлениям в ионизованных газах. Белград, 1965.
- /8/ D. E. T. F. Ashby and D. F. Jephcott. Appl. Phys. Lett., 3, 13 (1963)
- /9/ В. Коробкин - Сб. "Диагностика плазмы", 36, М. 1963.
- /10/ W. B. Johnson, A. B. Larsen, J. P. Sosnowski. Seventh Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Beograd, 1965.

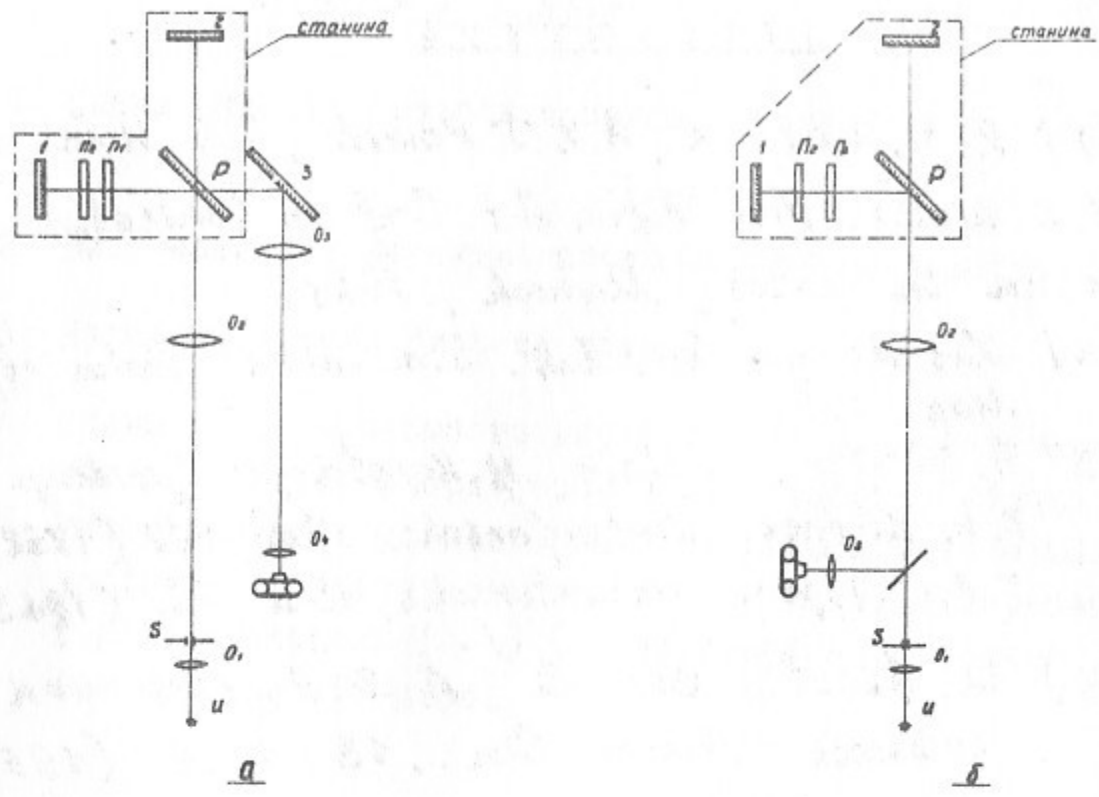


Рис. 1

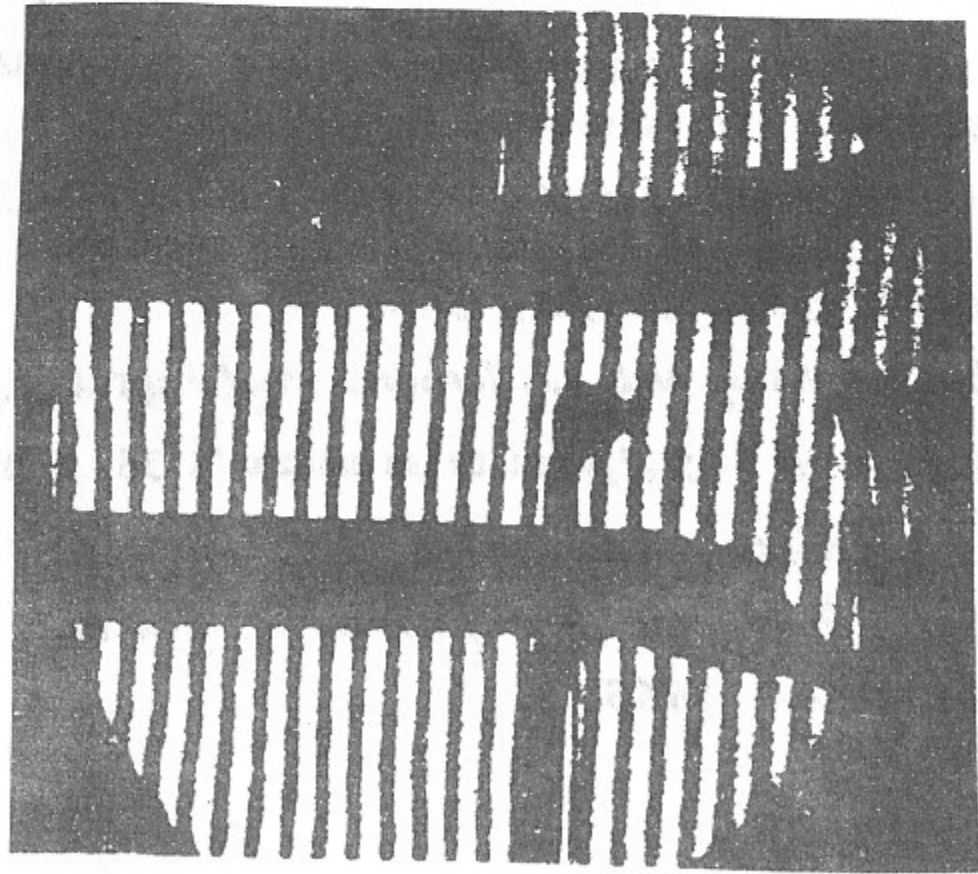


Рис. 2

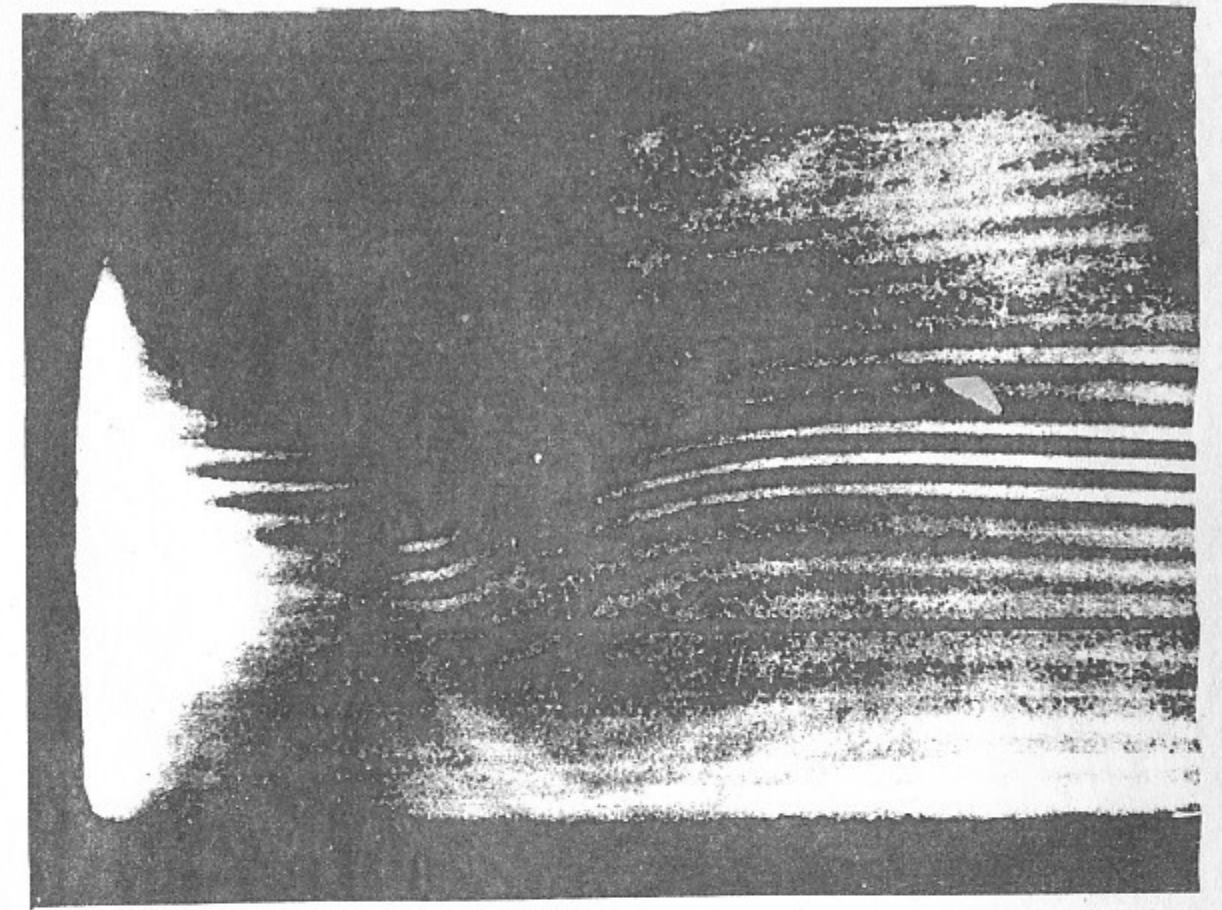


Рис. 3

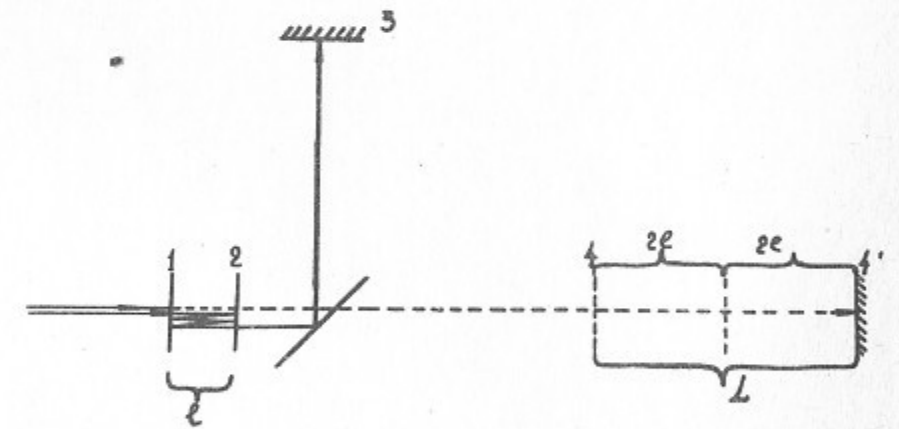


Рис. 4

Ответственный за выпуск В.К.Малиновский

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР
Тираж 200 экз. , Бесплатно 10.05.66г.