

СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ—ПЕРО  
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

А. Н. Колеров, Г. Д. Петров и В. М. Виравян

Приводится описание субмиллиметрового интерферометра Фабри—Перо, используемого в качестве источника лазер на парах HCN с  $\lambda = 337$  мкм. Определены основные характеристики прибора, проведены экспериментальные исследования параметров плазмы. Полученные значения концентрации электронов находятся в согласии с результатами, полученными трехзеркальным субмиллиметровым лазерным интерферометром.

В опубликованных в последние годы работах [1-6] описаны методы и аппаратура для диагностики плазмы в субмиллиметровом (СБМ) диапазоне длин волн. Там же показано, что наиболее эффективным является использование СБМ диапазона длин волн для диагностики плазмы с электронной концентрацией  $N_e$  порядка  $10^{12} \div 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Наиболее чувствительная схема в этом диапазоне была реализована при использовании трехзеркального лазерного интерферометра (ТЛИ) с интегральной чувствительностью  $\delta(N_e L)$  порядка  $10^{13}$  см<sup>-2</sup> [2-3] (здесь  $L$  — длина пути проходящего излучением в плазме). Но такие схемы обладают сравнительно небольшим быстродействием (порядка  $10^{-5} \div 10^{-6}$  с.) [7], что затрудняет их использование при исследовании быстротекающих плазменных процессов.

Двухлучевые интерферометры, например типа Маха—Цандера [4] или Майкельсона [1], обладают значительно лучшим временным разрешением  $\tau$ , но их чувствительность мала — не лучше  $4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>.

Промежуточными свойствами обладает, видимо, интерферометр типа Фабри—Перо (ИФП), но в настоящее время отсутствуют сообщения о диагностике плазмы в субмиллиметровом диапазоне длин волн таким прибором, хотя в оптическом [8] и СВЧ [9] диапазонах измерения с помощью ИФП проводятся давно.

Если зеркала параллельны и измерения проводятся в первом порядке интерференции, то параметры ИФП определяются следующими соотношениями [8, 11, 12]:

$$\tau = \frac{2\pi l \sqrt{R}}{c(1-R)}, \quad (1)$$

$$\delta(N_e L) = \frac{6.7 \cdot 10^{11} (1-R)}{2\lambda \sqrt{R}}, \quad (2)$$

$$W = \frac{1-R}{\pi \sqrt{R} \lambda}. \quad (3)$$

Здесь  $W$  — пространственное разрешение ИФП,  $l$  — расстояние между зеркалами,  $R$  — коэффициент отражения зеркал ИФП (предполагается, что коэффициенты отражения зеркал одинаковы),  $\lambda$  — длина волны зондирующего излучения,  $c$  — скорость света. Выражения (1)–(3) выведены для ИФП оптического диапазона длин волн, при этом на качество зеркал налагались определенные условия [12]. При переходе в СБМ диапазон можно изготовить зеркала значительно более высокого качества, что приводит к уменьшению численного коэффициента в правой части выражения (2) и возможности использования более высоких значений  $R$ . Обычно при диагностике

плазмы к измерительным приборам на основе ИФП предъявляются требования достижения максимальной чувствительности при возможно более высоком временном и пространственном разрешении. Легко видеть, что эти требования противоречивы. Из (1)–(3) находим

$$\tau \delta (N_e L) = 6.7 \cdot 10^{11} \pi \frac{l}{\lambda c}, \quad (4)$$

$$\frac{\delta (N_e L)}{W} = 3.35 \cdot 10^{11} \pi \sqrt{\frac{l}{\lambda}}, \quad (5)$$

$$W \tau = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{l}{\lambda}}. \quad (6)$$

Выражения (4)–(6) указывают на независимость основных параметров ИФП от характеристик зеркал и определяют его предельные возможности.

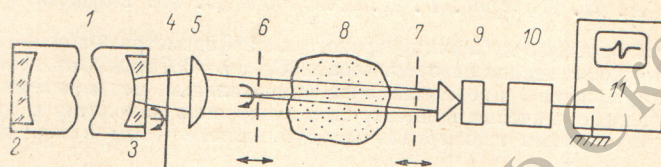


Рис. 1. Принципиальная схема субмиллиметрового интерферометра Фабри–Перо.

Необходимость минимизации значений  $\tau$  и  $\delta (N_e L)$  делает разумным переход к увеличению длины волны зондирующего излучения, но приводит к ухудшению пространственного разрешения  $W$ .

Соотношения между этими величинами должны подбираться в зависимости от конкретной задачи изменением параметра  $R$  (см. уравнения (1)–(3)).

Целью настоящей работы была отработка методики исследования плазмы в субмиллиметровом диапазоне с помощью ИФП, а также экспериментальная проверка его основных характеристик.

Схема реализованного нами субмиллиметрового ИФП приведена на рис. 1. Здесь 1 — непрерывный прокачной лазер с длиной волны генерируемого излучения  $\lambda = 337$  мкм и расходимостью пучка  $3^\circ$ , 2 — глухое и 3 — проходное зеркала лазера, 4 — механический модулятор, 5 — собирающая линза из фторпласта, 6 и 7 — одномерные проволочные сетки с шагом  $40$ – $60$  мкм, образующие интерферометр Фабри–Перо, 8 — исследуемый плазменный объект (дуга низкого давления в магнитном поле [10]), 9 — детектор, 10 — усилитель, 11 — запоминающий осциллограф.

Вращение одной из сеток вокруг оптической оси системы позволило варьировать коэффициент отражения зеркал, что привело к изменению добротности интерферометра [8, 11]. Форма интерференционного контура зависела и от угла между осью системы и плоскостью сеток. Типичные интерферограммы, полученные сканированием сеткой 7 при различных углах между направлением структур, приведены на рис. 2. Плоскости сеток при этом были параллельны друг другу, и измерения проводились по полосам равного наклона. Сдвиг интерференционной картины при введении исследуемой плазмы определялся с помощью предварительно записанного интерференционного контура рис. 2 по изменению сигнала, снимаемого с детектора 9. При этом для уменьшения погрешности существенно, чтобы начальное и конечное положение рабочей точки приходилось на область, где интерференционный контур обладает максимальной кругизной. Многообразие и простота получения различных форм интерференционных контуров позволяют выбрать наиболее подходящие положения рабочих точек для широкого класса плазменных объектов. Обработка интерферограмм с учетом затухания в плазме (затухание приводит к снижению добротности интерферометра) проводилась по методике, изложенной в [9].

Измерение концентрации электронов на том же объекте — аргонной дуге низкого давления в продольном магнитном поле — проводилось одновременно субмиллиметровым ТЛИ [2, 3]. Результаты измерений представлены на рис. 3. Случайные погрешности при измерениях не пре-

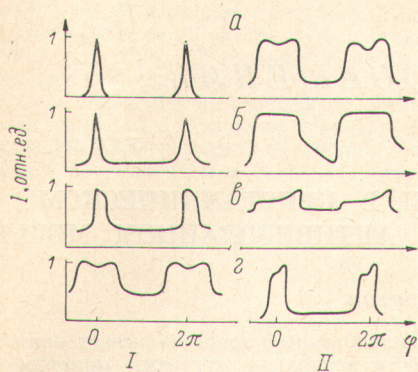


Рис. 2. Типичные контуры интерференционных полос в зависимости от угла поворота  $\Theta$  «зеркала» 7:

$a - \Theta = 0^\circ$ ,  $б - \Theta = 30^\circ$ ,  $в - \Theta = 60^\circ$ ,  $г - \Theta = 90^\circ$ ;  $I$  — плоскости сеток перпендикулярны оси системы,  $II$  — плоскости сеток наклонены под углом к оси системы.

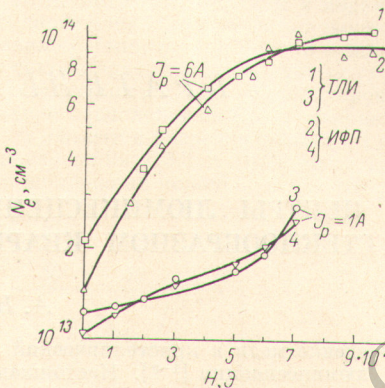


Рис. 3. Средняя концентрация электронов в плазме дуги низкого давления в зависимости от напряженности магнитного поля.

Давление в разрядной камере  $P = 1.5$  мм рт. ст. 1, 2 — ток разряда  $I_p = 6$  А; 3, 4 — ток разряда  $I_p = 1$  А. Значения  $N_e$ , измеренные ТЛИ — кривые 1, 3; измеренные ИФП — 2, 4.

вышали  $15 \div 20\%$ . Удовлетворительное совпадение измеренных значений электронной плотности свидетельствует об отсутствии значительных систематических погрешностей.

Несколько меньшие значения концентрации электронов, полученные ИФП, по-видимому, объясняются его худшим пространственным разрешением по сравнению с ТЛИ. Экспериментальная оценка показала, что пространственное разрешение не превышало  $6 \div 7$  мм. Чувствительность прибора определялась из измерений — она составила  $(2 \div 4) \cdot 10^{-2}$  интерференционной полосы, т. е.  $\delta(N_e L) \approx (7 \div 14) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , что несколько хуже теоретического значения. Временное разрешение такого прибора оценивалось по формуле (1) и составило величину  $6 \cdot 10^{-8}$  с. К недостаткам интерферометра следует отнести несколько повышенную чувствительность к виброакустическим шумам.

#### Литература

- [1] Г. Д. Петров, А. И. Петряков, П. А. Самарский. Теплофиз. высок. темпер., № 1, 181, 1972.
- [2] А. Н. Колеров, Г. Д. Петров. Теплофиз. высок. темпер., № 5, 1107, 1973.
- [3] А. Н. Колеров, Г. Д. Петров. Радиотехн. и электр., № 6, 1282, 1974.
- [4] А. Н. Колеров, Г. Д. Петров. Опт. и спектр., 37, 604, 1974.
- [5] Н. Н. Малых. Теплофиз. высок. темпер., № 3, 492, 1974.
- [6] P. W. Peterson, F. C. Johoda. Appl. Phys. Lett., 18, 440, 1972.
- [7] W. B. Johnson. IEEEAP, AP-15, № 1, 1967.
- [8] И. В. Скоков. Многолучевые интерферометры. Изд. «Машиностроение», М., 1969.
- [9] М. Хилд, С. Уортон. Микроволновая диагностика плазмы. Атомиздат, М., 1968.
- [10] В. Е. Голант, В. Е. Кривошеев, М. В. Привалов. ЖТФ, 34, 935, 1964.
- [11] М. Н. Бурдонский, М. И. Пергамент, А. И. Ярославский. Сб. «Диагностика плазмы», вып. 3. Атомиздат, 1973.
- [12] Г. Г. Долгов-Савельев. Сб. «Диагностика плазмы», вып. 2. Атомиздат, М., 1968.

Поступило в Редакцию 3 февраля 1975 г.