

21

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР**

ПРЕПРИНТ И Я Ф 77 - 29

В.С.Бурмасов, Э.П.Кругляков, А.А.Подыминогин

**ИНТЕРФЕРОМЕТР МАЙКЕЛЬСОНА С СО₂-
ЛАЗЕРОМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ**

Новосибирск

1977

ИНТЕРФЕРОМЕТР МАЙКЕЛЬСОНА С CO_2 - ЛАЗЕРОМ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

В.С.Бурмасов, Э.П.Кругляков, А.А.Подыминотин

А Н Н О Т А Ц И Я

Описан интерферометр Майкельсона с CO_2 - лазером в качестве источника для измерения плотности плазмы. Временное разрешение интерферометра $\sim 0,5$ нсек. Интерферометр обладает высокой чувствительностью $\text{Ne} \ell \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Из существующих методов определения электронной концентрации плазмы интерферометрический обладает рядом преимуществ таких, например, как бесконтактность, надёжность в интерпретации, оперативность. С появлением инфракрасных лазеров интерферометрические методы измерения становятся доминирующими в исследованиях по физике плазмы и УТС, так как с увеличением длины волны повышается их чувствительность. Наиболее подходящим источником излучения для $Ne \ell = 10^{13} + 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при измерении в пределе одной полосы является CO_2 - лазер с длиной волны генерации 10,6 мкм.

Необходимое временное разрешение ($\tau \ll 0,5$ мксек), а также простота конструкции, что немаловажно при создании большого количества "интерферометрических зондов" (~ 10 шт) для исследования поведения плазмы в длинных ловушках с продольным градиентом плотности [1], накладывает ограничения на выбор схемы интерферометра. Описываемые в литературе интерферометры низкочувствительны и часто сложны. Временное разрешение конструктивно простой схемы лазер-интерферометр ограничено наличием принципиальной обратной связи и составляет ~ 1 мксек [2].

В настоящей работе описана схема интерферометра Майкельсона с CO_2 - лазером в качестве источника. Возникающая обратная связь в такой схеме не является принципиальной и легко устраняется юстировкой.

Зависимость показателя преломления плазмы (N) от плотности электронов (Ne) хорошо известна

$$N = 1 - 4,46 \times 10^{-14} Ne \lambda^2, \quad (1)$$

где λ длина волны зондирующего излучения в см. В случае неполностью ионизированного газа, вклад нейтралов в показатель преломления для $\lambda = 10,6$ мкм пренебрежимо мал. Например, для водородной плазмы показатель преломления пренебрежимо мал уже для 0,1% степени ионизации.

Из (1) легко получить сдвиг фазы, обусловленный плазмой ($\lambda = 10,6$ мкм).

$$\varphi \text{ (град)} = 1,7 \times 10^{-14} \int_0^{\ell} n_e dl \quad (2)$$

где ℓ - расстояние, проходимое излучением в плазме. Изменение интенсивности интерферирующих лучей одинаковой амплитуды в зависимости от фазы подчиняется закону (см. рис. 1а)

$$J = J_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \quad (3)$$

где $J_0 = 4J_{1,2}$, а $J_{1,2}$ - интенсивность одного из лучей. Из (3) видно, что максимальная чувствительность интерферометра реализуется при $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} \pm K\pi$ ($K = 0, 1, 2, \dots$), ($d^2\varphi/d\varphi^2 = 0$).

На рис. 1в показана зависимость привращения сигнала δJ от разности фаз $\Delta\varphi$, при начальной фазе $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} \pm K\pi$. Видно, что в интервале изменения от $\varphi = 0,3\pi \pm K\pi$ до $\varphi = 0,7\pi \pm K\pi$ можно пользоваться с хорошей степенью точности (10%) линейной зависимостью

$$\Delta\varphi = \frac{\delta J}{2J_{1,2}}$$

Отсюда, учитывая (2) и обозначив среднюю плотность через \bar{n}_e , получаем простое соотношение

$$\bar{n}_e = 6,7 \cdot 10^{15} \delta J / J_0 \ell \quad (4)$$

Для интерферометра Майкельсона расстояние, проходимое излучением в плазме, удваивается и

$$\bar{n}_e = 3,4 \cdot 10^{15} \delta J / J_0 \ell \quad (4')$$

Область линейности можно расширить, выбрав в качестве φ_0 точку В или В' (см. рис. 1а). При этом необходимо изменить угловой коэффициент в (4').

На рис. 1, с показана зависимость привращения сигнала от фазы при $\varphi_0 = 0,2\pi \pm K\pi$. Из графика видно, что от φ_0 до $\varphi = 0,8\pi \pm K\pi$ нелинейность не превышает 10%. При измерениях за пределами линейной области надо пользоваться следующей формулой

$$\bar{n}_e \ell = 3,4 \cdot 10^{15} \left(\arccos \cos \sqrt{\frac{J(\varphi_0) - \delta J}{J_0}} - \varphi_0 \right)$$

Здесь везде δJ - абсолютная величина привращения интенсивности, обусловленная плазмой, а φ_0 - начальная фаза измерения.

Схема интерферометра показана на рис. 2. Источником излучения служит CO_2 - лазер (1) низкого давления ($P_2 = 7+10 \text{ Тор}$). Резонатор лазера полуконфокальный, длиной 1 метр. Сферическое зеркало ($R = 2 \text{ м}$) изготовлено из стали. В качестве второго зеркала используется плоскопараллельная германиевая пластинка, толщиной $\sim 3 \text{ мм}$. Непараллельность пластинки $\sim 2''$. Расстояние между зеркалами фиксируется четырьмя инваровыми стержнями.

На оси резонатора расположена разрядная трубка. Длина трубки - 90 см. Диаметр разрядного канала - 1,5 см. Электродами служат коваровые цилиндры, разнесенные на 75 см. Трубка охлаждается проточной водой ($\sim 1 \text{ л/мин}$). Окна разрядной трубки, изготовленные из BaF_2 , приклеены на концах под углом Брюстера (57°). Толщина каждого из окон - 2,5 мм.

Газовая смесь $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ (1:1:2) прокачивалась через разрядную трубку со скоростью $\sim 0,3 \text{ л/сек}$ ($P_2 \sim 7 \text{ Тор}$). Мощность генерации лазера при указанных параметрах и разрядном токе 15+20 мА составляла несколько Ватт без селекции мод.

Для выделения одной поперечной моды с целью улучшения контрастности интерференции в резонатор вмонтирована диафрагма. Диаметр диафрагмы равен диаметру первой зоны Френеля ($\approx 6 \text{ мм}$). Генерация с одной продольной модой обеспечивается тем, что межмодовый интервал $\frac{c}{2L}$ (c - скорость света, L - длина резонатора) не меньше ширины рабочего перехода лазера.

Температурные изменения длины резонатора приводят к тому, что генерация осуществляется на различных вращательных переходах в пределе 00⁰1-10 0 колебательного перехода CO_2 - молекулы. ($\lambda \approx 10,6 \text{ мкм}$). За час до измерений лазер включается на прогрев. Это обеспечивает устойчивую генерацию на одном переходе в среднем в течение одного часа.

Излучение CO_2 - лазера через отверстие в станине направлялось на светоделительную пластину (2). Станина интерферо-

метра (7) собрана из двух частей: одна в виде угла с поперечным размером $15 \times 15 \text{ см}^2$, другая в виде бруска того же сечения.

Светоделительная пластина толщиной 5 мм изготовлена из BaF_2 . Для устранения паразитной интерференции, возникающей на второй поверхности, пластина изготовлена в виде клина (2°). Рабочая поверхность светоделительной пластины напылена германием.

На пути опорного луча расположен оптический клин (6) (67) из BaF_2 . Клин юстируется так, чтобы при перемещении его поперек опорного луча не возникало смещения последнего (высота клина перпендикулярна лучу). Перемещение клина связано с поворотом микровинта. Дистанционным вращением микровинта устанавливается необходимая начальная разность фаз (φ_0), а также определяется J_0 .

Окна плазменной камеры (3), изготовленные из BaF_2 , образуют небольшой угол ($\sim 1^\circ$) с плоскостью, перпендикулярной измерительному лучу. Зеркала интерферометра (4) плоские, металлические. Качество оптических деталей интерферометра не хуже качества оптических деталей CO_2 - лазера.

Предварительно интерферометр юстируется с помощью He-Ne лазера ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$). Особое внимание при юстировке уделялось устранению обратной связи - интерферометр-лазер. Окончательная юстировка производилась по сигналу с детектора (5). Детектором служит фотосопротивление на основе Ge: Au , охлаждаемое жидким азотом. Площадь кристалла фотосопротивления равна $2 \times 2 \text{ мм}^2$, чувствительность детектора $\sim 1 \text{ в/Ватт}$ для $\lambda = 10 \text{ мкм}$ при $\tau \gg 0,5 \text{ мсек}$.

На рис.3 показаны типичные осциллограммы измерения плотности плазмы, полученные в ходе экспериментов на установке с гофрированной магнитной ловушкой (ГОЛ-1). Здесь же показан график распределения плотности плазмы по радиусу камеры (рис.3.с), полученный из зондовых измерений. Видно, что распределение плотности достаточно однородно и можно считать $\bar{n}_e = n_e$ в (4'), выбрав соответствующее l .

Осциллограмма 3а получена при ионизации импульсно созданного водородного облака ($n_{\text{H}_2} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$) электронным пучком ($U = 15 \text{ кв.}$, $J = 50 \text{ А}$). Видно, что минимально обнаружимая амплитуда, обусловленная флуктуациями сигнала, меньше 1 мв. Это определяет чувствительность интерферометра при $J_0 = 3$ в как $n_e l \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$. (см.4'). Заметим, что флуктуации амплитуды сигнала на много больше шумов детектора и обусловлены вибрационными помехами. Это позволяет надеяться на большую чувствительность интерферометра. В настоящее время не проводились исследования по определению максимальной чувствительности.

На рис.3в показана осциллограмма поведения концентрации плазмы до и после взаимодействия релятивистского электронного пучка (0,8 МэВ, 30 кА, 50 нсек) с плазмой. Из всех проводимых измерений это самый быстрый переходной процесс ($\tau_{\text{ф}} \sim 2 \text{ мсек}$), и поэтому временное разрешение схемы детектора, которое в конечном счете определяет временное разрешение интерферометра, было занижено с $\tau = 30 \text{ нсек}$ до $\tau = 0,5 \text{ мсек}$, с целью увеличения чувствительности. При работе с релятивистским электронным пучком детектор экранировался свинцовой защитой.

Эксперименты показали, что интерферометр не чувствителен к вибрациям, возникающим при включении импульсного магнитного поля ($H = 15 \text{ кЭ}$, $V = 200 \text{ л}$), а также при генерации релятивистского пучка, по крайней мере, в интервале времени измерения ($\sim 0,5 \text{ мсек}$).

Для исследования динамики плазмы в многопробочной магнитной ловушке изготовлено восемь интерферометров. На трёх из них, к настоящему времени, проводятся измерения.

В заключение перечислим основные результаты работы. Создан простой, высокочувствительный $(n_e l)_{\text{min}} \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$ / интерферометр. Динамический диапазон интерферометра от $n_e l \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$ до $n_e l \leq 2,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при измерении в линейной области. Верхний предел измерения определяет, по-видимому, времена переходных процессов в плаз-

ме и временное разрешение детектора, а не отсечка излучения ($n_e = 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Интерферометр обладает хорошим пространственным ($3 \times 4 \text{ мм}$) и временным разрешением. Показано, что применение классической схемы интерферометра с лазерным источником позволяет получить чувствительность не намного худшую, чем в самых чувствительных и трудоемких схемах в такой, например, как схема гетеродина ($n_e \approx 0,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) [3].

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, В.В.Данилов, В.А.Корнилов, Э.П.Кругляков, В.Н.Лукьянов, В.В.Мирнов, Д.Д.Рятов. Труды У Международной конференции по физике плазмы и УТС. NIAEA - CM - 33/H8-3 Токио, 1974.
2. H. Nevold, F.C. Jahoda. Rev. Sci. Instrum, v.40, p.145, 1965.
3. O.S. Zucker. J. Appl. Phys. v. 42, p. 306, 1971.

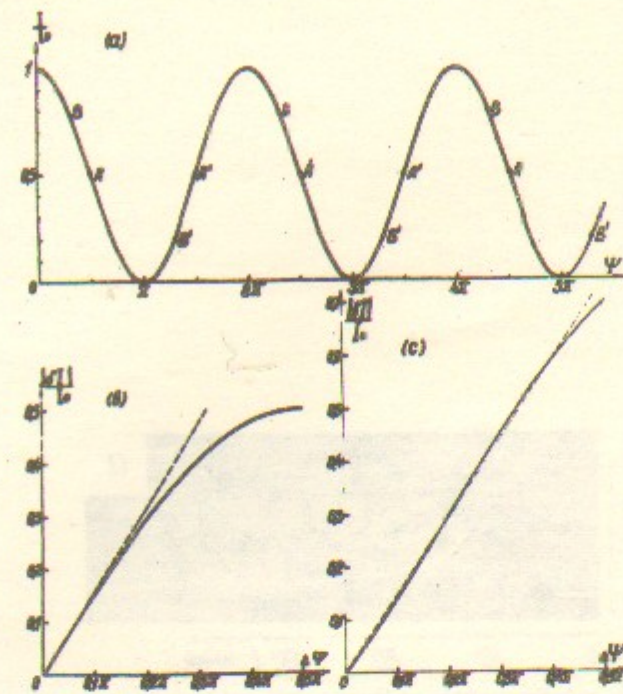


Рис.1. Зависимость интенсивности интерференционного сигнала от разности фаз, в относительных единицах.
 а) общий вид;
 в) $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} \pm \kappa\pi$, пунктирная прямая - линейное приближение;
 с) $\varphi_0 = 0,3\pi \pm \kappa\pi$, пунктирная прямая - линейное приближение.

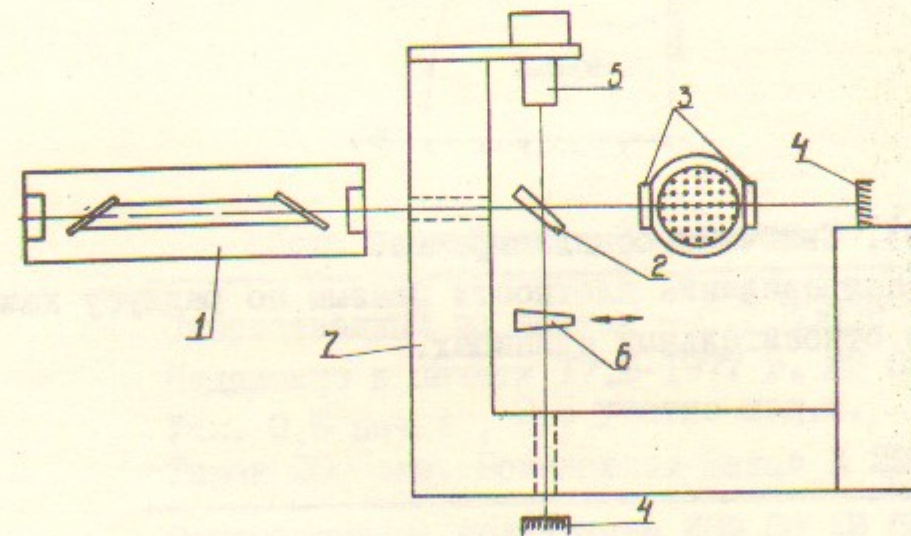


Рис.2. Схема интерферометра.

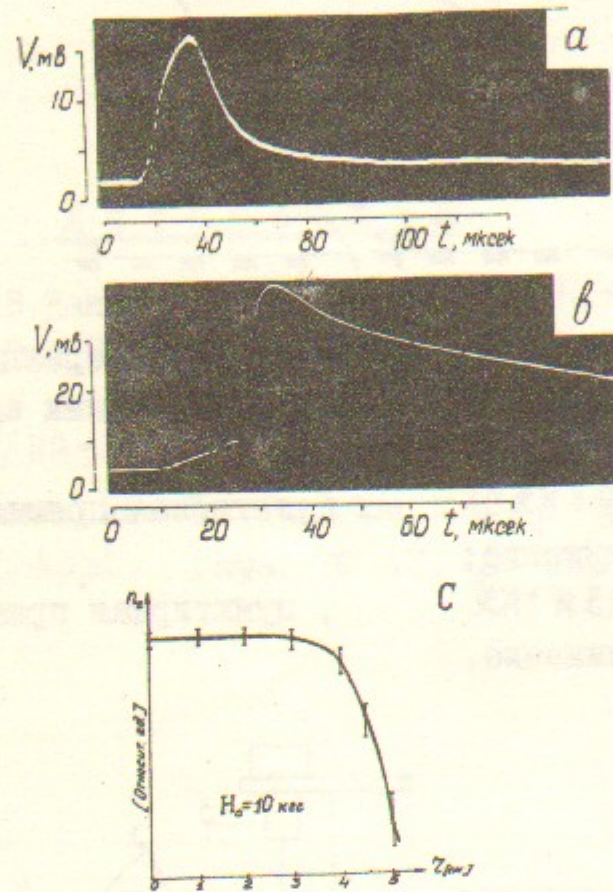


Рис.3. (а,в). Типичные осциллограммы.
 с) распределение плотности плазмы по радиусу камеры
 в относительных единицах.

Работа поступила - 3 февраля 1977 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
 Подписано к печати 17.И-1977 г. МН 02692
 Усл. 0,6 печ.л., 0,5 учетно-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно: Заказ № 29.

Отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО АН СССР