

# Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

L. A. Dushin, V. I. Privezentsev, Expansion of the measurement limits of the concentration of electrons in a plasma using a laser interferometer with phase modulation of the optical signal, *TVT*, 1970, Volume 8, Issue 1, 159–162

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use  
<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.83

January 23, 2025, 03:57:58



УДК 533.9.082.5.

## РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА С МОДУЛЯЦИЕЙ ФАЗЫ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

*Л. А. Душин, В. И. Привезенцев*

Приведена схема оптического лазерного интерферометра, позволяющая измерять  $n_e L$  плазмы в пределах от  $10^{14}$  до  $10^{17}$   $см^{-2}$ .

При исследовании плазмы большое значение имеет определение концентрации электронов в плазме и изменение ее во времени. В настоящее время имеется достаточно большое число методов, позволяющих с той или иной точностью определять концентрацию электронов в плазме. Наиболее распространены методы микроволновой интерферометрии плазмы, которые наряду со всеми своими положительными сторонами имеют один существенный недостаток — сравнительно небольшой интервал измеряемых значений концентрации электронов. Максимальная концентрация электронов, измеряемая указанными методами, ограничена частотой микроволнового генератора, при которой наступает «отсечка» микроволнового сигнала ( $n_e^{крит} = 3 \cdot 10^{-10} \omega^2$   $см^{-3}$ ). Следовательно, генераторы миллиметрового диапазона не позволяют измерять концентрации электронов, превышающие  $10^{15}$   $см^{-3}$ . Минимальная концентрация определяется точностью отсчета фазы, которая в микроволновом диапазоне не превышает  $\pi / 10$ .

В последнее время для интерферометрии плазмы стали применять оптические квантовые генераторы — лазеры. Лазеры как источники электромагнитного излучения выгодно отличаются от других генераторов когерентностью, монохроматичностью и малой расходимостью излучения. Критическая концентрация электронов для оптического излучения на несколько порядков выше, чем для микроволнового (для лазера с  $\lambda = 0,63$   $мк$ ,  $n_e^{крит} = 10^{21}$   $см^{-3}$ ), что означает возможность применения лазерных методов на любых имеющихся экспериментальных источниках плазмы. Но и в этом случае возникают серьезные трудности, когда необходимо определить концентрацию электронов, для которой фазовый сдвиг сигнала, прошедшего через плазму, значительно меньше  $2\pi$ .

Существует несколько методов для измерения малых фазовых сдвигов — по расстройке резонатора [1], при помощи переноса фазовой информации в радиодиапазон [2], гетеродинирования [3] и др. Однако все они по той или иной причине сложны и требуют высокой стабильности по частоте, что в настоящее время обеспечить довольно трудно.

В данной работе описан метод, позволяющий в принципе измерять фазовые сдвиги порядка сотых долей градуса и не требующий высокой стабильности по частоте. В оптической интерферометрии плазмы для случаев, когда фазовый сдвиг соответствует нескольким периодам ( $n\pi$ ) и быстро меняется во времени, применяют обычный двухлучевой интерферометр. Концентрация электронов определяется по числу интерференционных мак-

симвумов на осциллограмме

$$n_e L = (\lambda n_e^{\text{крит}} / \pi) \Delta\varphi. \quad (1)$$

Здесь  $L$  — длина пути сигнала в плазме,  $\Delta\varphi$  — сдвиг фазы сигнала при прохождении через плазму в радианах,  $\lambda$  — длина волны оптического сигнала. В более удобном виде выражение (1) имеет вид

$$n_e L = 6,24 \cdot 10^{10} (\Delta\varphi^\circ / \lambda) \quad (2)$$

(здесь  $\Delta\varphi$  измеряется в градусах).

В тех случаях, когда значение концентрации электронов мало и фазовый сдвиг становится меньше  $\pi$ , на осциллограмме получится один интерференционный максимум, соответствующий неполному периоду интерференционной картины. Определить величину этого фазового сдвига по осциллограмме без дополнительных измерений невозможно. В таких случаях необходимо иметь интерференционную картину с большим полем зрения и по искривлению интерференционных полос судить о величине фазового сдвига. Это создает дополнительные трудности при использовании такого метода. Точность определения фазового сдвига в лучшем случае может быть  $\sim 20^\circ$ .

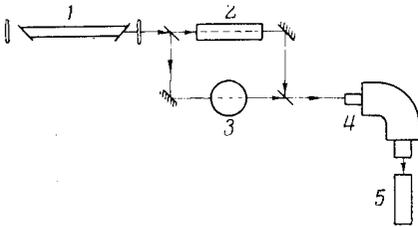


Рис. 1. Блок-схема интерферометра:

1 — лазер, 2 — оптический фазовый модулятор, 3 — плазменный объем, 4 — спектрограф, 5 — фотоприемник

Метод, описанный в данной работе, по мнению авторов, более прост и более точен. Для иллюстрации принципа действия интерферометра на рис. 1 приведена его блок-схема. В основу схемы положен интерферометр Рождественского с добавлением в опорное плечо фазового модулятора, который осуществляет непрерывную фазовую калибровку интерферометра. Модулятор [4] представляет собой систему электрооптических кристаллов, показатель преломления которых — функция приложенного к кристаллам напряжения. Фаза луча, прошедшего через модулятор, определяется составляющей показателя преломления в направлении распространения и также является функцией приложенного напряжения

$$\Phi' = \pi (U_m / U_{\lambda/2}), \quad (3)$$

где  $U_m$  — напряжение на модуляторе,  $U_{\lambda/2}$  — напряжение, необходимое для поворота плоскости поляризации на  $90^\circ$ .

Если интенсивности лучей в плечах интерферометра равны, то характеристика при фазовой модуляции одного из лучей будет иметь вид, показанный на рис. 2, а. Выбрав рабочую точку на середине линейного участка характеристики и подавая на модулятор синусоидальное напряжение (рис. 2, б), на выходе интерферометра можно получить сигнал с фазовой модуляцией, глубина которой ( $\Phi'$ ) определяется  $U_m$  (рис. 2, в).

Если световой луч в измерительном плече проходит через исследуемую среду (например, плазму), то в зависимости от коэффициента преломления среды луч получит добавочный фазовый сдвиг, что будет соответствовать смещению рабочей точки на характеристике интерферометра. Смещение рабочей точки приводит к смещению вверх или вниз синусоидального сигнала, снимаемого с фотоприемника. При условии, что это смещение не выходит за пределы линейного участка характеристики, величина его пропорциональна амплитуде калибровочного сигнала. Таким образом, измерение смещения и сравнение его с амплитудой калибровочного сигнала дает нам значение фазового сдвига луча, прошедшего через исследуемую среду. Основное ограничение на применение данного метода накладывает ширина линейного участка характеристики. Поэтому данным методом можно из-

мерять фазовые сдвиги, не превышающие  $\pi/2$ , что соответствует максимальному значению  $(n_e L)_{\max} = 6 \cdot 10^{12} / \lambda \text{ см}^{-2}$ . Минимальный фазовый сдвиг определяется шириной луча  $a$  и амплитудой калибровочного сигнала  $A$  на экране осциллографа, т. е.  $\Delta\varphi_{\min} = a\Phi'/A$ . При  $\Phi' = 5^\circ$  и  $a/A = 0,02$   $\Delta\varphi_{\min} = 0,1^\circ$  и  $(n_e L)_{\min} = 6,24 \cdot 10^{10} (a\Phi'/A\lambda)$ . При указанных параметрах для  $\lambda = 0,63 \text{ мк}$   $(n_e L)_{\max} \approx 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и  $(n_e L)_{\min} \approx 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; для  $\lambda = 10 \text{ мк}$  соответственно  $6 \cdot 10^{15}$  и  $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

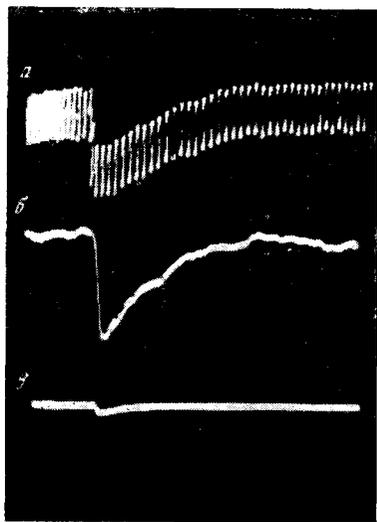
Для проверки работы такого интерферометра проведена интерферометрия в продольном и поперечном сечениях разряда при одних и тех же условиях. Плазма получалась в газоразрядной трубке, заполненной гелием при давлении 5 мм рт. ст., работающей в импульсном режиме с длительностью разряда 1 мсек. Длина трубки 40, диаметр 2,5 см. Средняя плотность по длине разряда определялась на трехзеркальном интерферометре [5]. При двукратном прохождении луча вдоль плазмы общий фазовый набег равен 11  $\pi$ . Учитывая, что фазовый набег суммируется при многократном прохождении сигнала через плазму, а также при нарастании и спаде плотности плазмы, фазовый сдвиг, соответствующий максимальной плотности, в данном случае получается равным

$$11\pi/4 \approx 2,7\pi,$$

что соответствует  $n_e \approx 1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Поперечное зондирование трубки проводилось на описанном выше интерферометре с фазовой калибровкой. Осциллограмма фазового сдвига с модуляцией фазы приведена на рис. 3, а. Для сравнения приводится осциллограмма того же фазового сдвига без модуляции (рис. 3, б). На фазовый модулятор подавалось напряжение  $U_m = 80 \text{ в}$  с частотой 20 кГц, что соответствует глубине модуляции  $\Phi' \approx 25^\circ$  при  $U_{\lambda/2} = 600 \text{ в}$  (величина  $U_{\lambda/2}$  проверялась экспериментально). По глубине провала на осциллограмме (рис. 3, а) определяется максимальный фазовый сдвиг, который в этом случае равен  $25^\circ$ , что соответствует  $n_e \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (минимально измеримая плотность в этом случае была равна  $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при  $a/A = 0,04$ ). Результаты по определению плотности при продольном и поперечном зондировании совпали с довольно высокой точностью, что подтверждает надежность описанного метода.

Рис. 3. Осциллограммы при поперечной интерферометрии разряда в трубке с гелием



Необходимо отметить, что интерферометр с фазовой модуляцией требует тщательной юстировки всех оптических элементов схемы, особенно модулятора, так как угловые допуски для его работы в режиме только фазовой модуляции составляют 10–20 угловых сек. Для устранения влияния светового потока плазмы на результаты измерений на выходе интерферометра необходимо помещать узкополосный фильтр. В качестве такого фильтра в данной работе использовался спектрограф

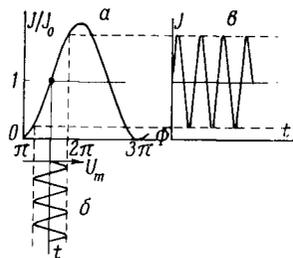


Рис. 2. Фазовая характеристика интерферометра ( $J$  — интенсивность луча на выходе интерферометра,  $J_0$  — интенсивность луча в измерительном плече,  $\Phi$  — сдвиг фазы между лучами)

ИСП-51. На рис. 3, в показана осциллограмма для случая излучения плазмы на рабочей длине волны интерферометра, прошедшего через спектрограф.

В заключение следует отметить, что при наличии малошумящего лазера чувствительность данного метода можно довести до долей градуса и таким образом еще более расширить пределы измерения концентрации электронов.

Физико-технический институт  
Академии наук УССР

Поступила в редакцию  
24 I 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Коробкин. Сб. Диагностика плазмы. Госатомиздат, 1963, стр. 36.
2. Л. А. Душин, О. С. Павличенко, В. И. Привезенцев, В. Г. Яковлев. Сб. Диагностика плазмы. Атомиздат, 1968, стр. 21.
3. W. B. Johnson, A. B. Larsen, T. P. Sosnowski. VII Internat. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Beograd, 1965. report 5.1.4 (10).
4. Л. Н. Матдич, В. М. Панкратов, И. П. Пономарева. ПТЭ, № 1, 163, 1968.
5. D. E. T. F. Ashby, D. E. Jephcott. Appl. Phys. Lett., 3, 13, 1963.