

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.039.66

ИНФРАКРАСНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СУБТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
В МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-3

© 2012 г. В. С. Бурмасов*, **, В. Б. Бобылев*, А. А. Иванова*, ***, С. В. Иваненко*, **, А. А. Касатов*, **, Д. А. Касатов*, **, Э. П. Кругляков*, К. Н. Куклин*, С. С. Попов*, **, В. В. Поступаев*, **, Е. А. Пурьга*, ***, А. Ф. Ровенских*, В. Ф. Складаров*, ***

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

**Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

***Новосибирский технический государственный университет
Россия, 630092, Новосибирск, ул. К. Маркса, 20

E-mail: burmasov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 14.07.2011 г.

Описан простой CO_2 -интерферометр Майкельсона для измерения плотности высокотемпературной плазмы в пределах одной интерференционной полосы ($n_e l = 10^{16} \text{ см}^{-2}$) в двух точках (0.8 и 9 м) длинной ($L = 12$ м) гофрированной ловушки ГОЛ-3. Для калибровки интерферометра и дистанционного управления начальной фазой измерения используется пьезоэлектрический элемент, обеспечивающий перемещение зеркала в опорном плече интерферометра. Интерферометр изготовлен из диэлектрических материалов, что исключает механическое воздействие рассеянных магнитных полей на его элементы. Временное разрешение интерферометра определяется КРТ-диодом и равно ~ 1 нс. Чувствительность интерферометра составляет $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ полосы ($n_e l = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$).

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерферометрия остается основным методом измерения плотности плазмы в исследованиях управляемого термоядерного синтеза. Методы интерферометрии постоянно совершенствуются с учетом параметров проводимых экспериментов, определяющими из которых являются, с одной стороны, плотность плазмы, ее динамика и размеры, а с другой – спектр вибраций конструктивных элементов современных крупномасштабных установок с магнитным удержанием.

Плотность плазмы на установках, ориентированных на получение субтермоядерной плазмы, в соответствии с критерием Лоусона составляет $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а ее характерные размеры ~ 10 – 100 см. Интерферометрия такой плазмы смещается из субмиллиметровой в оптическую область, где длина волны зондирующего излучения становится сравнимой с амплитудой характерных вибраций на установке. Если частота этих вибраций будет совпадать с частотой временного поведения плазмы, то интерпретация интерферограмм может оказаться практически невозможной.

В настоящее время существуют достаточно надежные методы устранения возникающих в таких условиях вибропомех. Наиболее действенными из них являются метод двухволновой интерферометрии [1], дисперсионный [2] и квадратурный [3] интерферометры.

Применение квадратурного интерферометра позволяет решить и другие проблемы, нередко ограничивающие возможности интерферометрии плазмы, такие, например, как неоднозначность определения знака фазы, потери чувствительности вблизи экстремумов, борьба с рефракционными помехами и необходимость проведения калибровки. Однако схемы и конструкция указанных приборов существенно усложняют проведение интерферометрии на крупных установках, и поэтому часто вместо них предпочтительнее использовать более простой и надежный классический способ фиксации оптических элементов интерферометра массивной станиной [4].

Следует отметить, что выбор оптимального метода во многом определяется задачами исследования, способом удержания плазмы и геометрией установки. Так, для открытой ловушки с большим аспектным отношением существенным является исследование продольной динамики плазмы. В этом случае также следует ориентироваться на простые методы, допускающие тиражирование.

Для интерферометрии субтермоядерной плазмы необходимо также учитывать существование нейтронного, рентгеновского и электромагнитного излучений, воздействующих на электронику и детали интерферометра. Управление начальной фазой и калибровка интерферометра в этих условиях должны осуществляться непосредственно во время выстрела.

В данной работе описан и.к.-интерферометр Майкельсона, применяемый в исследованиях на многопробочной ловушке ГОЛ-3 [5] с момента ее создания в 1988 г. [6].

2. ИНТЕРФЕРОМЕТР

Интерферометр конструировался с учетом особенностей ловушки. Так, для исследования распределения плотности плазмы вдоль ловушки длиной 12 м была разработана максимально простая конструкция, допускающая тиражирование. Этому благоприятствовало малое поперечное сечение ловушки – $45 \times 45 \text{ см}^2$. С другой стороны, задача существенно усложнялась вследствие мощного механического воздействия на конструктивные узлы установки (в том числе и на оптические элементы интерферометра), возникающего при формировании магнитного поля (40 кГс) ловушки пробочной конфигурации.

Учитывалось также, что процесс импульсного нагрева плазмы ($n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\varnothing 8 \text{ см}$) мощным релятивистским электронным пучком (р.э.п.) (1 МэВ, 200 кА, 10 мкс) до килоэлектронвольтовой температуры сопровождается интенсивными электромагнитными и рентгеновскими ($\sim 100 \text{ Р/импульс}$) помехами. Заметное влияние на канал регистрации могут оказать и нейтроны (10^9 нейтронов за импульс), испускаемые субтермоядерной плазмой ($T_i \approx 2 \text{ кэВ}$, $n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

Вибрационная помехозащищенность интерферометра от рассеянных магнитных полей обеспечивается диэлектрической станиной. Устойчивость к электромагнитным помехам детектора излучения достигается экранированием цепей регистрации и электронных блоков.

Ключевым элементом при модернизации интерферометра стал КРТ-детектор, изготовленный в Институте физики полупроводников СО РАН для и.к.-диагностики субтермоядерной плазмы [7] на установке ГОЛ-3. Широкий диапазон спектральной чувствительности детектора (2–12 мкм) и его быстродействие ($\sim 1 \text{ нс}$) позволяют исследовать динамику линейной плотности плазмы $n_e l$ в диапазоне от 10^{12} до 10^{16} см^{-2} с наносекундным разрешением. Благодаря малым размерам светочувствительного элемента (диаметр $\sim 200 \text{ мкм}$) КРТ-детектор оказался практически нечувствительным к фоновому ионизирующему излучению по сравнению, например, с ранее применяемым Ge:Аu-фотоспротивлением, размер светочувствительного элемента которого равен $3 \times 3 \times 10 \text{ мм}$.

Существует много лазерных источников, в том числе компактных полупроводниковых, длина волны излучения которых соответствует спектральному и.к.-диапазону чувствительности детектора. Это позволяет легко оптимизировать длину волны зондирующего излучения в соответствии с параметрами исследования. В данной работе мы ориентировались на применение распро-

страненных He–Ne- (3.39 мкм) и CO₂- (10.6 мкм) лазеров, длины волн которых расположены на противоположных краях спектрального диапазона детектора.

Выбор оптимальной длины волны λ осуществлялся следующим образом. Средняя плотность плазмы в установке ГОЛ-3 равна $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при диаметре $\sim 8 \text{ см}$. Соответствующий сдвиг фазы в зависимости от λ будет равен:

$$\Delta\varphi [\text{рад}] = 2\pi \cdot 4.46 \cdot 10^{-14} \times \\ \times 3 \cdot 10^{14} \lambda \cdot 8 = 673\lambda [\text{см}]. \quad (1)$$

Видно, что более предпочтительной является $\lambda = 10 \text{ мкм}$. В интерферометре Майкельсона соответствующий сдвиг фазы равен 1.3 рад (0.4 полосы), что примерно в 3 раза больше сдвига на 3.39 мкм.

Рефракционное отклонение зондирующего луча на возможных неоднородностях плазмы можно оценить как

$$\theta \approx \frac{r_e \lambda^2}{2\pi} \text{grad } n_e \cdot D, \quad (2)$$

где $r_e = 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ – классический радиус электрона; D – диаметр плазменного столба.

В предположении, что плазма плотностью $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ стянется в диаметр, равный 3 мм, из выражения (2) для $\lambda = 10 \text{ мкм}$ получим $\theta \sim 10^{-5} \text{ рад}$. При этом отклонение зондирующего луча в области светочувствительного элемента детектора (1–2 м от плазмы) составит $\sim 0.01 \text{ мм}$, что намного меньше практически реализуемой при юстировке ширины интерференционной полосы ($> 5 \text{ мм}$).

Оценивая вибропомехи, разумно предположить, что спектр вибраций крупномасштабной установки ГОЛ-3 аналогичен спектру больших токамаков, таких как D-III или JET, где измеренная амплитуда вибраций конструктивных элементов составляет $\sim 100 \text{ мкм}$ при характерной частоте 100 Гц [1, 8]. Опыт показал, что такой уровень вибраций на установке ГОЛ-3 может быть эффективно подавлен с помощью метровой станины (рамы), поперечное сечение колонн которой равно $15 \times 20 \text{ см}^2$. В результате взаимное смещение закрепленных на станине зеркал интерферометра не превышает 10 Å. Для $\lambda = 10 \text{ мкм}$ это дает оценку чувствительности интерферометра $\sim 10^{-4}$ полосы. В действительности чувствительность определяется шумами регистрирующей электроники.

Таким образом, излучение с длиной волны 10 мкм вполне подходит для интерферометрии плазмы на установке ГОЛ-3 в диапазоне от 10^{-4} до 1 полосы, что соответствует интервалу $n_e l \sim 10^{12} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Максимально возможное значение n_e определяется отсечкой излучения и равно примерно 10^{20} см^{-3} .

Оптическая схема интерферометра показана на рис. 1а. Как видно из рисунка, блок детектора

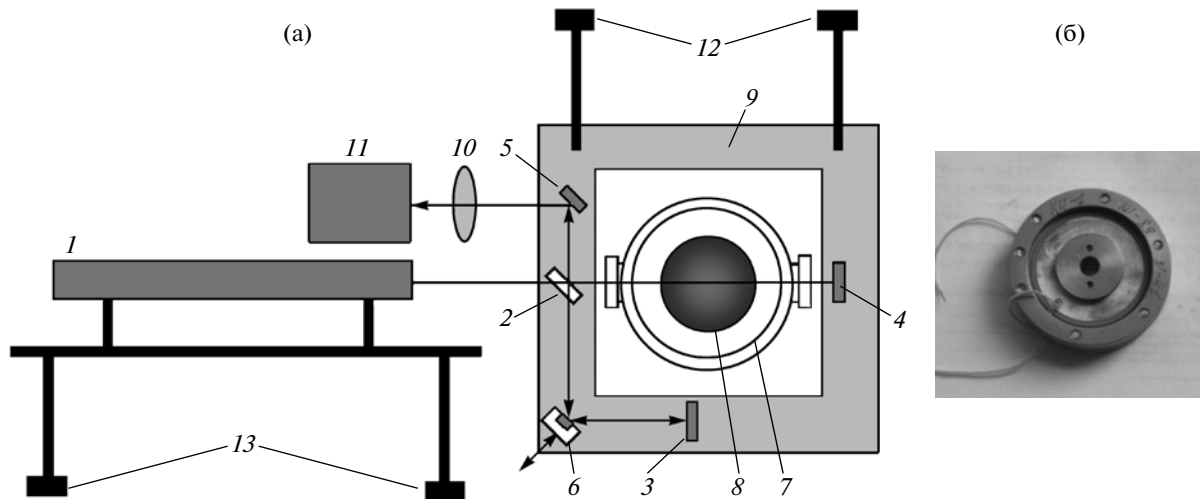


Рис. 1. а – принципиальная схема интерферометра: 1 – CO_2 -лазер, 2 – светоделитель (напыленная алюминией пластинка из BaF_2), 3–5 – зеркала, 6 – подвижное зеркало на пьезокерамике, 7 – плазменная камера с окнами из ZnSe , 8 – плазма, 9 – диэлектрическая станина из стеклотекстолита, 10 – линза из BaF_2 , 11 – HgCdTe -фотодиод, 12 – стержни подвески станины, 13 – опоры лазера; б – пьезоэлектрический элемент КП-1 ($\varnothing 52$ мм).

и лазер не имеют механических связей со станиной интерферометра, подвешенной с помощью четырех регулируемых металлических стержней через вибропоглощающие прокладки из войлока (на рис. 1 не показаны).

При плечах интерферометра ~ 1 м и диэлектрической фиксации элементов существует проблема устойчивости начальной фазы интерферометра. Основной причиной нестабильности начальной фазы в ходе эксперимента является прогрев катушек магнитного поля, расположенных вблизи станины.

Для компенсации теплового дрейфа взаимного расстояния между зеркалами используется пьезоэлектрический элемент (б) КП-1 фирмы ELPA (см. рис. 1б) в опорном плече интерферометра (см. рис. 1а). При подаче на элемент напряжения 200 В закрепленное на нем зеркало смещается на 5 мкм, что соответствует одной интерференционной полосе. Варьированием напряжения на пьезоэлементе легко устанавливается необходимая начальная фаза измерения.

При шунтировании напряжения на пьезоэлементе, например тиристором, может быть получена интерферограмма калибровки начальной фазы и амплитуды, используемая для восстановления плотности плазмы из интерферограмм. Амплитуда перемещения зеркала при калибровке составляет 25 мкм/кВ, а скорость – 0.1 мкм/мкс.

При измерениях в пределах одной полосы с контролем начальной фазы и амплитуды с помощью пьезоэлемента практически снимаются трудности с восстановлением плотности плазмы в экстремумах интерференционного сигнала, а также неопределенность направления сдвига фазы.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

Как отмечалось выше, основная задача интерферометрии на установке ГОЛ-3 – измерение распределения плотности плазмы вдоль ловушки. В настоящее время на установке имеется два интерферометра. Первый из них расположен на расстоянии ~ 0.8 м от места инжекции нагревающего электронного пучка в предварительно созданную плазму, второй – на расстоянии 9 м. Предплазма создается прямым разрядом в дейтериевом газе с заданным вдоль ловушки профилем плотности. Интерферометры интегрированы в систему сбора данных и автоматизации установки ГОЛ-3 [9].

Типичный пример интерферограммы, отражающей поведение плазмы в ловушке на расстоянии 9 м от места инжекции р.э.п., приведен на рис. 2. Из рисунка легко определяется начальная фаза, а именно: $\varphi \approx \pi + 0.2\pi$. Поскольку интерферограмма имеет синусоидальный характер, то ее участок в интервале $[\pi + 0.2\pi; 2\pi - 0.2\pi]$ может быть аппроксимирован линейной зависимостью, и изменение фазы на этом участке с хорошей точностью отражает динамику плотности плазмы. Видно, что максимальное значение плазмы достигается примерно через 50 мкс после максимального значения разрядного тока. Небольшое запаздывание объясняется тем, что, наряду с ионизацией разрядным током, начиная с момента времени 50 мкс осуществляется дополнительная ионизация р.э.п. в течение 10 мкс. Максимум плотности достигается через 100 мкс, после чего плазма начинает распадаться.

Однако вблизи точки *a* плотность начинает быстро расти практически при нулевом токе разряда. После достижения некоторого максимума в точке *b* (точка возврата) она распадается практически до нуля спустя 500 мкс. С этого момента на-

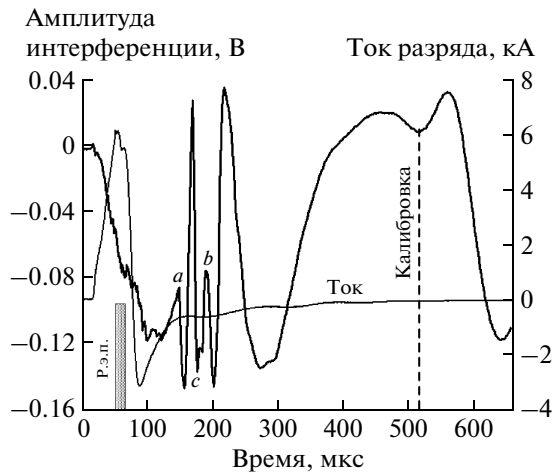


Рис. 2. Типичные интерферограмма и осциллограмма разрядного тока.

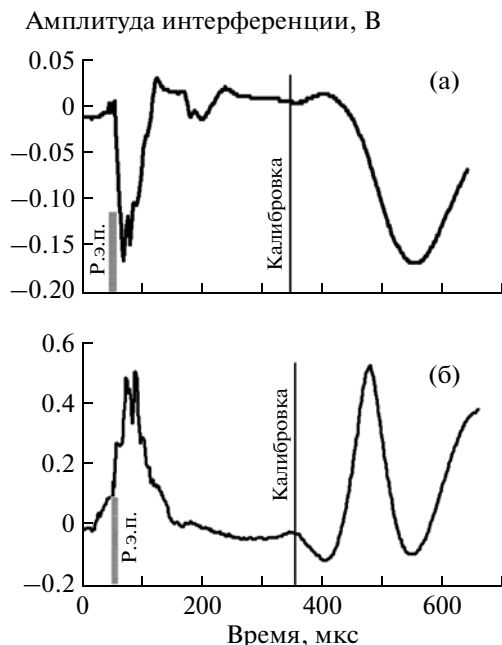


Рис. 3. Типичные интерферограммы, отражающие поведение плотности плазмы в двух точках гофрированной ловушки ГОЛ-3: а – 0.8 м; б – 9 м.

чинается калибровка. Резкий рост плазмы в точке *a* объясняется прилетом плазмоида, образованного релятивистским пучком при взаимодействии с плазменным лимитером, расположенным на расстоянии 1 м от интерферометра.

Флуктуации на интерферограмме в точке *c*, по-видимому, вызваны рефракцией зондирующего луча на неоднородностях плазмы.

Линейная плотность плазмы в момент инжекции пучка (50 мкс) равна $0.4 \text{ полосы} \cdot 5.5 \cdot 10^{15} = 2.29 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При диаметре плазмы 8 см этому соответствует $n_e = 2.87 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Пример интерферограмм, полученных с помощью двух интерферометров в двух точках по дли-

не ловушки, приведен на рис. 3. Начальные фазы интерферометров в этом выстреле были подобраны так, чтобы форма интерферограмм была тождественной временному поведению плотности плазмы. Для того чтобы продемонстрировать тот факт, что наблюдаемые сигналы обусловлены плазмой, а не случайными помехами, начальные фазы интерферометров установлены со сдвигом на 180° .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный интерферометр достаточно прост в эксплуатации в условиях крупномасштабного эксперимента по исследованию нагрева и удержания высокотемпературной плазмы.

Интерферометр устойчив к вибрациям. В течение длительного времени (до года и более) интерферометр не требует дополнительной юстировки, несмотря на то что все его детали изготовлены из диэлектрических материалов, по твердости уступающих традиционно применяемым металлам.

Установка требуемой начальной фазы измерения и калибровка интерферометра достаточно просто осуществляются дистанционно с помощью пьезоэлектрического элемента в опорном плече. В результате интерпретация и обработка осциллограмм, полученных при измерении в пределах одной полосы, не представляет затруднений. Процесс установки требуемой начальной фазы может быть легко автоматизирован.

При необходимости интерферометр можно перестроить на другую длину волны внутри интервала чувствительности HgCdTe-фотоиода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, контракт П276.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dan R. Baker, Shu-Tso Lee // Rev. Sci. Instrum. 1978. V. 49. P. 919.
2. Lizunov A., Bagryansky P., Khilchenko A. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 10E708.
3. Кузнецов А.П., Голубев А.А., Козин Г.И. и др. // ПТЭ. 2006. № 2. С. 109. (Kuznetsov A.P., Golubev A.A., Kozin G.I. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2006. V. 49. № 2. P. 247.)
4. Kawahata K., Tanaka K., Ito Y. // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70. P. 707.
5. Burdakov A., Arzhannikov A., Astrelin V. et al. // Fusion Science and Technology. 2007. V. 51(2T). P. 106.
6. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Kapitonov V.A. et al. // Plasma Phys. Contr. Fusion. 1988. V. 30. P. 1571.
7. Васильев В.В., Дворецкий С.А., Варавин В.С. и др. // Автоматрия. 2007. Т. 43 (4). С. 5.
8. Orlinskij D.V., Magyar G. // Nucl. Fusion. 1988. V. 28. P. 611.
9. Бурдаков А.В., Квашин А.Н., Койдан В.С. и др. Препринт ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН № 61. Новосибирск, 2003; URL: http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/files/2003_061.pdf