

**ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ ВОДЫ С ГЕНЕРАЦИЕЙ
РАЗНОЧАСТОТНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПОЛЯРИЗАЦИЙ
ОДНОВРЕМЕННО НА ДВУХ ДЛИНАХ ВОЛН
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ СТЕЛЛАРАТОРА Л2-М**

© 2008 г. А. А. Летунов, В. П. Логвиненко, В. В. Завьялов*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

**Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН*

Поступила в редакцию 09.07.2007 г.

Описан проект усовершенствования диагностики профиля распределения электронной плотности плазмы стелларатора Л2-М. В настоящее время в этой диагностике используется интерферометр на основе HCN-лазера с механическим двигателем частоты и охлаждаемыми жидким гелием InSb детекторами без магнитного поля. Предполагается заменить HCN-лазер лазером на парах воды, генерирующим одновременно на двух длинах волн (220 и 118 мкм). При этом на каждой из них при использовании анизотропного выходного зеркала генерируются две ортогональные поляризации с разностью частот несколько десятков кГц. Использование такого лазера с генерацией разночастотных поляризаций позволяет отказаться от механического сдвигателя частоты. А одновременные измерения на двух длинах волн позволяют разделять вклады в фазовые набег от электронов плазмы и изменений геометрической длины плеч интерферометра. Для обеспечения наиболее эффективной реализации получаемых в такой схеме преимуществ в качестве приемников излучения будут использоваться специально разработанные для этой диагностики криогенные датчики. Они состоят из установленных друг за другом фотодетекторов Ge и InSb. Последний помещен в магнитное поле ≈ 0.55 Тл, что дает резонансное увеличение чувствительности в области вблизи 220 мкм.

PACS: 52.70.Gw

ВВЕДЕНИЕ

Двухзаходный стелларатор Л2-М с электронно-циклотронным нагревом плазмы [1] имеет следующие основные параметры: большой радиус 1 м, малый радиус камеры 17.5 см, число периодов магнитного поля 14, средний радиус плазмы 11.5 см, магнитное поле на оси в режиме ЭЦР-нагрева 1.34 Тл, ток омического нагрева до 20 кА, мощность гиротрона ЭЦР-нагрева 100–300 кВт, частота гиротрона 75 ГГц, электронная плотность на оси $(0.5–3) \times 10^{13}$ см⁻³.

Для определения радиального профиля плотности электронов в Л2-М в настоящее время используется многохордовый интерферометр на основе HCN-лазера (длина волны 337 мкм) [2–4]. Интерферометр Майкельсона имеет семь сферических зеркал в вакуумной камере. Любое из них может быть включено в оптическую схему интерферометра поворотом внешнего зеркала 8 (рис. 1), чем и осуществляется сканирование по хордам. Особенностью, осложняющей реализацию многохордовой диагностики на данной установке, яв-

ляется невозможность проводить измерения “на просвет” одновременно по всем хордам в одном импульсе. Наличие в стеллараторе винтовой обмотки не позволяет сделать в камере необходимые для такого интерферометра окна и накладывает, тем самым, существенные ограничения на систему транспортировки лазерного излучения через камеру. HCN-лазер с накачкой ВЧ-разрядом имеет мощность ~ 10 мВт. Для переноса фазового сдвига в низкочастотный диапазон используется механический сдвигатель частоты на основе эффекта Доплера, сдвигающий частоту лазера на 15 кГц. Детекторами служат охлаждаемые жидким гелием кристаллы InSb без магнитного поля. Сигналы с детекторов оцифровываются и затем обрабатываются в цифровой форме. Достигнута обнаружительная способность 5×10^{13} см⁻². Эта величина соответствует минимальному надежно регистрируемому фазовому набегу по крайней хорде, при котором еще возможно достаточно надежное восстановление профиля плотности.

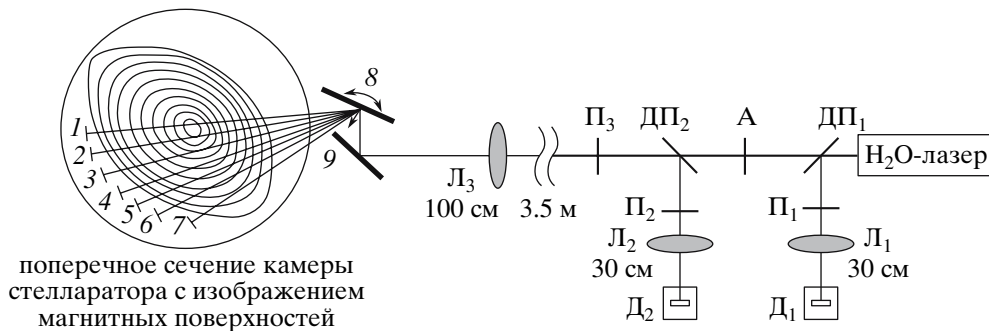


Рис. 1. Схема диагностической установки с интерферометром на основе H_2O -лазера. 1–9 – зеркала, L_1 – L_3 – полиэтиленовые линзы, P_1 – P_3 – поляризаторы, DP_1 , DP_2 – ответвители (делители пучка), А – аттенюатор, D_1 , D_2 – криогенные детекторы.

Цель настоящей работы – улучшение параметров интерферометра. Конкретными задачами являются улучшение распознавания профилей с немонотонной зависимостью плотности от радиуса, увеличение точности измерений на краю, повышение точности измерений при низкой плотности. Анализ источников погрешностей показывает, что можно добиться значительного улучшения, исключая вклад геометрического изменения длины плеч интерферометра путем измерения фазового набега одновременно на двух длинах волн и используя вместо механического сдвигателя частоты генерацию двух близких частот в одном резонаторе.

Такую возможность дает использование специализированного лазера на парах воды с генерацией разночастотных ортогональных поляризаций одновременно на двух длинах волн [5].

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР НА ПАРАХ ВОДЫ И ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ НЕГО

В [6] было обнаружено, что непрерывный газоразрядный лазер на парах воды может работать в режиме генерации ортогональных поляризаций. Это свойство лазера было использовано для создания простого и надежного гетеродинного интерферометра [7, 8], успешно применявшегося для измерения профиля электронной плотности плазмы СВЧ-разряда в водороде и дейтерии при давлении в несколько атмосфер [8–10]. Лазерная генерация в терагерцовом диапазоне при разряде в парах воды возникает на переходах между вращательными уровнями, на которые расщеплены колебательные уровни молекулы воды.

Выходное сеточное зеркало лазера сделано анизотропным по отношению к линейной поляризации излучения в лазере. Этого можно добиться, слегка деформируя сетку с квадратной ячейкой, растягивая ее вдоль одной из диагоналей без изменения длины сторон (рис. 2). Тогда эф-

фективная длина резонатора для различных поляризаций электромагнитной волны оказывается разной. В результате каждое из собственных колебаний резонатора расщепляется на две взаимно ортогональные линейно поляризованные компоненты, ориентация которых определяется направлением внесенной анизотропии.

Это можно наблюдать, помещая на пути луча лазера поляризатор, ориентированный под углом 45° к направлению анизотропии, и регистрируя полученный таким образом на фотоприемнике сигнал в виде биений с разностной частотой. Диапазон частот биений ограничен влиянием возникающей амплитудной анизотропии. В лазере данной конструкции наблюдались биения с частотами в диапазоне от 3 до 300 кГц. Благодаря общему резонатору обе волны имеют высокую стабильность разностной частоты ($\delta\nu < 100$ Гц), и оси их пространственных распределений совпадают (рис. 3).

Расходимость лазерного луча и распределение мощности по его сечению определяются типом (модой) возбужденного в резонаторе лазера колебания. Для основного TEM_{00} -колебания, на которое настраивался лазер, распределение мощности

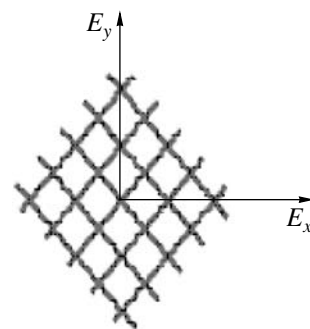


Рис. 2. Растяжение ячеек сетки выходного зеркала лазера вдоль одного из направлений их диагоналей, без изменения длины сторон ячеек.

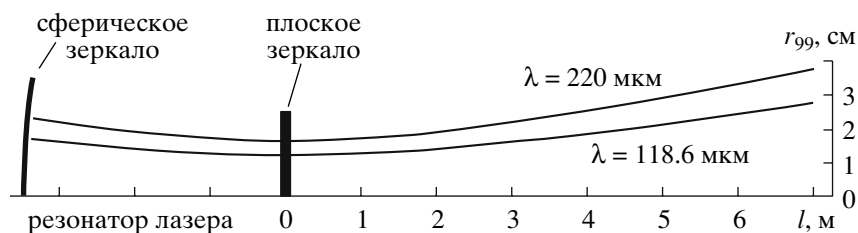


Рис. 3. Радиус сечения лазерного пучка в границах, содержащих 99% его мощности для рабочих линий генерации.

по сечению азимутально симметрично и имеет радиальный гауссовский профиль с шириной $r(l)$. При этом доля полной мощности внутри круга с радиусом r равна $1 - \exp[-(r/r(l))^2]$. Ширина распределения $r(l)$ определяется соотношениями

$$r(l) = r_0 \left(1 + \frac{l^2}{LR - L^2} \right)^{1/2},$$

$$r_0 = \left[\frac{\lambda}{4\pi} (LR - L^2)^{1/2} \right]^{1/2},$$

где r_0 – радиус сечения пучка на плоском зеркале, l – расстояние от плоскости рассматриваемого сечения до плоскости зеркала, L – расстояние между плоским и сферическим зеркалами, R – радиус кривизны сферического зеркала, λ – длина волны излучения.

Практический интерес представляет $r_{99} = 2.146r(l)$ – радиус сечения пучка в границах, содержащих 99% его мощности, изображенный на рис. 3. Для описываемого лазера, $R = 7$ м, $L = 3.5$ м, и радиус r_{99} сечения пучка на плоском зеркале для длин волн 118.6 и 220 мкм составляет соответственно 12.3 и 16.8 мм.

В используемом лазере с накачкой разрядом постоянного тока в качестве выходного зеркала установлена медная сетка с периодом 40 мкм, дающая частоты биений 38 и 81 кГц на длинах волн 220 и 118.6 мкм соответственно. На этих линиях получены выходные мощности 1, 2 и 3 мВт. Регулируя давление и соотношение компонент газовой смеси и настраивая длину резонатора лазера, можно с одним и тем же выходным зеркалом получить генерацию как на одной, так и одновременно на нескольких длинах волн.

Частоты биений на разных длинах волн существенно отличаются, и соответствующие сигналы с детектора могут быть разделены последующей обработкой. Однако для получения наилучшей чувствительности для каждой длины волны их удобнее регистрировать разными детекторами. Для раздельного детектирования коротковолнового (118.6 мкм) и длинноволнового (220 мкм) излучения лазера были изготовлены охлаждаемые до температуры жидкого гелия фотоприемники на основе Ge и InSb [11]. Фотопроводимость ис-

пользуемых Ge монокристаллов имеет красную границу для излучения с длиной волны в 120 мкм, поэтому Ge фотоприемник, имея достаточно высокую чувствительность для указанных выше коротких длин волн излучения лазера, оказывается практически нечувствительным к длинноволновым линиям.

Напротив, фотоприемники на основе электронного разогрева носителей в InSb имеют высокую чувствительность для длинноволновых линий излучения лазера. Кроме того, их чувствительность может быть значительно увеличена помещением кристалла в магнитное поле [12]. Поэтому были изготовлены комбинированные фотоприемники в виде сэндвича из двух кристаллов: Ge и InSb. Излучение по металлическому полированному лучеводу с внутренним диаметром 3.8 мм подается снаружи внутрь гелиевого объема на приклеенный на холодном конце лучевода сэндвич. InSb детектор помещен в поле постоянного магнита. При оптимальном для измерения магнитном поле $B = 0.55$ Тл велики как отклик на 220 мкм излучение, так и отношение откликов InSb на 220 мкм и 118.6 мкм излучение. Первым на пути излучения расположен кристалл Ge, практически не поглощающий 220 мкм излучение. До кристалла InSb доходит меньше 118.6 мкм излучения, что также повышает селективность. Конструктивно фотоприемники оформлены в виде вставки диаметром 11 мм к стандартному 10-литровому транспортному дьюару. На верхнем конце вставки находится металлический корпус с четырьмя питаемыми аккумуляторами предусилителями с выходными сопротивлениями 50 Ом.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 1 представлена схема диагностической установки с H_2O -лазером. Заднее зеркало резонатора – глухое сферическое $R = 7$ м. Выходным зеркалом служит медная сетка с шагом 40 мкм.

Интерферометр строится по схеме Майкельсона, с набором возвращающих зеркал или угловых отражателей внутри вакуумной камеры.

Сетка, служащая выходным зеркалом лазера, сориентирована так, что одна из диагоналей ее ячеек вертикальна, а другая горизонтальна. Не-

большая часть мощности лазера ответвляется тонкой делительной пленкой ДП₁ (лавсан толщиной 20 мкм) на детектор Д₁ через 45° поляризатор П₁ для формирования опорного сигнала. В качестве поляризаторов использованы квазиодномерные никелевые сетки с рабочим периодом 30 мкм и с поперечными скрепами через 340 мкм. Они пропускают на обеих рабочих длинах волн излучение с поляризацией, перпендикулярной длинным сторонам ячеек сетки, и зеркально отражают другую компоненту.

Далее лазерный луч проходит в рабочий канал. Прошедший пучок разделяется поляризатором П₃. Компонента с горизонтальной поляризацией проходит в стелларатор, а с вертикальной отражается поляризатором назад. Прошедшая компонента дважды проходит через плазму, отразившись от одного из расположенных внутри камеры стелларатора отражателей I–7, и возвращается назад через поляризатор П₃. Ответвитель ДП₂ направляет обе эти волны в детектор Д₂ через смесительный поляризатор П₂. В рабочем канале при возникновении плазмы добавляется вызванный ею дополнительный сдвиг фазы. Атенюатор А, ослабляя лазерное излучение между ответвителями, уменьшает долю излучения, многократно прошедшего через плазму. Это особенно важно из-за большого отражения в интерферометр выходным зеркалом лазера. Для формирования и поддержания необходимых размеров луча в тракте используются полиэтиленовые линзы Л₁–Л₃, имеющие оптическое качество, достаточное для визуальной юстировки системы по лучу лазера видимого диапазона.

В течение импульса стелларатора из-за перемещений зеркал I–7, вызванных импульсом магнитного поля, оптическая длина пути рабочего луча меняется, что вызывает паразитный фазовый сдвиг. Измерения на двух длинах волн позволяют выделить вклад плазмы. Это основная цель применения “двухцветного” интерферометра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ближайшими достаточно сходными аналогами данного проекта являются проекты ИАЭ [13, 14] и NIFS [15] по созданию двухволновых (“двухцветных”) интерферометров. В работе [15] используются два метанольных (CH₃OD) лазера с оптической накачкой от СО₂-лазера, работающих одновременно на длинах волн 57.2 и 47.6 мкм, что, в частности, обеспечивается выбором и прецизионным поддержанием необходимой для их накачки линии генерации СО₂-лазера. Разностные частоты лазерных пар, лежащие вблизи 1 МГц, поддерживаются с точностью 5 кГц системой активной стабилизации, которая обеспечивает стабилизацию разности длин резонаторов этих

лазеров с точностью, превосходящей 1 нм. Интерферометр предполагается использовать в рамках проекта ИТЕР или после модернизации японского стелларатора LHD. В более ранней работе [13] аналогичная схема, предназначавшаяся в 1991 г. для установки на Токамак Т-15, состоит из четырех лазеров с оптической накачкой от СО₂-лазера: двух СН₃ОН-лазеров с длиной волны генерации 185.6 мкм с разностью частот в 600 кГц и двух СН₂F₂-лазеров с длиной волны 119 мкм и разностью частот в 900 кГц. В обоих проектах все лучи сводятся вместе довольно сложными оптическими системами.

В настоящем проекте применительно к параметрам стелларатора Л2-М аналогичные функциональные возможности достигнуты более простыми и надежными средствами с использованием всего одного лазера.

Кроме того, использование лазера на парах воды несет большие потенциальные возможности. Можно использовать и другие длины волн. А большой диапазон управляемого перемещения заднего зеркала (25 мм), без ухудшения точности и стабильности угловых юстировок, позволяет получить генерацию не только на двух, но и на трех разных длинах волн одновременно. В непрерывном режиме с лазером данной конструкции можно получить генерацию на следующих длинах волн [5–7]: 28.0 мкм, 33.0 мкм, 47.2 мкм, 55.1 мкм, 78.4 мкм, 79.1 мкм, 115 мкм, 118.6 мкм и 220 мкм для смеси Н₂О + Н₂. А для смеси D₂O + D₂ – 71.9 мкм, 84.3 мкм, 107.7 мкм и 171.7 мкм. Условия наблюдения этих линий и их интенсивности сильно зависят от периода и прозрачности выходного сеточного зеркала лазера. Линии 28, 33 и 84.3 мкм соответствуют переходам с $\Delta J = 1$, поэтому на них колебания с разными линейными поляризациями сильно связаны, и режим с одновременной генерацией ортогональных поляризаций с разными частотами невозможен из-за конкуренции мод. Для остальных линий $\Delta J = 0$, и этот режим с лазером данной конструкции был обнаружен [5–7]. При этом, хотя базовые параметры сеток не оптимизировались по отношению к величине разностной частоты, для линии 78.4 мкм наблюдалась разность частот около 300 кГц.

Сейчас мы располагаем работающими лазером и приемником. На их основе собран испытательный стенд. На нем будет опробовано функционирование интерферометра с движущимся диэлектрическим объектом в качестве имитатора плазмы. Сигналы будут фиксироваться системой регистрации стелларатора Л2-М. В ходе этих испытаний будет уточнена оценка улучшения обнаружительной способности интерферометра. Ожидается улучшение в два–три раза до величины $\sim 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Следующим шагом должна

статья замена имеющегося на стеллараторе Л2-М интерферометра на разработанный.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-5382.2006.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребеничиков С.Е. // Тр. ИОФАН. Т. 31. М., 1991. С. 37.
2. Смирнова А.Д. // Там же. С. 175.
3. Кладов С.В., Смирнова А.Д. // Тр. ФИАН СССР. Т. 160. М., 1985. С. 25.
4. Князев А.В., Летунов А.А., Логвиненко В.П. // ПТЭ. 2004. Вып. 2. С. 105.
5. Завьялов В.В., Богомолов Г.Д. // ПТЭ. 1982. Вып. 3. С. 174.
6. Завьялов В.В., Богомолов Г.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. С. 393.
7. Завьялов В.В. Дисс. ... канд. ф.-м. н. М., 1976.
8. Tishchenko E.A., Zav'yalov V.V., Zatsepin V.G., Lasarev V.B. // Proc. XIII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Berlin, DDR, 1977. P. 161.
9. Капица П.Л. // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. С. 1801.
10. Богомолов Г.Д., Дубровский Ю.В., Летунов А.А., Песков В.В. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. С. 519.
11. Завьялов В.В., Зотова Е.А., Шампаров Е.Ю. // ПТЭ. 2008. Вып. 2. В печати.
12. Богомолов Г.Д., Завьялов В.В., Зотова Е.А., Шампаров Е.Ю. // ПТЭ. 2002. Вып. 1. С. 87.
13. Верецински З., Герасимов В.Г., Горбунов Е.П. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 198.
14. Gorbunov E.P., Skosyrev Yu.V. // Proc. 5th Intern. Symp. on Laser-Aided Plasma Diagnostics, Bad-Honnef, 1991. P. 139.
15. Kawahata K., Tanaka K., Tokuzawa T. et al. // Review of Scientific Instruments. Part I & II. 2004. V. 75. Issue 10. P. 3508.