

На правах рукописи

СОЛОМАХИН Александр Леонидович

**ДИСПЕРСИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
НА ОСНОВЕ CO₂ ЛАЗЕРА**

01.04.08 - физика плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2006

Работа выполнена в Институте ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Багрянский — доктор физико-математических наук,
Петр Андреевич Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Князев — доктор физико-математических наук,
Борис Александрович профессор, Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

Павлов — кандидат физико-математических наук,
Александр Алексеевич Институт теоретической и прикладной
механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ — ГНЦ РФ "Троицкий институт
ОРГАНИЗАЦИЯ: инновационных и термоядерных
исследований", г. Троицк.

Защита диссертации состоится “ _____ ” _____ 2006 г.
в “ _____ ” часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Интерферометрия получила широкое распространение в исследованиях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, как надежное средство измерения абсолютного значения электронной плотности. Изменение фазы электромагнитной волны, распространяющейся через плазму, в приближении $\omega_p \ll \omega$ и $\omega_{ce} \ll \omega$ зависит только от длины волны и линейной плотности электронов:

$$\Delta\varphi = \frac{e^2}{mc^2} \lambda \int n_e dl + \varphi_0, \quad (1)$$

где ω – частота волны, ω_p – плазменная частота, ω_{ce} – электронная циклотронная частота, m – масса электрона, λ – длина волны, n_e – электронная плотность, φ_0 – набег фазы, не связанный с плазмой, а интегрирование производится вдоль линии распространения луча.

Общей особенностью интерферометров является наличие двух независимых оптических каналов. Поскольку набег фазы волны в среде может зависеть от геометрического пути, поляризации и частоты излучения, существует три типа интерферометров. Один из них использует каналы, разделенные пространственно, два других основаны на разделении по поляризациям и частотам. Традиционно для интерферометрии плазмы используются интерферометры построенные по схеме Майкельсона или Маха-Цандера, то есть системы первого типа с пространственным разделением каналов (см., например, [1] и [2]). Этим обстоятельством обусловлен главный недостаток интерферометров такого типа – высокая чувствительность к вибрациям оптических элементов. Для уменьшения влияния вибраций принимаются следующие меры:

- используются массивные виброизолирующие станины, и осуществляется звукоизоляция оптических элементов;
- для зондирования используется излучение субмиллиметрового диапазона (118 мкм, 337 мкм) [2];
- используются двухцветные интерферометры, в которых излучения от двух источников с сильно различающимися длинами волн распространяются по одному пути, и которые можно условно разделить на два типа: 1) интерферометры с компенсацией вибраций

методом обратной связи, сигнал ошибки при этом формируется в канале с коротковолновым излучением, для которого набег фазы в плазме относительно мал [1]; 2) системы, в которых набег фазы в плазме отделяется от набега фазы, вызванного изменением размера измерительной базы интерферометра, при помощи математической обработки сигналов, зарегистрированных в измерительных каналах [3].

Все перечисленные пути преодоления влияния вибраций имеют свои недостатки. Переход в область больших длин волн увеличивает влияние рефракции, поскольку высокий градиент плотности плазмы является особенностью современных установок для термоядерных исследований. Относительно высокая линейная плотность плазмы $\langle n_{el} \rangle \sim 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в современных установках позволяет, в принципе, использовать зондирующее излучение видимого и инфракрасного диапазонов, где влияние рефракции пренебрежимо мало, а набег фаз достаточно велик. Однако, при использовании этих длин волн возрастает чувствительность интерферометров к вибрациям. Для полного подавления влияния вибраций в двухцветных интерферометрах необходимо, чтобы лучи от двух источников шли по одному пути с большой точностью. Для этого требуется прецизионная и устойчивая к вибрациям юстировка системы, чего трудно добиться в условиях современных систем для магнитного удержания плазмы, где длина измерительной базы может составлять десятки метров.

Относительно новым типом интерферометра является дисперсионный интерферометр (ДИ), впервые предложенный независимо в [4] и [5]. Оптические каналы ДИ разделены по частотам, причем излучение в коротковолновом канале формируется методом удвоения частоты зондирующего излучения. Свойства большинства нелинейных кристаллов позволяют организовать такой режим удвоения частоты, при котором излучение второй гармоники распространяется точно по тому же пути, что и излучение первой гармоники. Это обстоятельство позволяет создать интерферометр, чувствительный только к дисперсии изучаемой среды и слабо чувствительный к вибрациям оптических элементов.

Цель работы состояла:

- в создании дисперсионного интерферометра на основе CO_2 лазера для диагностики плазмы в современных термоядерных установках и установках следующего поколения;

- в исследовании поведения плазмы в установке ГДЛ с помощью дисперсионного интерферометра.

На защиту выносятся следующие научные результаты:

1. Впервые создан дисперсионный интерферометр на основе CO_2 лазера.
2. Предложена система фазового детектирования и алгоритм вычисления фазы, позволившие в результате их реализации измерять линейную плотность плазмы с точностью $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и разрешением по времени 100 мкс.
3. Продемонстрированы основные преимущества дисперсионного интерферометра: простота конструкции и слабая чувствительность к вибрациям оптических элементов в условиях реальных экспериментов на установках ГДЛ и ТЕХТОР.
4. В эксперименте с дополнительным пробкотроном на установке ГДЛ изучен процесс накопления быстрых ионов и измерена величина их линейной плотности. Результаты измерений позволили сделать два наиболее важных вывода для этого эксперимента: 1) плотность анизотропных ионов со средней энергией $\approx 8 \text{ кэВ}$ более чем в три раза превысила плотность теплых ионов и достигла величины $1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; 2) удержание горячих ионов определяется кинетикой кулоновских столкновений.
5. В экспериментах по изучению влияния радиального электрического поля на удержание плазмы в ГДЛ измерено время удержания частиц плазмы для различных профилей радиального потенциала. Показано, что при формировании оптимального профиля потенциала время удержания определяется скоростью продольного газодинамического истечения, несмотря на неблагоприятную для МГД-устойчивости конфигурацию магнитного поля.

Научная новизна

Впервые создан дисперсионный интерферометр на основе CO_2 лазера. Доказана малая чувствительность подобного интерферометра к вибрациям оптических элементов.

Научная ценность работы

Созданный дисперсионный интерферометр в отличие от интерферометров построенных по классической схеме можно использовать для измерения линейной плотности плазмы в установках по УТС следующего поколения.

В экспериментах с компактным пробкотроном на ГДЛ с помощью дисперсионного интерферометра исследовалось удержание плазмы с реордной анизотропией без возникновения микронеустойчивостей. Ценность экспериментов с компактным пробкотроном состоит в моделировании плазмы в зоне испытаний источника нейтронов на основе ГДЛ. Полученные результаты также могут быть использованы для проверки критериев микроустойчивости плазмы с высокой анизотропией в пространстве скоростей.

В экспериментах на основном пробкотроне ГДЛ с помощью дисперсионного интерферометра исследовалось удержание плазмы в зависимости от профиля радиального потенциала. Эти эксперименты проводились для исследования физики удержания плазмы в ГДЛ, что является очень важным вопросом для нейтронного источника на основе ГДЛ.

Апробация диссертации

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск). Кроме того, результаты работы докладывались на Всероссийской конференции по физике плазмы и УТС (2004-2005, Звенигород), Международной конференции: "Open Magnatic System for Plasma Confinement" (2004 – Новосибирск, 2006 – Цукуба, Япония), Международной конференции: "EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics" (2005 – Таррагона, Испания, 2006 – Рим, Италия), Всероссийской конференции по диагностика высокотемпературной плазмы (2005 – Троицк), Международной конференции: "International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics" (2005 – Snowbird, Utah, USA).

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст диссертации содержит 143 страницы, 64 рисунка и 2 таблицы. Список литературы состоит из 46 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны основные принципы интерферометрии и дан обзор интерферометров применяемых на современных термоядерных установках, также здесь дано описание принципа работы дисперсионного интерферометра и его преимуществ по сравнению с традиционными интерферометрами.

В первой главе дано описание теории генерации второй гармоники, а также результаты расчета оптической схемы необходимой для генерации второй гармоники. Полученные результаты были использованы для экспериментального изучения процесса генерации второй гармоники излучения CO_2 лазера в нелинейных кристаллах ZnGeP_2 и GaSe . Эта часть работы была мотивирована следующими обстоятельствами:

- недостаточными данными относительно параметров нелинейных кристаллов для генерации второй гармоники непрерывного излучения CO_2 лазера;
- необходимостью выбрать тип удвоителя частоты, параметры которого оптимальны для решения поставленной задачи;
- необходимостью детальной проверки качества выбранных образцов нелинейных кристаллов.

Также в этой главе описано создание настольного варианта дисперсионного интерферометра и пилотного варианта дисперсионного интерферометра на установке ГДЛ.

Вторая глава посвящена описанию дисперсионного интерферометра построенного на установке ГДЛ, системы фазового детектирования, которая была предложена автором специально для ДИ, работающего в режиме регистрации больших набегов фазы $\Delta\varphi > 1$. Подробно изложены результаты анализа влияния различных факторов на точность вычисления фазы. Также в этой главе приведено краткое описание аппаратно-программного комплекса, который был специально создан для управления дисперсионным интерферометром, регистрации и обработки данных. Заключительная часть главы 2 посвящена описанию результатов испытаний разработанного ДИ в экспериментах на установке ГДЛ. Представлены и обсуждаются также наиболее важные результаты измерений при помощи ДИ в экспериментах на установке ГДЛ.

Третья глава посвящена описанию ДИ созданного для измерения линейной плотности плазмы на токамаке ТЕХТОР. Здесь приведены результаты измерений линейной плотности плазмы в различных режимах

работы установки. Также в этой главе проводится сравнение работы ДИ со штатным на TEXTOR интерферометром Маха-Цандера, работающим на длине волны 337 мкм.

В четвертой главе обсуждаются пути дальнейшего усовершенствования ДИ, а также перспективы его использования для диагностики плазмы в термоядерных установках следующего поколения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Опубликованные работы

- A dispersion interferometer based on CO_2 laser for TEXTOR and burning plasma experiments / *P.A. Bagryansky, A.D. Khilchenko, A.N. Kvashnin, A.A. Lizunov, R.V. Voskoboynikov, A.L. Solomakhin, H.R. Koslowski*. Rev. Sci. Instrum. - 2006. - Vol.5, N77. - P.053501-1-053501-7.
- Дисперсионный интерферометр на основе CO_2 лазера / *А.Л. Соломахин, П.А. Багрянский, Р.В. Воскобойников, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, А.А. Лизунов, В.В. Максимов, А.Д. Хильченко*. // Приборы и техника эксперимента. - 2005. - N5. - С.96-106.
- Dispersion interferometer based on CO_2 laser / *P.A. Bagryansky, A.D. Khilchenko, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, A.L. Solomakhin, R.V. Voskoboynikov*. // Transactions of Fusion Science and Technology an international journal of the american nuclear society. - 2004. - Vol.47. - N1T. - P.327-329.
- Dispersion interferometer based on CO_2 laser / *P.A. Bagryansky, A.A. Lizunov, A.L. Solomakhin, H.R. Koslowski*. // 32st EPS Conference on Plasma Physics. - Tarragona 2005.
- Status of the GDT experiment and future plans / *A.A. Ivanov, A. Abdrashitov, G. Abdrashitov, A. Anikeev, P. Bagryansky, A. Beklemishev, P. Deichuli, A. Ivanov, S. Korepanov, V. Maximov, S. Murakhtin, A. Lizunov, V. Prikhodko, V. Kapitonov, V. Kolmogorov, A. Khilchenko, V. Mishagin, V. Savkin, A. Shoukaev, G.I. Shulzhenko, A. Solomakhin, A. Sorokin, D. Stepanov, N.V. Stupishin, Yu. Tsidulko, A. Zouev, K. Noack, G. Fiksel, D.J. Den Hartog*. // Transactions of Fusion Science and Technology an international journal of the American nuclear society. - 2005. - Vol.47, - N.1T. - P.27-34.

- First results from SHIP experiment / *P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, D.N. Stepanov, K. Noack, V.V. Prikhodko, A.L. Solomakhin.* // Transactions of Fusion Science and Technology an international journal of the American nuclear society. - 2005. - Vol.47, - N1T. - P.59-62.

Список литературы

- [1] T. Fukuda, A. Nagashima. Rev. Sci. Instrum., **60**, 6, (1989).
- [2] H.R. Koslowski, H. Soltwisch. Fusion Engineering and Design, **34-35**, 143, (1997).
- [3] Y. Kawano, et. al. Rev. Sci. Instrum., **67**, 1520, (1996).
- [4] Kh.P. Alum, Yu.V. Kovalchuk, G.V. Ostrovskaya. Pisma Zh. Tekh. Fiz., **7**, 1359, (1981).
- [5] F.A. Hopf, A. Tomita, G. Al-Jumaily. Opt. Lett., **5**, 386, (1980).

Соломагин Александр Леонидович

**Дисперсионный интерферометр
на основе CO₂ лазера**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 20.11.2006 г.

Подписано к печати 21.11.2006 г.

Формат 100×90 1/16 Объем 0,5 печ.л., 0,4 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 52

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротационной ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.