

Министерство образования
Российской Федерации
Новосибирский Государственный Университет
Физический Факультет
Кафедра плазмы

Квалификационная работа на соискание степени бакалавра

**ДВУХЦВЕТНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ
ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ**

Аверков Алексей Михайлович

Научные руководители:

Багрянский Пётр Андреевич
д.ф.-м.н., в.н.с ИЯФ СО РАН,
.....

Новосибирск 2003г

Содержание

1	Введение	3
2	Схема интерферометра	8
3	Регистрация фазы	11
4	Заключение	17
5	Благодарности	17

1 Введение

Метод оптической интерферометрии [1]— распространённый способ измерения линейной электронной плотности плазмы. Суть метода в определении фазового набега, набираемого волной при прохождении плазмы. Набег фазы определяется из сравнения двух волн, идущих по разным оптическим каналам, называемых в интерферометрической практике плечами. В плазме набег фазы пропорционален линейной электронной плотности:

$$\Delta\varphi = \frac{2e^2}{m_e c^2} \lambda \langle n_e l \rangle$$

где $\langle n_e l \rangle = \int n_e dl$.

Интерферометры позволяют измерять линейную плотность плазмы $\langle n_e l \rangle$ в широком диапазоне плотностей. Минимальная плотность, которая на сегодняшний день может быть зарегистрирована с помощью интерферометрии, составляет $\langle n_e l \rangle_{min} \sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Ограничение по плотности плазмы в первую очередь возникает по следующим причинам:

- Малая величина регистрируемой фазы;
- Случайная фаза, набираемая за счёт вибраций.

Фазовое разрешение интерферометра, то есть минимальная регистрируемая фаза сильно зависит от типа интерферометра. Так интерферометры различаются по способу деления плеч на:

- с пространственным разделением плеч;
- с частотным разделением плеч;
- иной принцип деления плеч.

Наиболее распространены схемы с пространственно разделёнными плечами, такие как интерферометры Майкельсона и Маха-Цендера. Точность

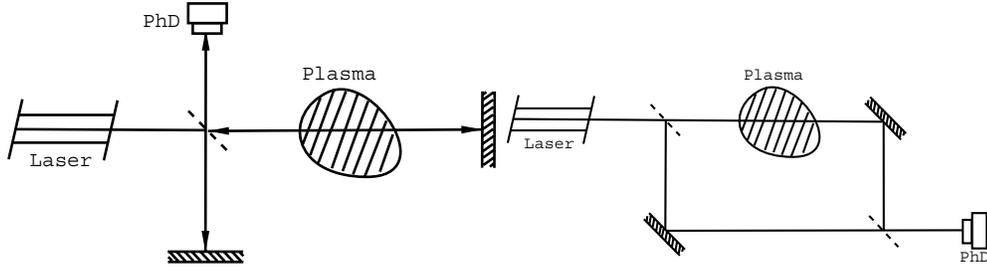


Рис. 1: Интерферометры Майкельсона и Маха-Цендера.

измерения по такой схеме напрямую зависит от качества сохранения длин плеч. Поэтому к вибрациям подобные интерферометры очень чувствительны.

При амплитуде колебания зеркала интерферометра a_0 , соответствующий набег фазы равен:

$$\Delta\varphi_{vib} = \pm 2\pi \frac{a_0}{\lambda}$$

Так при колебаниях зеркала величиной в 10^{-5} см на длине волны HeNe лазера, фаза случайным образом изменяется более чем на 1 рад.

Интерферометры с пространственным разделением плеч требуют специальных мер стабилизации. Например создания массивных станин из немагнитного материала. Также популярен способ механической ”отвязки” от установки, то есть размещения интерферометра вдали от установки.

При увеличении длины волны зондирующего излучения, увеличивается фаза набираемая в плазме и уменьшается влияние вибраций. В следствие этого в плазменных лабораториях мира доминируют интерферометры, собранные по схеме с пространственным разделением плеч, в субмиллиметровом диапазоне длин волн (TEXTOR, MST, LHD). Но с увеличением длины волны растёт влияние рефракции луча в плазме – отклонение от прямолинейного распространения на угол α :

$$\alpha \sim \frac{e^2}{m_e c^2} \lambda^2 \int \nabla n_e dl$$

На субмиллиметровых длинах волн угол α достигает 10^{-2} рад., что не позво-

ляет провести хороший эксперимент в специальных режимах работы с большими градиентами плотностей.

В начале 80-х двумя группами учёных (Хопф, Томита, Джумайли [5] и Островская, Алум, Ковальчук [6]) независимо был принят принцип частотного разделения плеч. Принцип подобной интерферометрии заключается в следующем. Через исследуемое вещество пропускают два пространственно совмещённых луча с разными частотами. Каждая волна набирает в среде соответствующий набег фазы. Результатом исследования является регистрация разности фаз между этими волнами. При исследовании подобным интерферометром плазмы, эта фаза пересчитывается в $\langle n_e l \rangle$ в соответствии с:

$$\Delta\varphi = \frac{2e^2}{m_e c^2} \langle n_e l \rangle \lambda_1 \left(1 - \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} \right)$$

В литературе такие интерферометры получили название двухцветные интерферометры (two color interferometer)

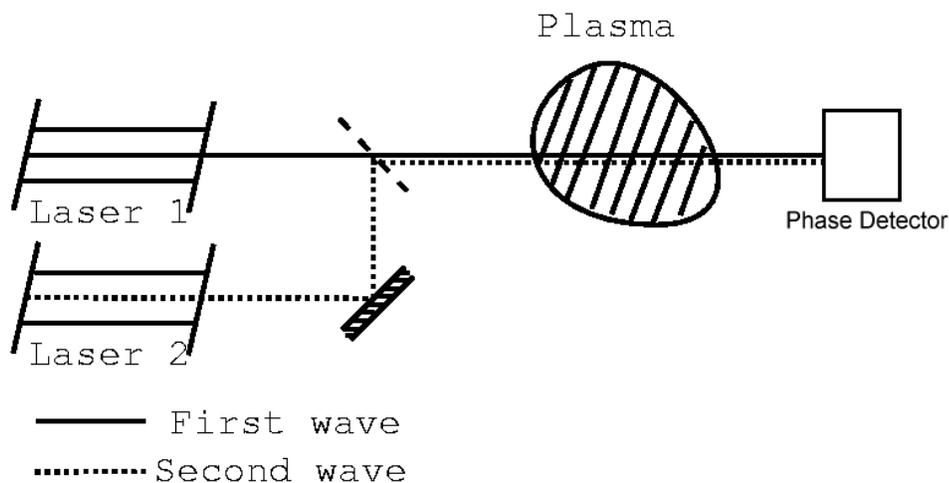


Рис. 2: Двухцветный интерферометр.

Такие интерферометрические системы гораздо устойчивее к вибрациям. Во многих плазменных лабораториях были установлены двухцветные интерферометры [2, 3, 4]. На установке LHD [2], например, двухцветный интерферометр установлен параллельно с субмиллиметровым интерферометром, увеличивая его возможности.

Большинство существующих двухцветных интерферометров для исследования плазмы собраны на основе зондирования плазмы при помощи двух лазерных пучков от различных источников, подобно как на рис.2. Но такая схема требует некоторой сложной работы по размещению интерферометра на рабочем месте. С этой точки зрения более удобен двухцветный интерферометр на основе генерации второй гармоники.

При прохождении волны частоты ω через среду с нелинейной дисперсией, в результате трёхволнового взаимодействия, образуется волна частоты 2ω . Таким образом имеется двухцветный интерферометр, включающий в себя только один источник когерентного излучения. Такая схема гораздо устойчивее к вибрациям. Кроме того такой интерферометр гораздо проще юстировать.

Для данной схемы при исследовании плазмы переход от измеряемой фазы к $\langle n_e l \rangle$ определяется по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{3}{2} \frac{e^2}{m_e c^2} \langle n_e l \rangle \lambda$$

где λ – рабочая длина волны лазера.

В 90-х годах в нескольких плазменных лабораториях (ГДЛ [7], Alcator C-mod [8, 9], KALIF [10]) были реализованы интерферометры на таком принципе. Все эти схемы сводились к следующему.

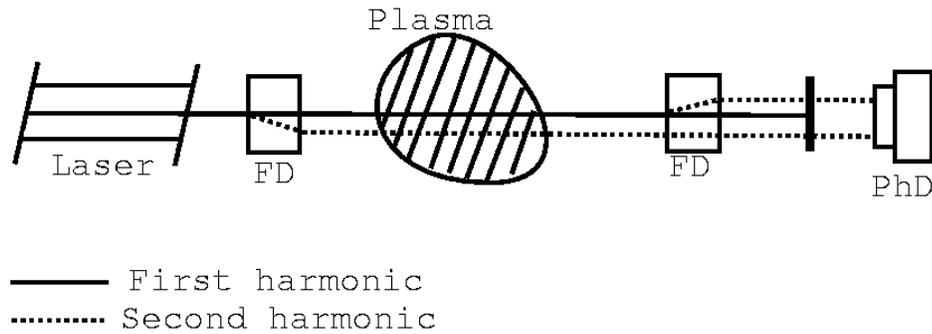


Рис. 3: Двухцветный интерферометр на генерации второй гармоники.

Луч Nd:YAG-лазера ω , проходя через нелинейный кристалл (например

LiB_3O_5 или KDP) (на рисунке обозначен как FD), эффективно генерировал вторую гармонику 2ω . Таким образом на выходе первого кристалла получался классический двухцветный интерферометр. Для регистрации свет ещё раз пропускался через нелинейный кристалл и наблюдалась интерференция двух волн частоты 2ω .

В настоящей работе предлагалось создание двухцветного интерферометра на Nd:YAG лазере с внутриврезонаторной генерацией второй гармоники. Работа обусловлена наличием на базе Института Лазерной Физики Nd:YAG лазера с нелинейным кристаллом внутри резонатора, обеспечивающий выход второй гармоники до 15%.

2 Схема интерферометра

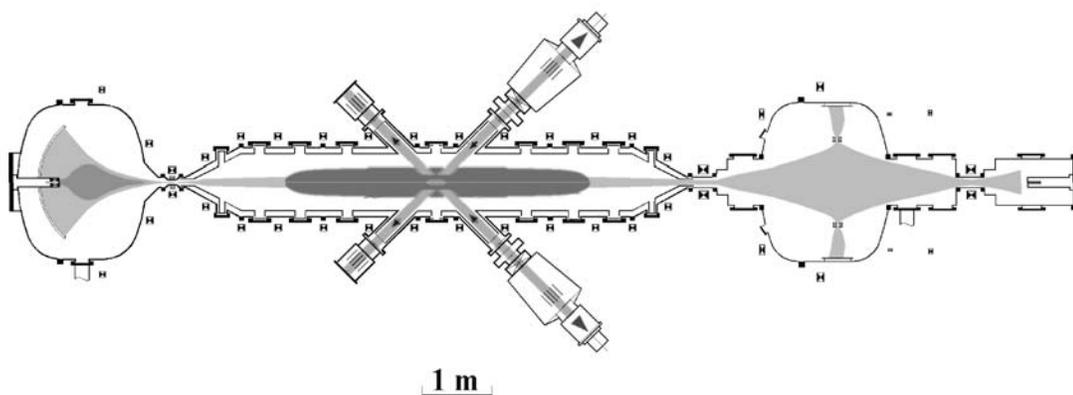


Рис. 4: Установке ГДЛ.

На установке ГДЛ был реализован макет двухцветного интерферометра. Расположен интерферометр был в центре ловушки. Таким образом влияние

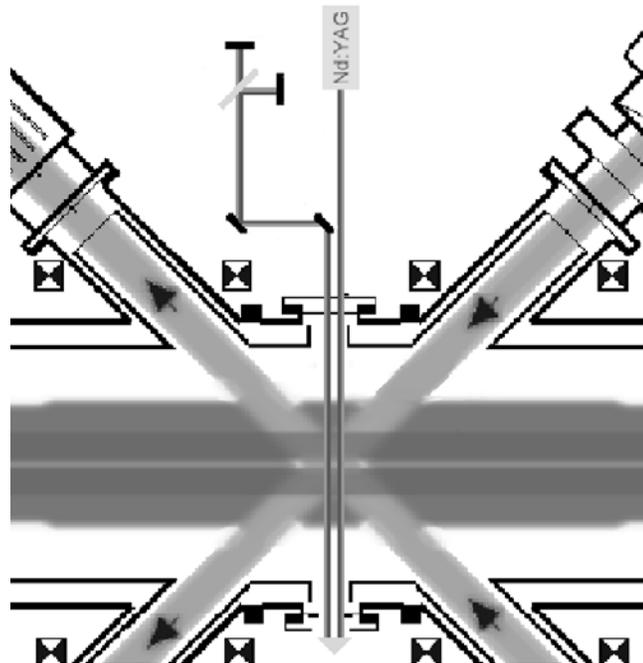


Рис. 5: Расположение интерферометра на установке ГДЛ.

магнитного поля было минимально, а параметры плазмы велики. Плотность плазмы в центре ловушки достигает $n_e \sim 5 - 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, а ширина плазмы $\sim 20 \text{ см}$.

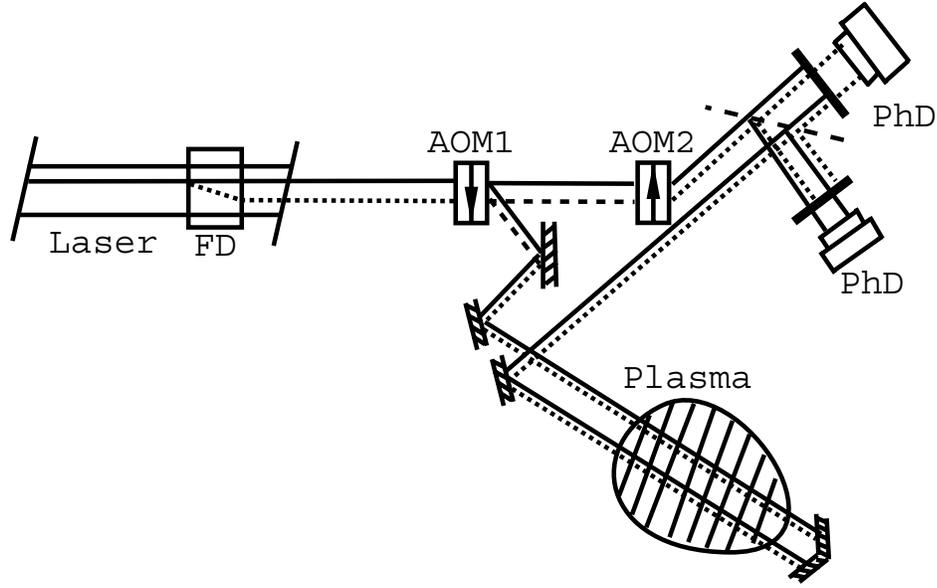


Рис. 6: Принципиальная схема интерферометра.

Собранный интерферометр основан на генерации второй гармоники на кристалле КТР (Калий-Титан-Фосфор) (на рисунке обозначен FD), помещённом внутри резонатора лазера. Внутррезонаторная генерация обеспечивает выход второй гармоники до 15%. Из лазера выходит две волны: рабочая длина волны 1.06 мкм и вторая гармоника 0.53 мкм. Мощность излучения в первой гармонике 200 мВт, во второй – 30 мВт. Кристалл КТР выбран по причине достаточно широкого угла стабильной генерации второй гармоники $\sim 1.5^\circ$, что делает его устойчивым к вибрациям.

Для смещения частоты используются два акусто-оптических модулятора (АОМ). Первый работает на частоте 80 МГц, второй на частоте 81 МГц. Имеет значение разностная частота модуляторов. Если бы модуляторы работали на одинаковых частотах, то возникают так называемые "ноль-биения"–режим, при котором сильно влияет низкочастотная наводка.

Модуляторы питаются от двух генераторов с фазовым согласованием. Поэтому разностная частота поддерживается с высокой точностью. Аппаратура позволяет перестраивать разностную частоту сигналом от внешнего генератора.

Акусто-оптический модулятор представляет собой бегущую волну и работает как дифракционная решётка. В нашем случае первый модулятор используется также для разделения волн на рабочий пучок $\omega - 2\omega$ и опорный пучок $\omega - 2\omega$. Первый порядок дифракции для инфракрасного света ω совпадает со вторым порядком дифракции для зелёного света 2ω . Пространственно совмещённые лучи, отклонённые в этих порядках дифракции направляются через входное окно в плазму. В качестве опорного пучка использовался свет, прошедший первый модулятор без отклонения, и отклонённый на втором.

В плазме лучи совершают два прохода, отражаясь от уголкового отражателя выполненного в виде треугольной призмы. В этих условиях волна приобретает набег фазы, равный $\Delta\varphi = 0.2$ рад.

Затем лучи, прошедшие через плазму, и опорные лучи "сбиваются" на полупрозрачном зеркале. Разностной частоте 1МГц соответствует частота биений инфракрасного света 1МГц и частота биений зелёного света 2МГц. "Сбитые" инфракрасные лучи направляются на один фотоприёмник (PhD), зелёные – на другой. Сигналы с фотоприёмников усиливались и поступали через полосовой RC-фильтр на три включенных блока АЦП-824 ($\tau_{min} = 20$ нс, 8 разрядов, 32кб памяти), включённых параллельно и запускающихся последовательно для увеличения времени записи. Таким образом интерферометр измерял изменение фазы в течении 3.9 мс. На один из каналов АЦП подавался сигнал частоты $\omega = 1$ МГц, на другой $2\omega = 2$ МГц. По их анализу и измерялась фаза.

3 Регистрация фазы

Сигналы обрабатывались по следующему алгоритму:

- Нахождение нуля сигнала;
- Линейная аппроксимация вблизи нуля [11] и нахождение пересечения с нулём по формуле:

$$\tau_0 = \tau_{+1} - \frac{H_+}{H_+ - H_-} (\tau_{+1} - \tau_{-1})$$

- Нахождение фазы на каждом периоде сигнала.

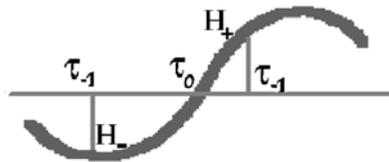


Рис. 7: Линейная аппроксимация вблизи нуля.

Было предложено несколько способов вычисления набега фаз:

- Способ первый**
- По известным пересечениям с нулём восстановить средний период T каждого сигнала за весь диапазон записи;
 - По известному периоду восстановить невозмущённые синусоиды;
 - Для каждого сигнала, сравнивая пересечения с нулём реальной синусоиды и невозмущённой синусоиды, на каждом периоде определить δx – насколько реальная синусоида ушла из-за возмущения;
 - По формуле $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta x}{T}$ на каждом периоде определить набег фазы для каждого сигнала;
 - Искомый набег фазы есть разность полученных фаз.

- Способ второй** – По известным пересечениям с нулём восстановить средний период T основной гармоники за весь диапазон записи;
- Сопоставить одновременные пересечения с нулём основной и второй гармоники, то есть пересечения с нулём для второй гармоники считать через один;
 - Сравнивая одновременные пересечения с нулём основной и второй гармоники, на каждом периоде определить δx – насколько основная гармоника ушла от второй гармоники в один и тот же момент времени;
 - По формуле $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta x}{T}$ на каждом периоде определить искомый набег фазы.

Ошибка определения фазы для обоих способов при обработке идеальных синусоид равна $\delta\Delta\varphi = \frac{1}{2} \frac{\delta H_+}{H_+} \sim 10^{-4}$ рад. Эта формула верна, если амплитуда идеальной синусоиды использует все 8 разрядов АЦП. По этой причине сигнал сперва проходил через двухканальный усилитель, после чего уже фильтровался и поступал на АЦП.

При анализе реальных сигналов, фаза, измеренная по первому способу, имела бóльшую ошибку, чем фаза, измеренная по второму способу, в то время как для идеальных сигналов результат был одинаковый. Объясняется это тем, что для первого способа накапливалась большая ошибка из-за более частого применения определённого с некоторой ошибкой периода. Кроме того, при больших наводках оба способа давали слишком противоречивые друг с другом результаты. Было решено остановиться на втором способе определения фазы, так как полученные результаты совпадали с характерным поведением плазмы и подтверждались определением плотности плазмы другим методом – дисперсионным интерферометром на CO_2 лазере.

Характерный вид сигнала во время выстрела на установке ГДЛ изображен на рис.8

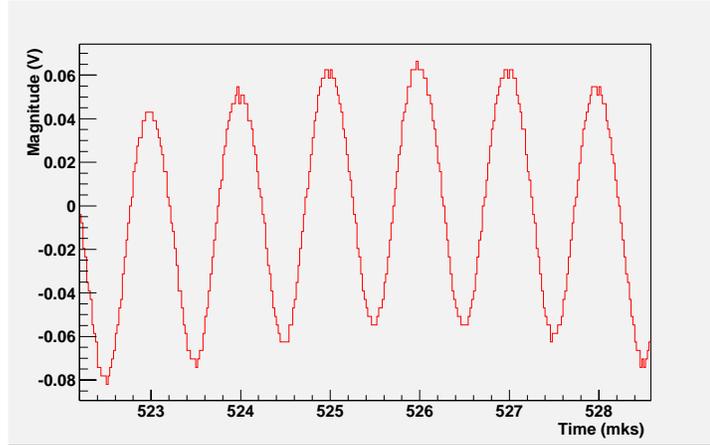


Рис. 8: Локальный вид сигнала.

При наличии шума амплитуды $a_0 \sim 1$ мВ и амплитуде сигнала $A_0 \sim 100$ мВ ошибка измерения составляет $\delta\Delta\varphi \sim 10^{-2}$ рад. Такая ошибка и была зафиксирована при холостом выстреле, что в единицах $\langle n_{el} \rangle$ соответствует $\langle n_{el} \rangle_{min} \sim 1.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

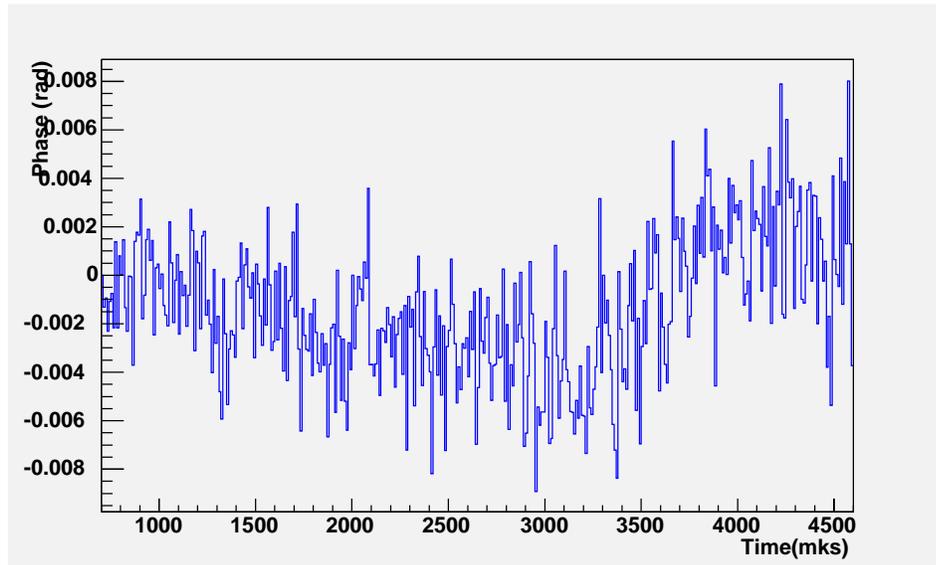


Рис. 9: Холостой выстрел.

Во время рабочего выстреле, на установке ГДЛ запускались импульсные магнитные поля для удержания плазмы. Интерферометр располагался в центре установки, где максимальное магнитное поле не превышало 1.8 кГс. Но

даже при таком поле влияние вибраций оптических элементов было существенно. Режим работы установки соответствовал включению плазменной пушки в момент времени 500 мкс и выключения в 3000 мкс.

Выстрел с включённой плазменной пушкой давал следующий результат:

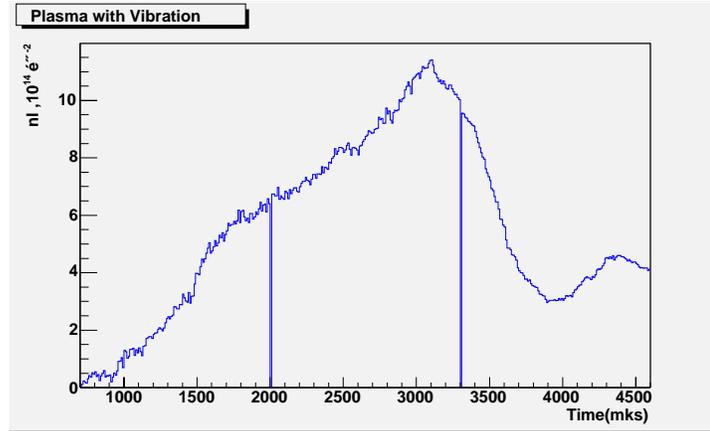


Рис. 10: $\langle n_{el} \rangle$ плазмы (усреднение по 16 выстрелам).

Проводя эксперимент в режиме с выключенной плазменной пушкой, с одним лишь магнитным полем, интерферометр регистрировал некоторое изменение фазы, соответствующее вибрациям магнитных элементов оптической схемы в магнитном поле. Величина этой фазы по порядку равнялась фазовому набегу в плазме. Характер изменения фазы соответствовал некоторой гармонической функции с периодом в несколько килогерц, со случайной начальной фазой. Было принято решение усреднить результаты серии выстрелов с магнитным полем. В результате усреднения по 18 выстрелам, вклад вибраций в $\langle n_{el} \rangle$ оказался на порядок меньше фазового набега в плазме (рис.11).

Серии из 18 выстрелов не достаточно для определения характера поведения вибраций. Если при увеличении количества выстрелов, среднее изменение фазы стремится к нулю, то достаточно усреднить выстрелы с плазмой, чтобы вклад вибраций уменьшился. Если же при увеличении количества выстрелов, среднее изменение фазы остаётся прежним, то вибрации связаны с

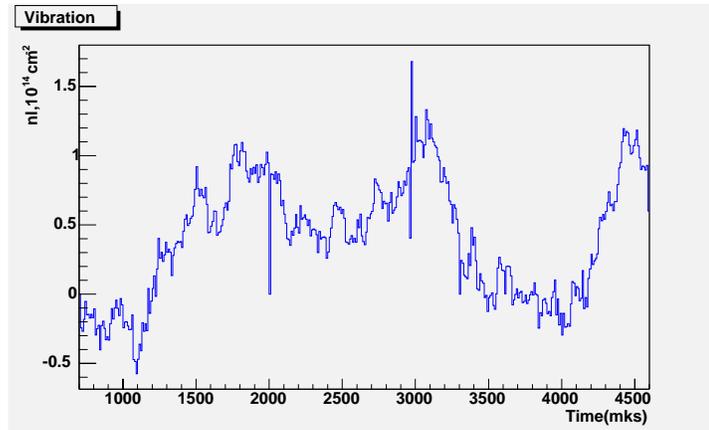


Рис. 11: $\langle n_e l \rangle$ плазмы за счёт вибраций (усреднение по 18 выстрелам).

моментами включения магнитных полей на установке, и эту фазу необходимо вычесть из фазового набега в плазме.

Вычитая вибрации получается следующая картина

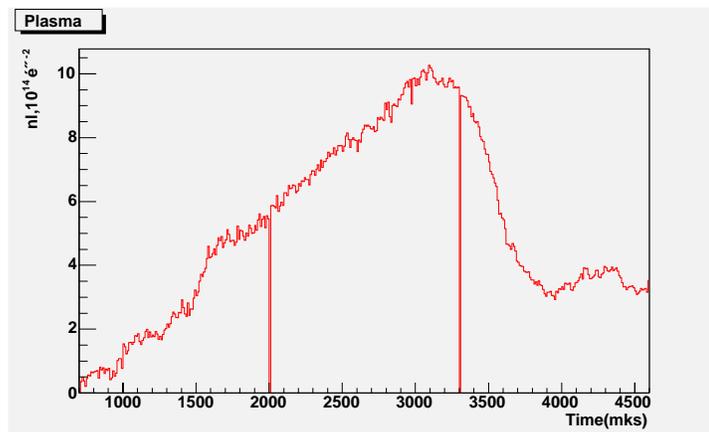


Рис. 12: $\langle n_e l \rangle$ плазмы с вычетом вибраций.

Было замечено, что после серии выстрелов с магнитным полем, вибрации заметно уменьшались, что говорит об улучшении юстировки вследствие встряски.

Диапазона измерения тремя АЦП не хватало для регистрации плотности плазмы на протяжении всего выстрела. Для подтверждения вывода, что наблюдаемый нами эффект есть эволюция плазмы, было проведено несколько

выстрелов в режиме включения регистрирующей аппаратуры в 0 мкс, для наблюдения характера поведения плазмы до включения пушки.

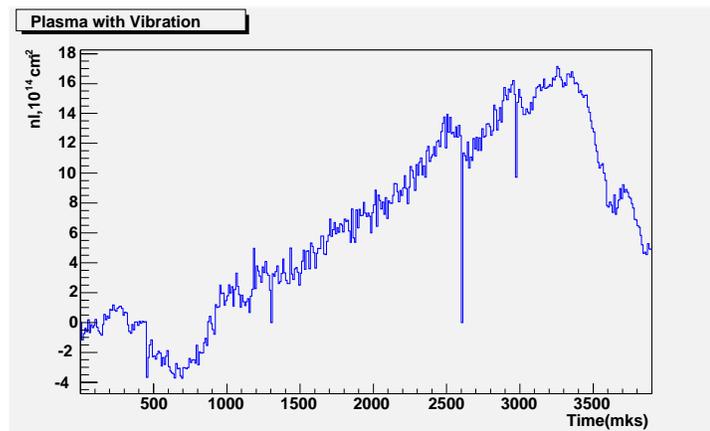


Рис. 13: $\langle n_{el} \rangle$ плазмы с характерной "полочкой" до включения плазменной пушки

Полученная фаза усреднялась по 10 мкс, чтобы устранить высокочастотную фазовую наводку, такую как наводка от плазменной пушки.

4 Заключение

Была проверена работоспособность двухцветного интерферометра на основе генерации второй гармоники. Ошибка определения линейной плотности плазмы составляет 10%.

Собранный интерферометр имеет фазовое разрешение $\langle n_{el} \rangle_{min} \sim 1.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и временное разрешение 10 мкс.

Причиной большого влияния вибраций являются следующие конструктивные недостатки:

- в оптической схеме использовались магнитные материалы;
- использовались не слишком жёсткие элементы оптической схемы;
- стол для размещения интерферометра закреплен на корпусе вакуумной системы.
- входное окно установки ГДЛ и уголкового отражателя имели высокую дисперсию, вследствие чего, из-за падения луча не под нормальным углом, фаза, набираемая в стёклах, сильно флуктуировала;

Планируется улучшить интерферометр по этим параметрам, и получить высокое фазовое разрешение.

Интерферометр на сегодняшний день работоспособен и готов к использованию на плазменных установках с высоким $\langle n_{el} \rangle$.

5 Благодарности

Мы выражаем благодарность Скворцову М.Н. за предоставленный лазер и активное участие в работе по созданию интерферометра.

Список литературы

- [1] *Э.П.Кругляков* Методы оптической интерферометрии в системах с магнитным удержанием плазмы, Препринт ИЯФ 86-165
- [2] *K.Kawahata, K.Tanaka* A two color millimeter-wave interferometer for the measurement of line integral electron density on Large Helical Device, Rev.Sci.Instrum. 70(1), 1999
- [3] *A.Canton, P.Innocente* Spatially scanned two-color mid-infrared interferometer for FTU, Rev.Sci.Instrum. 72(1), 2001
- [4] *B.V.Weber, S.F.Fulghum* A high sensitivity two-color interferometer for pulsed power plasma (abstract), Rev.Sci.Instrum. 68(1), 1997
- [5] *F.A.Hopf, A.Tomita, G.Al-Jumaily* Opt.Lett., 5, 386 (1980)
- [6] *Х.П.Алум, Ю.В.Ковальчук, Г.В.Островская* Письма в ЖТФ, 7, 1359 (1981)
- [7] *V.P.Drachev, Y.I.Krasnikov, P.A.Bagryansky* Dispersion interferometer for controlled fusion devices, Препринт Института Теплофизики 91-248
- [8] *N.L.Bretz, F.C.Jobes* The design of a second harmonic tangential array interferometer for C-mod, Rev.Sci.Instrum. 68(1), 1997
- [9] *N.L.Bretz, F.C.Jobes* A prototype imaging second harmonic interferometer, Rev.Sci.Instrum. 68(1), 1997
- [10] *F.Licht, H.Bluhm* A sensitive dispersion interferometer with high temporal resolution for electron density measurements, Rev.Sci.Instrum. 71(7), 2000
- [11] *В.Ф.Гурко, А.Н.Квашнин, Д.В.Моисеев, А.Д.Хильченко* Синхронная 128-канальная система регистрации импульсных сигналов, Препринт ИЯФ 2003-3