

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет: **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра: **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки: **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Черепановой Софьи Львовны

Тема работы: Развитие интерферометрической методики измерения
плотности плазмы на установке ГОЛ-НВ

«К защите допущена»

И.О. заведующего кафедрой

к.ф.-м.н.

с.н.с., ИЯФ СО РАН

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

с.н.с., ИЯФ СО РАН

Сковородин Д.И./_____

(подпись, МП)

Поступаев В.В./_____

(подпись, МП)

«_____» _____ 2022 г.

«_____» _____ 2022 г.

Дата защиты: «_____» _____ 2022 г.

Новосибирск — 2022 г.

Содержание

Введение	2
1 Установка ГОЛ-NB	5
2 Интерферометрические методики измерения плотности плазмы	9
2.1 Показатель преломления плазмы	9
2.2 Интерферометры	11
2.3 Оценка сдвига фаз для разных длин волн	15
2.4 Рефракция луча в плазме	16
3 Метод интерферометрии на установке ГОЛ-NB	17
3.1 О диагностике	17
3.2 Юстировка и тестирование диагностики	21
3.3 Эксперимент	24
4 Программа обработки сигналов	29
4.1 Обработка сигнала	29
4.2 Генерация модельных сигналов	30
Заключение	35
Благодарности	36
Список использованных источников	36

Введение

В середине прошлого века были выдвинуты первые предложения о возможности использования управляемого термоядерного синтеза в качестве источника энергии. Эти идеи практически сразу получили теоретическую реализацию – в 1950 году И. Е. Таммом и А. Д. Сахаровым был предложен первый дизайн токамака, в 1951 году Спитцер предложил дизайн стелларатора, а затем, чуть позже, в 1955 году, независимо друг от друга, Г. И. Будкер и Р. Ф. Пост предложили дизайн пробкотрона. Позднее был предложен усовершенствованный дизайн пробкотрона – многопробочная магнитная ловушка для удержания плазмы сверхвысокой плотности [1] [2]. Такая конструкция позволяла подавлять продольные потери в плазме, возникавшие в первой конструкции пробкотрона [3].

Сейчас в Институте ядерной физики на основе Газодинамической ловушки (ГДЛ) и ГОЛ-3 готовится новый проект – Газодинамическая многопробочная ловушка (ГДМЛ) [4]. Чтобы показать перспективность данной установки была собрана установка ГОЛ-НВ, целью которой является исследование тонкостей работы многопробочных секций и демонстрация возможности достижения более высоких параметров плазмы при добавлении в магнитную структуру газодинамической ловушки секций с многопробочным магнитным полем [5].

Для экспериментальной физики плазмы очень важной задачей является измерение плотности плазмы – необходимость её измерения возникла ещё во время первых экспериментов по её удержанию в магнитных ловушках. Одним из самых развитых и распространенных способов это сделать является интерферометрия. Конструкции интерферометров различны в зависимости от параметров установок, на которых они работают, и из-за развития самих ловушек с магнитным удержанием развиваются и методы интерферометрии.

Метод интерферометрии, как и другие оптические методы измерения средней плотности плазмы, основан на измерении параметров зондирующей волны в плазме. В случае интерферометрии это сравнение фазы опорной волны с фазой зондирующей волны, прошедшей через плазму. При этом зондирующая волна должна иметь линейную поляризацию, параллельную магнитному полю, направленному вдоль оси открытой ловушки, и распространяться поперек плазмы, а её частота должна быть много больше плазменной. В таком случае разность фаз между опорной волной и волной, прошедшей через плазму, будет интегралом средней плотности плазмы вдоль траектории зондирующего луча.

Очевидными преимуществами этого метода являются отсутствие необходимости абсолютной калибровки прибора, независимость от других диагностик и высокое временное разрешение. Однако, с другой стороны интерферометр — очень чувствительный прибор и в случае, когда величина собственных вибраций элементов оптической системы по порядку величины совпадает с длиной волны зондирующего излучения, то методика сильно теряет в точности и интерпретация результатов становится затруднительной.

Для измерения разности фаз созданы различные схемы оптические схемы интерферометров. Выбор конкретного вида диагностики во многом зависит от конкретных задач связанных с измерением плотности плазмы в ловушке. На установке ГОЛ-НВ выбор вида диагностики связан с необходимостью её максимальной чувствительности вследствие небольшого диаметра плазмы. Поэтому в рамках реализации интерферометрического метода измерения плотности плазмы на установке ГОЛ-НВ была использована схема интерферометра Майкельсона. В такой схеме луч проходит через плазму два раза, вследствие чего чувствительность методики к показателю преломления плазмы повышается, что также является важным преимуществом. Помимо этого, данная методика ранее применялась для измерения

линейной плотности плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3 и хорошо себя зарекомендовала [6].

Так как интерферометр работает непосредственно во время работы установки, то внешние поля могут оказывать вызывая помехи в его работе -- от вышеупомянутых вибраций установки до влияния внешнего поля на работу источника излучения или детектора. Поэтому прежде чем измерять линейную плотность плазмы с помощью данной диагностики необходимо проверить корректность настройки источника излучения и детектора и исследования влияния на них наводок от магнитного поля установки.

Таким образом целью данной работы является создание интерферометрической методики измерения линейной плотности плазмы для установки ГОЛ-НВ, включая программу обработки сигналов интерферометра. Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

- сборка элементов оптической системы интерферометра и закрепление в соответствии с проектной конфигурацией;
- юстировка интерферометра;
- тестирование интерферометра в режиме без плазмы и в эксперименте;
- исследование влияния магнитного поля на элементы диагностики;
- оценка возможных рефракций луча связанных с неоднородностями в плазме;
- подготовка программы обработки экспериментальной информации и тестирование на модельных сигналах.

1 Установка ГОЛ-NB

Первоначальная идея пробкотрона Будкера-Поста имела большие продольные потери и, согласно критерию Розенблюта-Лонгмайра, была МГД-неустойчива [7] [8]. Предложенная в [1] и [2] многопробочная конфигурация позволяла бороться с продольными потерями.

Это решение оказалось достаточно сложным в технической реализации, но, несмотря на это, ученые в Университете Беркли и ИЯФ АН СССР начали первые эксперименты с щелочной плазмой при температуре около 0,2 эВ [9] [10]. На установке ГОЛ-3 было продемонстрировано многократное увеличение времени жизни плазмы. Однако, это наблюдалось при плотности плазмы, много меньшей, чем было предсказано теоретически, из-за неклассического рассеяния частиц в турбулентных полях [6].

Полученные результаты привели к рассмотрению возможности применения многопробочных конфигураций в ловушках реакторного класса. Так появилась идея многопробочной ловушки ГОЛ-NB, которая продолжает линию экспериментов ГОЛ и создана с целью демонстрации возможности достижения более высоких параметров плазмы при добавлении в магнитную структуру газодинамической ловушки секций с многопробочным магнитным полем [5]. При этом в ГОЛ-NB были изменены конфигурация установки и система нагрева плазмы - между двумя многопробочными секциями длиной около 3 м каждая была добавлена небольшая газодинамическая ловушка длиной около 2,5 м, в которой происходит нагрев плазмы двумя одинаковыми нейтральными пучками суммарной мощностью 1,5 МВт и

энергией 25 кэВ (отсюда вторая часть аббревиатуры установки - neutral beams) [11].

На рис. 1.1 изображена схема установки ГОЛ-NB в полной конфигурации. В левом баке с расширителем магнитного потока расположен дуговой источник плазмы [12], в правом плазмодриемник. Расширители магнитного потока позволяют принимать плазму на плазмодриемник большей площади. Соленоиды по обе стороны от центральной ловушки с периодом гофрировки 0,22 м могут быть включены как в режим однородного поля (для стартовых экспериментов), так и в полноценную многопробочную конфигурацию. Профиль магнитного поля для каждого режима представлен на рис. 1.2. При этом максимальная индукция магнитного поля в пробках может достигать $B_{max} = 4,5$ Тл, при магнитной индукции в центральной ловушке до $B_0 = 0,3$ Тл.

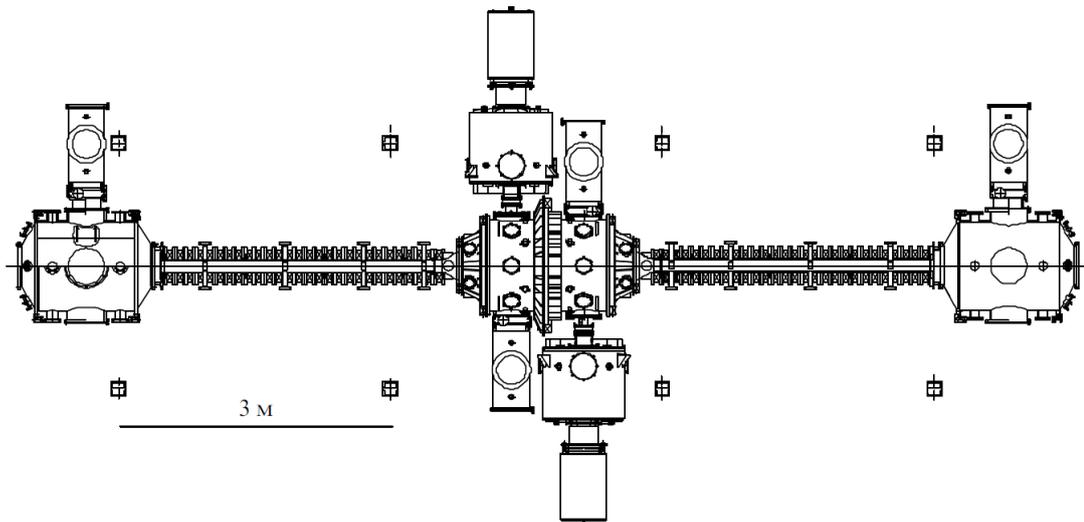


Рисунок 1.1: Схема установки ГОЛ-NB (вид сверху). Слева направо: бак расширителя магнитного потока с дуговым источником плазмы, многопробочный соленоид, центральная газодинамическая ловушка с двумя присоединенными инжекторами нейтральных пучков, многопробочный соленоид, бак расширителя магнитного потока с плазмодриемником [11].

Так как основной целью установки ГОЛ-NB не является достижение рекордных параметров плазмы, то на первый план непосредственно выходит демонстрация эффекта удержания в центральной газодинамической

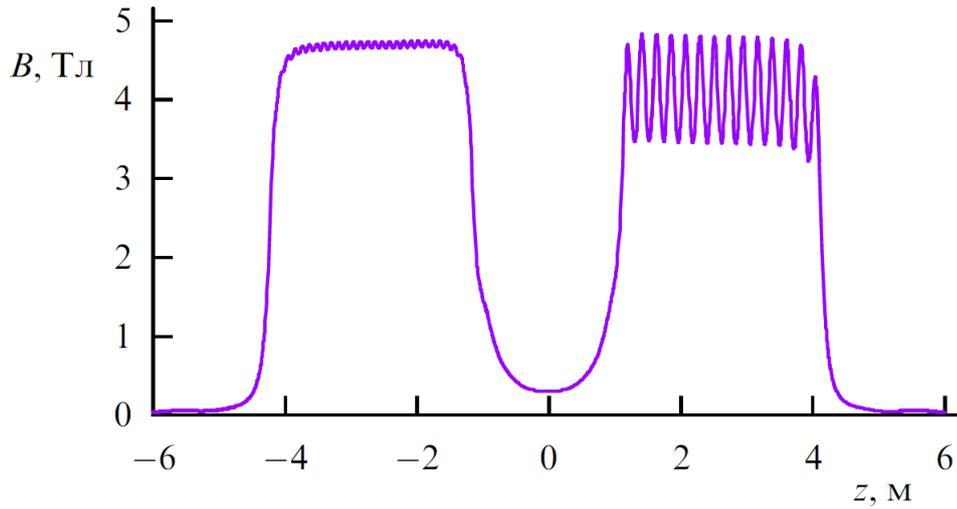


Рисунок 1.2: Профиль магнитного поля вдоль оси установки. Левый соленоид в режиме однородного поля, правый соленоид в многопробочном режиме [11].

ловушке. Однако, в отличие от ГДЛ, ГОЛ-НВ обладает меньшим размером газодинамической ловушки, меньшим пробочным отношением и более низкой мощностью нагрева, то и параметры плазмы ожидаются более скромными [11].

На рис. 1.3 обозначена область ожидаемых параметров плазмы в установке ГОЛ-НВ. Серая область соответствует условию $l \ll \lambda \ll L$, где l – расстояние между пробками, L – длина ловушки. Это условие ограничивает область в которой работает многопробочное удержание. На пунктирной кривой А отмечена точка, соответствующая выбранной начальной точке эксперимента с $n = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $T = 30 \text{ эВ}$ в газодинамическом режиме. Стрелка указывает ожидаемое направление изменения плотности и температуры плазмы при включении многопробочной секции [11]. Ожидается, что параметры плазмы в ходе экспериментальной программы ГОЛ-НВ могут достигать $T = 0,75 \text{ кэВ}$ и $n_e = 5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ [13].

Именно такими ожидаемыми параметрами плазмы и обусловлен выбор методики для измерения плотности плазмы на установке ГОЛ-НВ. Для измерения плотности плазмы во входной секции сильного поля в первых

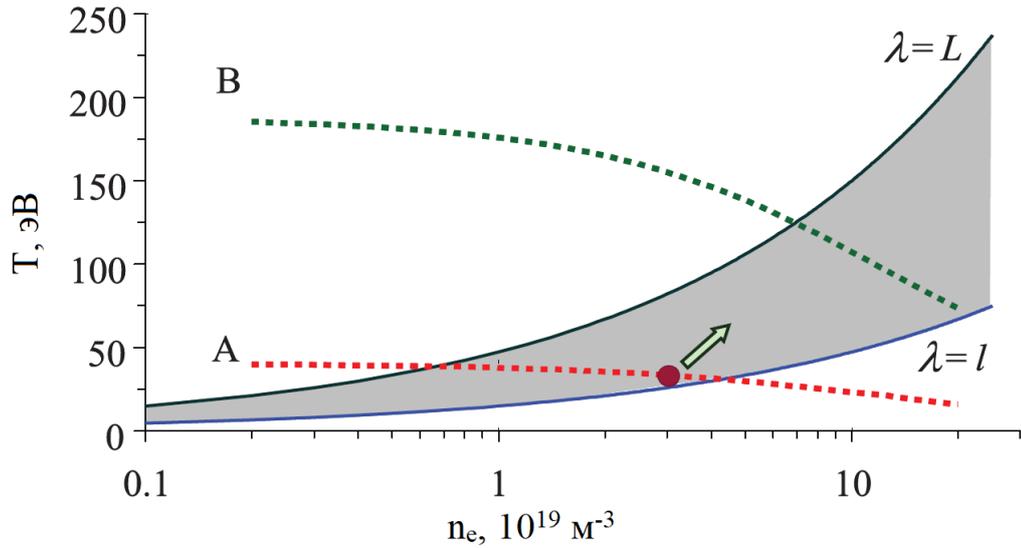


Рисунок 1.3: Область параметров плазмы в ГОЛ-NB. Кривые $\lambda = l$ и $\lambda = L$ ограничивают область эффективной работы многопробочной магнитной системы. Пунктирная кривая А – режим работы только центральной ловушки (без многопробочных секций), пунктирная кривая В – 10-кратное уменьшение продольных потерь [13].

экспериментах с $n_e = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $T \sim 40$ эВ для измерения плотности плазмы можно использовать Ленгмюровские зонды. Однако при нагреве плазмы до $T \sim 1$ кэВ желательно использование неконтактной диагностики. В ходе экспериментов на ГОЛ-3 с $T \sim 2 - 4$ кэВ и $n_e \sim 10^{21} \text{ м}^{-3}$ был использован интерферометр на инфракрасном CO_2 -лазере [6]. Таким образом, для измерения плотности плазмы во входной секции сильного поля была выбрана аналогичная интерферометрическая диагностика на основе инфракрасного CO_2 -лазера.

2 Интерферометрические методики измерения плотности плазмы

2.1 Показатель преломления плазмы

Плазма является квазинейтральным газом заряженных и нейтральных частиц, причем в качестве заряженных частиц, как правило, выступают электроны и положительно заряженные ионы.

Распространяясь в плазме, электромагнитная волна вызывает колебания заряженных частиц в ней. Эти колебания возбуждают вторичные электромагнитные волны, которые взаимодействуют с опорной волной. Это взаимодействие изменяет скорость распространения волны в плазме. Масса ионов примерно в 1800 раз больше массы электронов, а потому взаимодействие плазмы с электромагнитной волной это в первую очередь взаимодействие волны с электронами плазмы.

Когда в одну точку пространства сходятся две когерентные волны, они интерферируют:

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega t + \varphi_{01})$$
$$E_2 = E_{02} \sin(\omega t + \varphi_{02}),$$

где E_{01}, E_{02} - амплитуды волн E_1 и E_2 соответственно, ω - их частота, а φ_{01} и φ_{02} - начальные фазы. При этом интенсивность суммарной волны выражается через сумму квадратов амплитуд исходных волн и ещё одно

интерференционное слагаемое, зависящее от разности фаз волн:

$$I = \frac{E_{01}^2}{2} + \frac{E_{02}^2}{2} + 2\sqrt{\frac{E_{01}^2 E_{02}^2}{4}} \cos(\varphi_{01} - \varphi_{02}).$$

В фазу волны входит начальная фаза и фаза приобретенная при прохождении волны по своему оптическому пути:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_L N(l) dl.$$

Тогда разность фаз двух волн выражается через разность оптических путей:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\int_{L_1} N(l) dl - \int_{L_2} N(l) dl \right).$$

В нашей задаче средой распространения является плазма, поэтому подставим в полученное выражения показатель преломления плазмы.

Зная дисперсионное соотношение $k^2 c^2 + \omega_p^2 = \omega^2$, можно получить сначала фазовую скорость волны в среде как $v_{ph} = \omega/k$. А отношение скорости света к фазовой скорости волны в плазме есть квадрат показателя преломления плазмы. Таким образом:

$$N^2(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2},$$

где $\omega_p^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{m_e}$ – плазменная частота.

Из полученного выражения видно, что задача о взаимодействии плазмы с электромагнитной волной распадается на два случая – $\omega < \omega_p$ и $\omega > \omega_p$.

Рассмотрим сначала случай $\omega > \omega_p$. При этом $N = \sqrt{1 - \omega_p^2/\omega^2} \in \mathbb{R}$, что означает, что плазма пропускает через себя электромагнитную волну, не поглощая её.

В случае $\omega < \omega_p$ получаем $N^2 = 1 - \omega_p^2/\omega^2 < 0$. Таким образом, в диапа-

зоне $\omega < \omega_p$ показатель преломления плазмы – это комплексная величина с пренебрежимо малой вещественной частью. Однако, именно вещественная часть показателя преломления определяет длину электромагнитной волны в плазме, и в данном случае она получается больше чем в вакууме. Это, в свою очередь, означает что плазма не поглощает электромагнитную волну в диапазоне $\omega < \omega_p$, несмотря на то, что обладает чисто мнимым показателем преломления, а отражает её.

В данной работе мы ограничимся лишь рассмотрением случая $\omega \gg \omega_p$.

Таким образом после подстановки получаем:

$$\Delta\varphi \approx \frac{e^2}{mc^2} \lambda \int_0^l n_e(z) dz + \varphi_0. \quad (2.1)$$

2.2 Интерферометры

При измерении плотности плазмы интерферометрическим методом измеряется разность фаз между опорной электромагнитной волной и зондирующей электромагнитной волной, прошедшей через плазму. При этом желательно, чтобы поляризация зондирующей волны была линейной и параллельной магнитному полю, направленному вдоль оси открытой ловушки, и распространяться поперек плазмы. В таком случае разность фаз между опорной волной и волной, прошедшей через плазму, будет выражаться через интеграл средней плотности плазмы (формула 2.1).

Условие параллельности зондирующей волны является необязательным, так как если существует ненулевая составляющая поляризации ортогональная магнитному полю, то такая волна будет возбуждать в плазме необыкновенную волну, однако такая волна будет испытывать отсечку раньше, не влияя на измерения. Впрочем, все это верно только в том случае, когда

магнитное поле в плазме не имеет шири. В противном случае задача сильно усложняется, однако данный вопрос выходит за рамки данной работы [14].

Для измерения линейной плотности плазмы методом интерферометрии оптимально использовать простые, но точные оптические схемы, так как их проще тиражировать, что важно для крупных установок, на которых измерять плотность плазмы необходимо во многих точках. Среди интерферометров себя лучше всего зарекомендовали дисперсионный и двухцветный интерферометры, а так же интерферометры Маха-Цандера и Майкельсона. Рассмотрим их подробно.

В интерферометре Маха-Цандера (рис. 2.1) опорный луч разделяется на два с помощью делителя пучка ДП1, затем лучи отражаются от поворотных зеркал З1 и З2 соответственно, после чего проходят через делитель пучка ДП2. Таким образом на детектор приходит сигнал, пропорциональный косинусу сдвига фаз между пучками, с амплитудой, равной амплитуде исходного сигнала, то есть $U_{det} = U \cos(\delta\varphi)$. Однако такая косинусоидальная зависимость приводит к невозможности определить возрастает или убывает $\delta\varphi$ в случае, когда плотность плазмы увеличивается, а затем падает до нуля, не достигнув равновесного состояния [15].

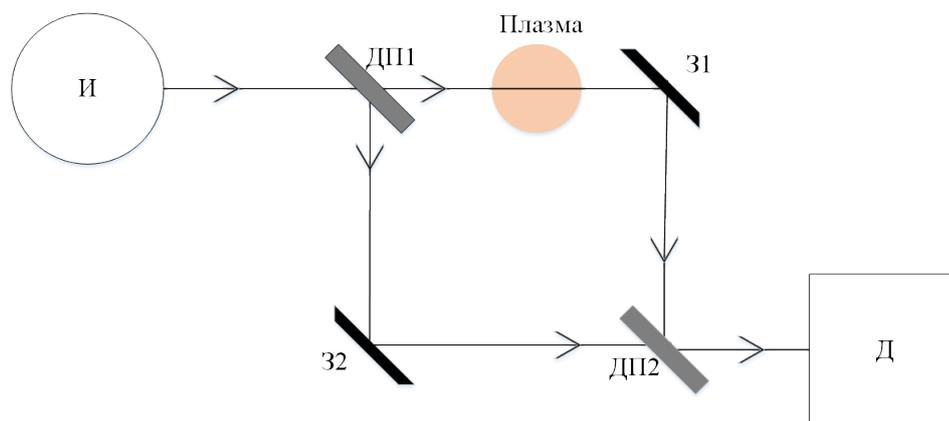


Рисунок 2.1: Схема интерферометра Маха-Цандера. И - источник излучения, ДП1, ДП2 - светоделительные пластины, З1 и З2 - зеркала, Д - детектор.

Простейшая схема интерферометра Майкельсона на рис. 2.2 состоит из

двух зеркал и светоделительной пластинки. Луч света, идущий от источника, попадает на светоделительную пластинку, где разделяется на два луча – один отражается, другой проходит насквозь. На пути обоих лучей стоят зеркала, от которых они отражаются под прямым углом и возвращаются обратно на светоделительную пластинку. При этом первый луч проходит её насквозь, а второй отражается от задней поверхности пластинки под прямым углом. Таким образом, два луча снова распространяются в одном направлении и попадают на детектор, который фиксирует разность фаз, набравшуюся между этими волнами [16].

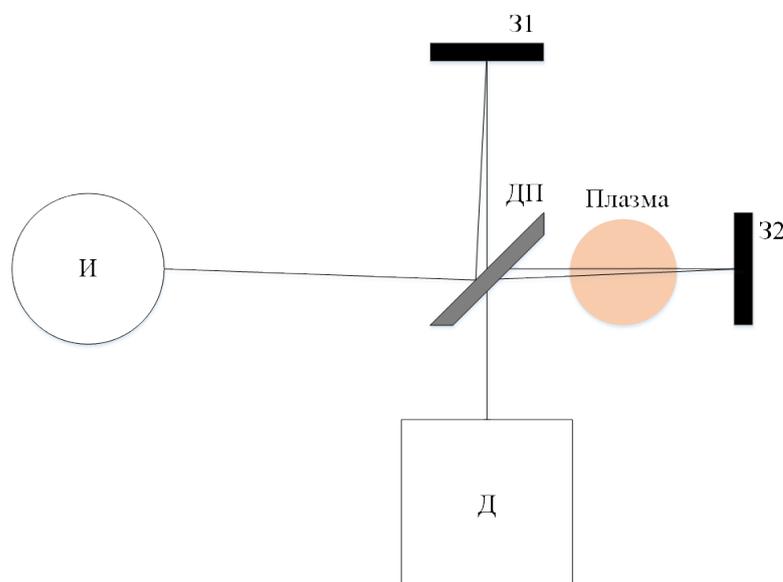


Рисунок 2.2: Схема интерферометра Майкельсона. И - источник излучения, ДП - светоделительная пластина, З1 и З2 - зеркала, Д - детектор.

В противовес схемам Майкельсона и Маха-Цанднера, в которых зондирующий и опорный лучи разделяются пространственно, часто отдается предпочтение схемам, в которых опорный и зондирующий лучи разделены по частоте или фазе. Например, диагностика с использованием дисперсионного интерферометра была успешно реализована на токамаке TEXTOR и на ГДЛ [17]. В простейшей конфигурации на рис. 2.3 дисперсионный интерферометр состоит из источника излучения, двух удвоителей частоты, фильтра и детектора. В такой схеме зондирующее излучение разделяется

за счет частичного преобразования первой гармоники излучения во вторую, а затем измеряется разность фаз между ними. Тогда:

$$\Delta\varphi \approx \frac{3e^2}{2mc^2} \lambda \int_0^l n_e(z) dz.$$

Такая схема обладает рядом важных преимуществ: лучи идут по одному пути, отсутствуют помехи связанные с вибрациями установки, рефракцией и вращением плоскости поляризации луча.

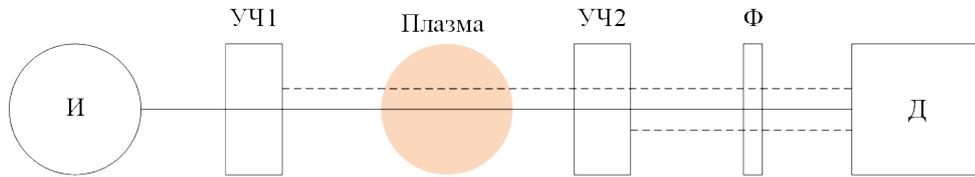


Рисунок 2.3: Схема дисперсионного интерферометра. И - источник излучения, УЧ1, УЧ2 - удвоители частоты, Ф - фильтр, Д - детектор.

Ещё один вариант реализации интерферометра в котором как и в дисперсионном интерферометре производится не пространственное разделение опорного и зондирующего лучей, а частотное, является двухцветный интерферометр, основанный на совмещении двух интерферометров с сильно отличающимися длинами волн $\lambda_1 \gg \lambda_2$ и фазами φ_1 и φ_2 . В них линейная плотность плазмы выражается через так называемую "скомпенсированную фазу":

$$nL = \frac{mc^2}{e^2} \frac{\lambda_1}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} \left(\varphi_1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \varphi_2 \right).$$

Такая диагностика была реализована в [18]. Однако такие интерферометры являются по сути двумя отдельными оптическими схемами для двух разных лазеров со схемой их объединения и, как правило, достаточно сложны в реализации.

Важнейшим преимуществом интерферометра Майкельсона над дисперсионным, двухцветным и интерферометром Маха-Цандера является чувствительность к показателю преломления плазмы. Так как в случае интер-

ферометра Майкельсона мы измеряем разность фаз между опорной волной и волной, дважды прошедшей через плазму (рис. 2.2), то его чувствительность в два раза выше чем чувствительности других схем, в которых зондирующий луч проходит через плазму только один раз (рис. 2.1).

2.3 Оценка сдвига фаз для разных длин волн

После выбора конфигурации интерферометра необходимо выбрать рабочую длину волны, и, соответственно, вид лазера. Для этого оценим набег фазы в зависимости от λ , используя выражение 2.1 и учитывая что средняя плотность плазмы в установке ГОЛ-НВ равна $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при диаметре плазмы 5 см:

$$\Delta\varphi \approx \frac{e^2}{mc^2} \lambda \int_0^l n_e(z) dz = 2\pi \cdot 2,81 \cdot 10^{-13} \cdot 3 \cdot 10^{13} \cdot 10 = 84,3 \cdot \lambda$$

В таблице 2.1 приведены некоторые виды лазеров и длин волн, используемые в интерферометрии, а так же соответствующие им значения сдвига фаз для установки ГОЛ-НВ. Видно, что оптимальным является CO_2 -лазер с длиной волны $\lambda = 10,6 \text{ мкм} = 10,6 \times 10^{-4} \text{ см}$.

Таблица 2.1: Сравнение величины набега фазы для разных длин волн

Вид лазера	Длина волны, мкм	$\Delta\varphi$, рад
HCN	337	2,84
H ₂ O	119	1
CO ₂	10,6	0,09
HeNe	3,39	0,03

2.4 Рефракция луча в плазме

При распространении электромагнитной волны в неоднородной плазме с градиентом электронной плотности эта волна преломляется, то есть траектория луча отклоняется от первоначальной. Оценим угол отклонения [19]:

$$\theta = \frac{1}{2\pi} \frac{e^2}{mc^2} \lambda^2 \int_L \nabla n_e(l) dl \approx \frac{1}{2\pi} \frac{e^2}{mc^2} \lambda^2 d \nabla n_e,$$

где $d = 5$ см - диаметр плазмы, $\lambda = 10,6 \times 10^{-4}$ см - длина волны используемого CO_2 -лазера. Для аксиально симметричного параболического профиля плотности плазмы с некоторым $n_{max} < n_{crit}$, максимальный угол рефракции можно оценить таким образом:

$$\theta_{max} = \sin \frac{n_{max}}{n_{crit}} \approx \frac{n_{max}}{n_{crit}}$$

Тогда для ГОЛ-НВ с $n_{crit} = 3 \times 10^{13}$ см⁻³ максимальный угол рефракции: $\theta_{max} = 8,97 \times 10^{-14} n_{crit} \lambda^2 = 3 \times 10^{-6}$ рад. Такой угол отклонения вызовет смещение луча на $\sim 0,0003$ мм при размере пучка $D = \sqrt{\lambda z} = \sqrt{10,6 \cdot 10^{-4} \cdot 400} \approx 0,6$ см при длине оптического пути $z = 400$ см [14].

Таким образом, рефракционным отклонением зондирующего луча на различных неоднородностях в плазме можно пренебречь.

При этом важно отметить, что для корректности измерений необходимо настроится на центр плазмы. Согласно данным зондовых измерений и фотографий свечения плазмы центр плазмы примерно совпадает с центром диагностических окон, через которые проводится луч лазера.

3 Метод интерферометрии на установке ГОЛ-NB

3.1 О диагностике

Для диагностики линейной плотности плазмы была выбрана схема интерферометра Майкельсона, модифицированная под особенности установки ГОЛ-NB. На рис. 3.1 и рис. 3.2 представлена схема интерферометра для диагностики линейной плотности плазмы на установке ГОЛ-NB в вертикальной и горизонтальной проекциях.

В данной схеме луч, генерируемый инфракрасным CO_2 -лазером, проходит сначала через селенидцинковую пластику 9 и диафрагмы 17, после чего попадает на отражающее зеркало-половинку 2, расположенное под углом $\sim 45^\circ$. На этом зеркале луч разворачивается, а затем на зеркалах 3 и 4 поднимается на уровень установки и направляется на светоделительную пластину 6. Зеркала 3 и 4 и светоделительная пластина 6, так же как и поворотное зеркало 2, расположены под углом $\sim 45^\circ$ к траектории луча. От светоделительной пластины идет два луча - один вниз на опорное зеркало на пьезоэлементе 15, а другой проходит сквозь пластину, селенидцинковое окошко 10, вакуумную камеру с плазмой и ещё одно селенидцинковое окошко 11 и попадает на рабочее зеркало 5. Луч отражается от этого зеркала под небольшим углом обратно в вакуумную камеру и, затем, снова проходит через светоделительную пластину 6. Опорный луч отражается обратно

от зеркала 15 и возвращается на светоделительную пластину 6, отражаясь от неё. Далее каждый из лучей попадает на зеркала 4 и 3 которые опускают их на уровень детектора 7. При этом оба луча проходят через верхнюю пустую "половинку" поворотного зеркала 2 и попадают на детектор 7.

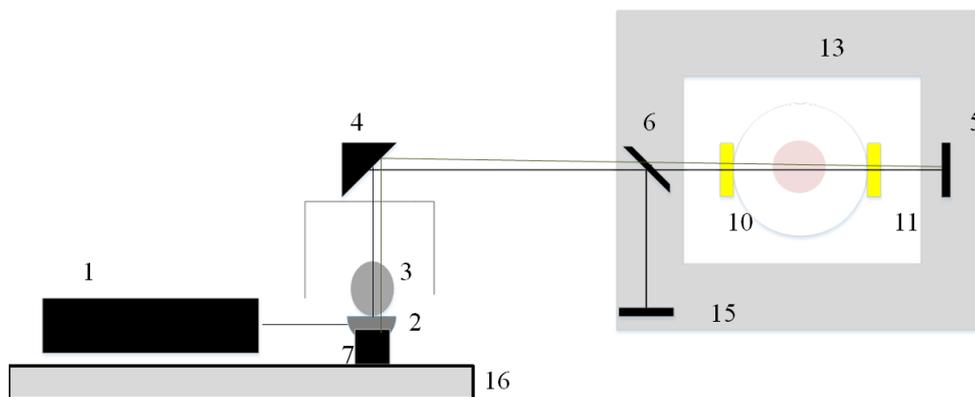


Рисунок 3.1: Схема интерферометра вертикальной проекции: 1 — инфракрасный CO_2 -лазер; 2, 3, 4, 5 — зеркала; 6 — светоделительная пластинка; 10, 11 — окошки вакуумной камеры из $ZnSe$; 12 — плазменная камера; 13 — диэлектрическая станина; 14 — вертикальная стойка для поднятия луча на уровень окошек установки; 15 — опорное зеркало на пьезоэлементе; 16 — стабилизирующий стол.

Для реализации данного интерферометра был выбран инфракрасный CO_2 -лазер L50G Access Laser с рабочими длинами волн 9,2 – 10,7 мкм, мощностью до 18 Вт, диаметром пучка на выходе 2,4 мм. Такие газовые лазеры используют в качестве рабочей среды газовую смесь – в случае углекислотного лазера это сам углекислый газ CO_2 , азот N_2 , гелий He , водород H_2 и ксенон Xe . При этом непосредственно в генерации участвуют только азот и углекислый газ, остальные газы добавляются в смесь для увеличения КПД. Сначала возбуждаются колебания молекулы N_2 . Так как разность колебательных энергий между первым колебательным уровнем азота и первым колебательным уровнем асимметричной валентной моды ν_3 колебаний молекулы CO_2 мала (разница между ними около 18 см^{-1}) по сравнению с кинетической энергией, то эта колебательная энергия легко переходит от азота к углекислому газу. Первому колебательному уровню

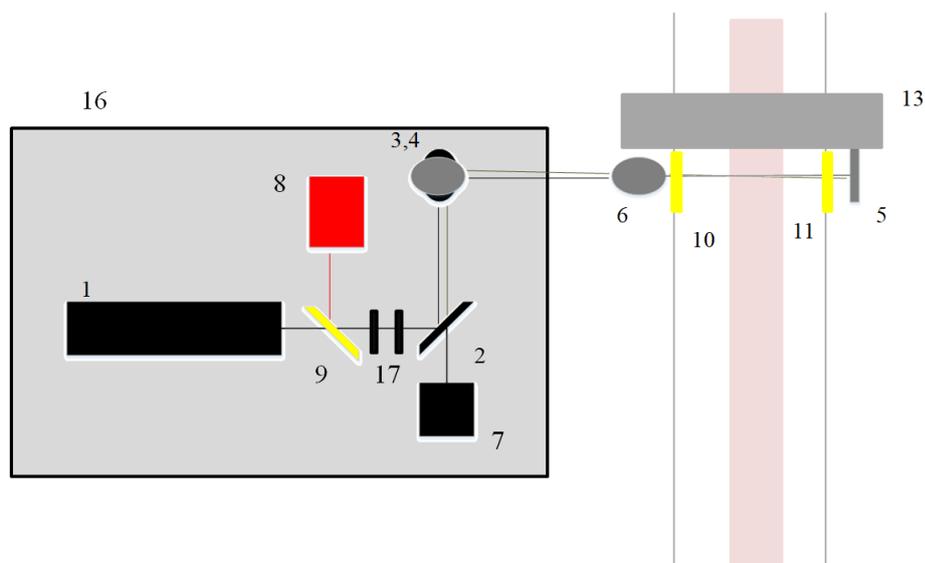


Рисунок 3.2: Схема интерферометра в горизонтальной проекции: 1 — инфракрасный CO_2 -лазер; 2, 3, 4, 5 — зеркала; 6 — светоделительная пластина; 7 — детектор; 8 — красный лазер; 9 — пластинка из $ZnSe$; 10, 11 — окошки вакуумной камеры из $ZnSe$; 13 — диэлектрическая станина; 16 — стабилизирующий стол; 17 — диафрагмы.

асимметричной валентной моды ν_3 соответствует состояние 00^01 . Из этого состояния возможно два генерационных перехода — на первую колебательную моду симметричной валентной моды ν_1 (состояние 10^00) и на второй колебательный уровень деформационной моды ν_2 (состояние 02^00). Первому переходу соответствует длина волны 10,6 мкм, а второму 9,5 мкм [20]. Выбор конкретной длины волны обусловлен в 2.3.

Для детектирования сигнала используется фотоэлектрический детектор на основе эпитаксиальной гетероструктуры $HgCdTe$ с термоэлектрическим охлаждением PVI-2TE-10.6 Vigo System. Оптимальной длиной волны является $\lambda_{opt} = 10,6$ мкм с детектирующей способностью на ней не менее 1×10^9 см·Гц^{1/2}/Вт. Окошко детектора покрыто антибликовым покрытием из селенида цинка для предотвращения помех. Максимально допустимое напряжение $U_{max} = 1,3$ В, рабочая температура детектора $T_{det} = 230$ К, угол захвата $\sim 36^\circ$.

Так как для интерферометра был выбран инфракрасный лазер, то оптические элементы интерферометра были подобраны специально для ра-

боты в данном диапазоне излучения. Так, все зеркала имеют золотое покрытие, а окошки вакуумной камеры установки выполнены из селенида цинка, прозрачного в инфракрасном диапазоне. Помимо этого, для борьбы с многочисленными бликами, возникающими в различных элементах оптической системы, селенидцинковые окошки вакуумной камеры установлены не в строго перпендикулярной к лазерному лучу плоскости, а под углами – одно в горизонтальной проекции, другое в вертикальной.

Зеркала установлены таким образом, чтобы поляризация электромагнитной волны была линейной и параллельной магнитному полю, направленному вдоль оси открытой ловушки, а сама электромагнитная волна распространялась поперек плазмы. Это обеспечивает возможность определения линейной плотности плазмы из уравнения 2.1.

В дальнейшем к нижнему отражательному зеркалу на пьезоэлементе 15 на рис. 3.1 планируется присоединить источник питания для осуществления процедуры калибровки сигнала интерферометра.

Спецификой измерений для которых создается диагностика обусловлено использование немагнитных материалов непосредственно вблизи установки. Все крепежные элементы для светоделительной пластины и рабочего и опорного зеркал, закрепленных на электрической станине 13, сделаны из капролона. А для обеспечения стабильной работы элементов диагностики, подверженных влиянию магнитного поля, таких как детектор, изготовлена специальная магнитная защита.

Ещё одна особенность связана с выбором места расположения детектора. Наиболее простым, на первый взгляд, решением является размещение детектора на электрической станине 13 прямо над светоделительной пластиной 6. В этом случае на детектор попадал бы зондирующий луч отраженный от светоделительной пластины и опорный луч прошедший сквозь неё. Однако близость детектора, чувствительного к изменению магнитного поля, к магнитной системе установки требовала бы магнитной защи-

ты детектора. Такая защита обычно представляет металлическую коробку с толстыми стенками, которая требовала бы сложной системы подвески, вследствие невозможности закрепления на станине, и искажала бы магнитное поле рядом с собой. Поэтому была выбрана конфигурация, в которой детектор расположен на столе 16, где установка магнитного экрана не сопряжена с вышеуказанными сложностями.

Красный лазер 8, селенидцинковая пластина 9 и диафрагмы 17 использовались для юстировки системы. При этом селенидцинковая пластина играла роль поворотного зеркала для юстировочного луча красного лазера. Это было сделано чтобы совместить траектории лучей красного и инфракрасного лазера без установления красного лазера на пути инфракрасного.

3.2 Юстировка и тестирование диагностики

После сборки всех оптических элементов и закреплении их на диэлектрическом столе и диэлектрической станине было произведено подключение диагностики к системе синхронизации установки ГОЛ-НВ. На рис. 3.3 изображен сигнал CO_2 -лазера, полученный на детекторе, после импульса осуществленного с системы синхронизации. В начале сигнала заметны шумы с частотой около 2 кГц, связанные с особенностями работы источника питания лазера. Данный эффект прослеживается так же и в более поздних сигналах, полученных на интерферометре.

Так как инфракрасный CO_2 -лазер невидим для человеческого глаза, то процедура юстировки проводилась с помощью красного лазера. При этом на начальных этапах юстировки в оптической системе отсутствовала светоделительная пластинка, а окошки вакуумной камеры не были еще заменены на селенидцинковые.

После грубой настройки оптической системы красным лазером была установлена светоделительная пластинка и селенидцинковые окошки, про-

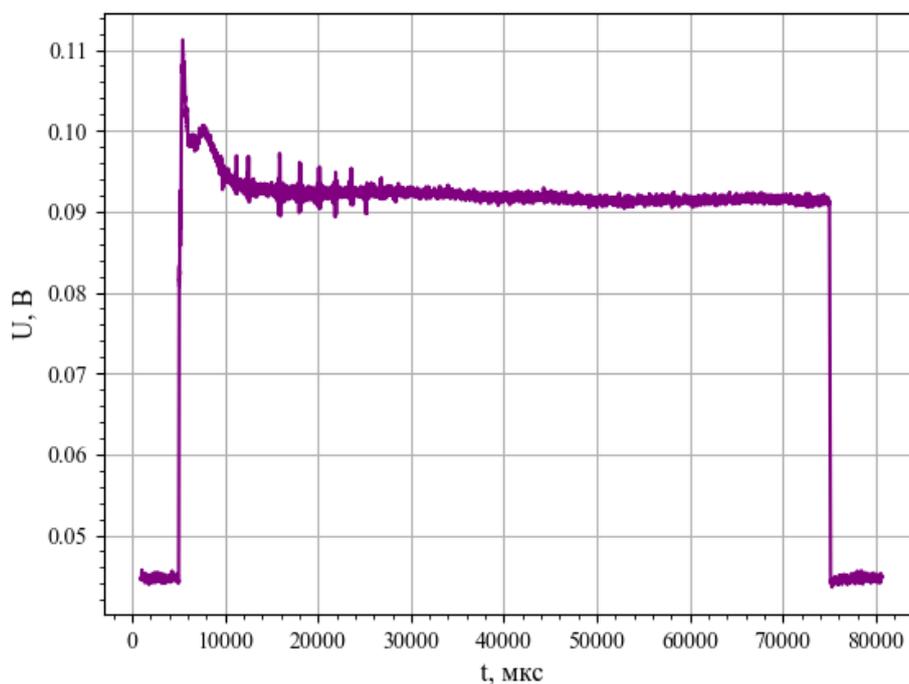


Рисунок 3.3: Тестовый сигнал CO_2 -лазера. В тестовой конфигурации лазерный луч не проходил через всю оптическую систему, а практически сразу попадал в детектор.

зрачные в инфракрасном диапазоне, и началась процедура юстировки с использованием инфракрасного CO_2 -лазера с помощью термочувствительных пластинок. Такие пластинки обладают достаточной чувствительностью, чтобы детектировать импульс CO_2 -лазера длительностью от нескольких миллисекунд. Это позволило отъюстировать оптическую систему и получить первые сигналы без плазмы.

На рис. 3.4, 3.5 и 3.6 изображены зондирующий луч, опорный луч и оба луча вместе. Заметная разница в амплитуде отдельно зондирующего и опорного лучей объясняется тем, что зондирующая волна, дважды проходящая через светоделительную пластинку, сильно поглощается в ней, что в целом, однако, не должно затруднять интерпретацию экспериментальных данных (подробнее о выборе именно такой конфигурации в разделе 3.1).

Так как возможности повысить амплитуду зондирующего луча нет, то было принято решение ослаблять амплитуду опорного луча. Для этого

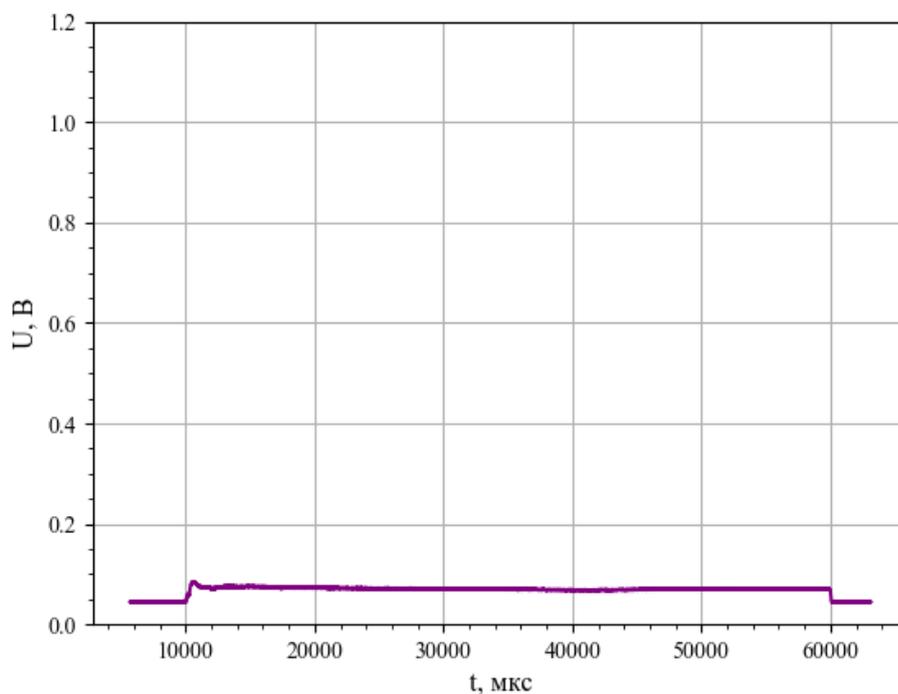


Рисунок 3.4: Сигнал от зондирующий луча. Масштаб выбран для наглядного сравнения с сигналом опорного луча (рис. 3.5).

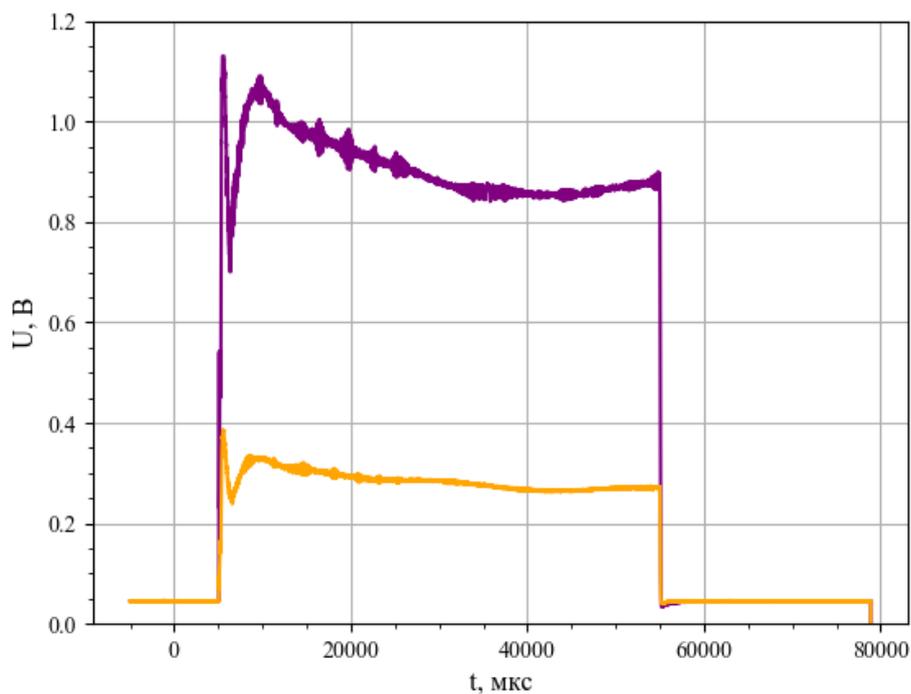


Рисунок 3.5: Сигналы от опорного луча: фиолетовая линия - опорное зеркало ничем не перекрыто, оранжевая линия - опорное зеркало накрыто тонким тефлоном для ослабления амплитуды луча.

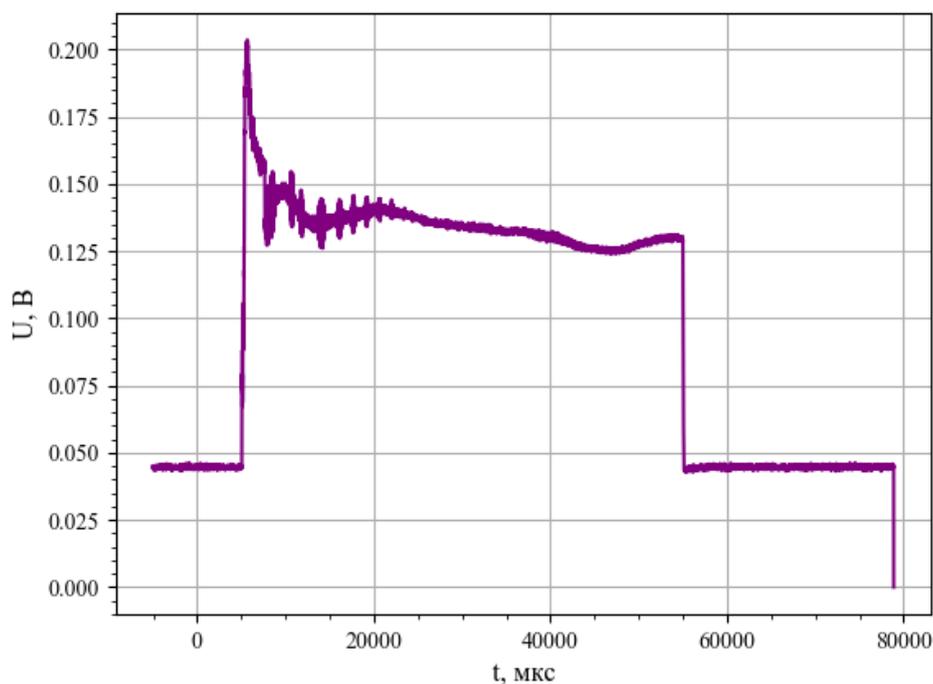


Рисунок 3.6: Сигнал от двух лучей. Во всех случаях опорное зеркало накрыто тонким тефлоном для ослабления амплитуды луча.

опорное зеркало было накрыто тонким слоем тефлона. Эффект виден на рис. 3.5 – ему соответствует оранжевая линия. Такое решение пусть и не уравнивает амплитуды двух лучей, но, по крайней мере, делает их примерно одного порядка. Попытка накрыть опорное зеркало более толстым тефлоном приводит к практически полному поглощению тефлоном опорного луча.

Так же стоит отметить наличие на графиках (на рис. 3.4 эти шумы не заметны из-за выбранного вертикального масштаба) тех же шумов на частоте около 2 кГц, что и на рис. 3.3. Как было сказано выше, данные обусловлена особенностями работы источника питания лазера.

3.3 Эксперимент

После завершения процесса юстировки и получения первых сигналов с интерферометра без плазмы были начаты эксперименты на установке ГОЛ-

NB с использованием интерферометрического метода измерения линейной плотности плазмы. Измерения проводились в двух режимах: с магнитным полем в соленоиде $B = 2,25$ Тл и $B = 4,5$ Тл.

На рис. 3.7 изображен сигнал от лазера с бликом от рассеивателя. Видно что магнитное поле не влияет на работу лазера и детектора, однако есть наводка от магнитного поля.

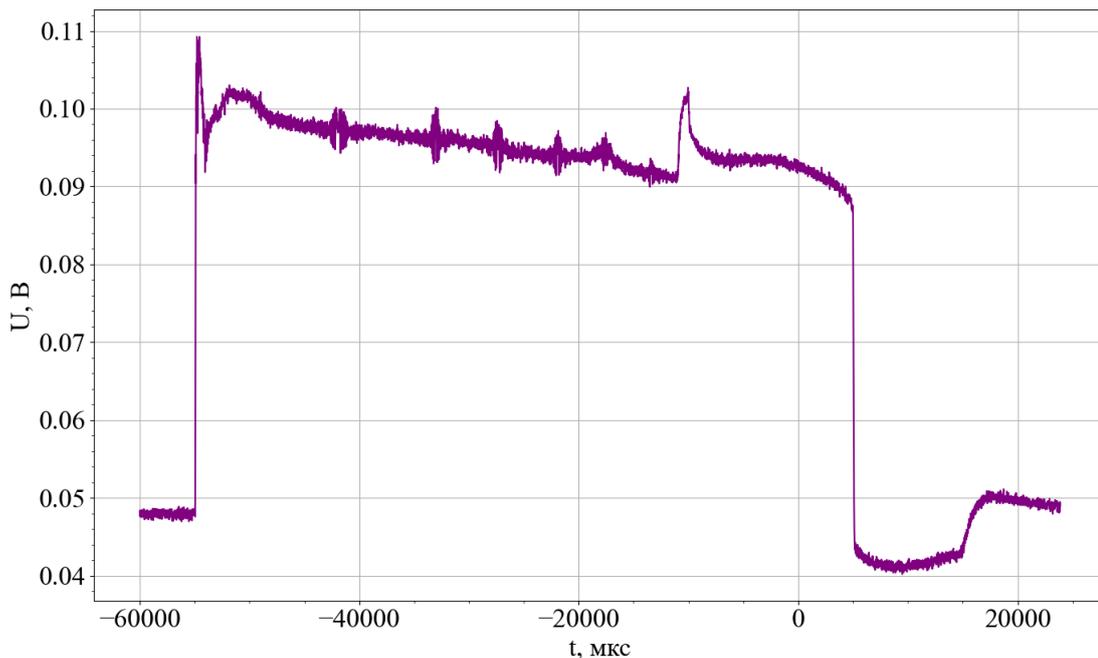


Рисунок 3.7: Сигнал от лазера с бликом от рассеивателя при включении магнитного поля.

На рис. 3.8 изображены две интерферограммы от короткого лазерного импульса и осциллограмма z -компоненты производной магнитного поля $\frac{dB_z}{dt}$ в центральной ловушке. Магнитное поле в соленоиде $B = 4,5$ Тл включается в момент времени $t = -13,5$ с (относительно включения плазмы). Видно, что после установления магнитного экрана толщиной 1 см на детектор (оранжевая линия) наводка от магнитного поля уменьшается. Вероятно, магнитное поле так же оказывает влияние на источник питания детектора, который так же нуждается в магнитной защите.

Время существования плазмы в установке видно по появлению двуполлярного высокочастотного сигнала на сигнале $\frac{dB_z}{dt}$.

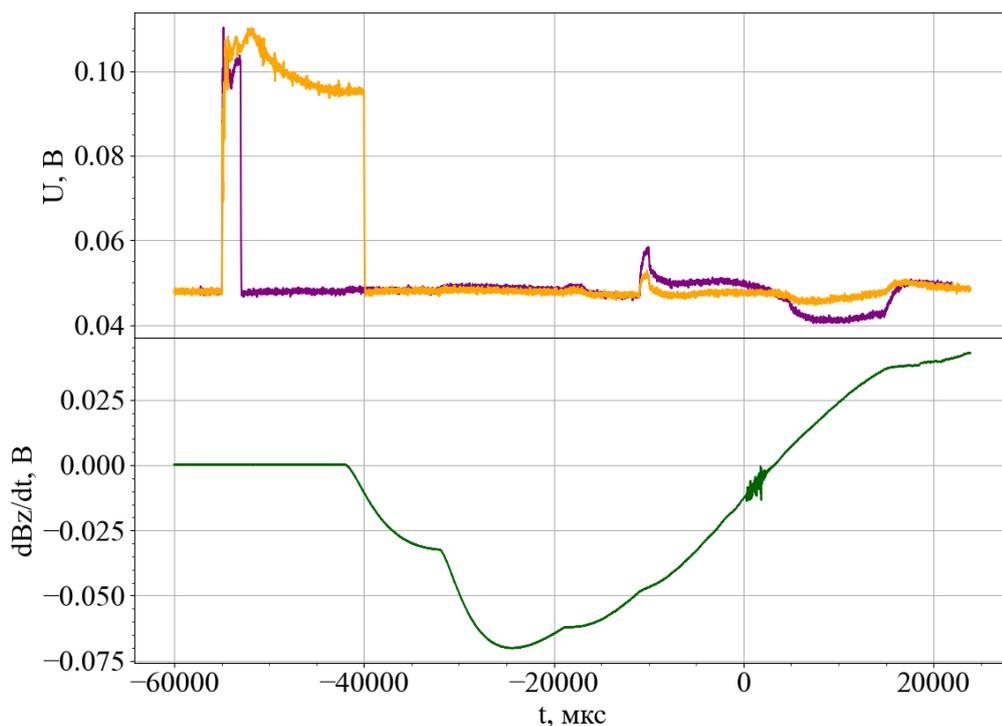


Рисунок 3.8: Интерферограммы от короткого лазерного импульса и осциллограмма z -компоненты производной магнитного поля $\frac{dB}{dt}$ в центральной ловушке. Фиолетовая интерферограмма - до установки магнитного экрана толщиной 1 см на детектор, оранжевая - после.

Затем в эксперименте были последовательно включены рабочий, опорный и оба луча вместе при длительном импульсе лазера для исследования интерференционной картины. На верхнем графике изображен сигнал от опорного луча, на среднем – сигнал от рабочего луча, на нижнем – рабочий режим интерферометра.

Из полученных интерферограмм видно, что:

1. Помимо полезного сигнала, идущего по расчётному оптическому пути, детектор регистрирует паразитные блики, идущие от тех элементов конструкции, на которых часть лазерного луча обрезается из-за апертурных ограничений. Особенно заметно это для рабочего луча в силу его меньшей интенсивности. Эти проблемы были обнаружены только после включения магнитного поля установки. Прежде чем можно будет бороться с вибрациями и другими проблемами системы,

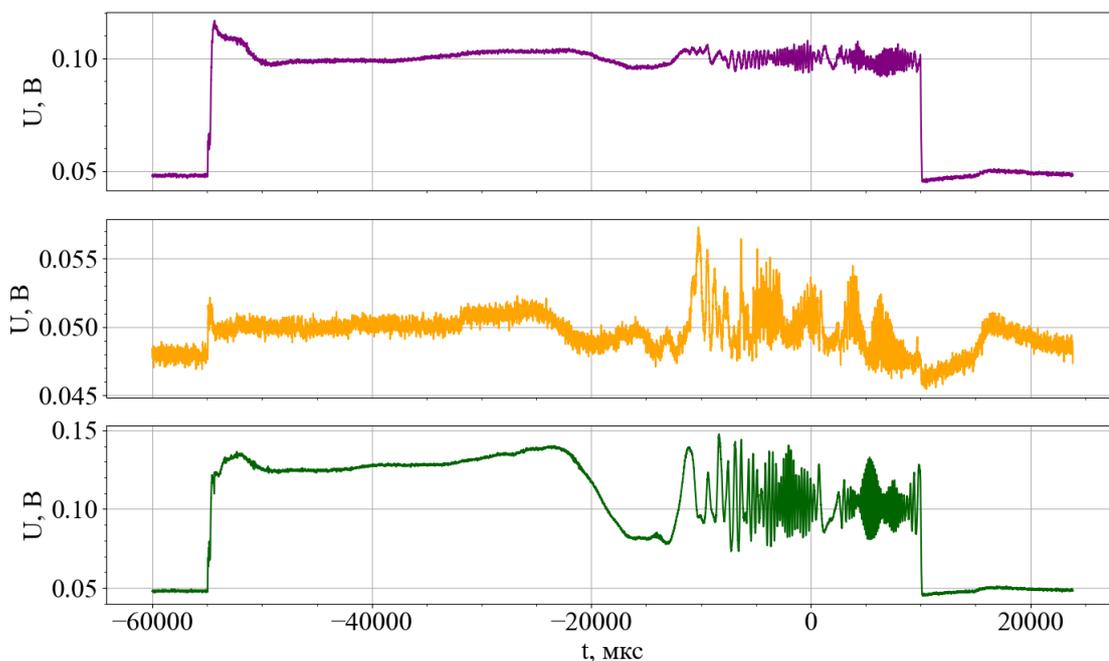


Рисунок 3.9: Интерферограммы от длинного лазерного импульса при включении плазмы и магнитного поля. Сверху вниз: только опорный луч, только рабочий луч, оба луча вместе.

требуется тщательное выявление и устранение источников паразитных бликов. В идеале это позволит получить сигналы неискажённой формы, свободные от паразитной интерференции, от рабочего и опорного лучей по отдельности.

2. На сигналах каждого луча по отдельности и в рабочем режиме интерферометра видна интерференционная картина, соответствующая смещению создающих её оптических лучей на величину масштаба 20 полос интерференции, т.е. 0,2 мм. Однако, такое смещение оптических элементов интерферометра невозможно, поэтому требуется дальнейшее экспериментальное исследование для выявления источника проблемы и его дальнейшего устранения. На данный момент рассматриваются следующие варианты возникновения данного эффекта:

- паразитные блики (см. пункт 1), которые создаются на элементах конструкции установки, например при рассеянии излучения

на фланцах и окошках вакуумной камеры;

- влияние магнитного поля установки на оптический стол интерферометра, выполненный из ферромагнитных материалов, приводящее к перекосу стола;
- влияние магнитного поля на направление луча лазера, вызванное изменением свойств высокочастотного разряда в лазере или отклонением его зеркал.

3. При юстировке есть проблемы с апертурными ограничениями на светоделительной пластине, имеющей диаметр 25 мм. Это приводит к невозможности достаточно далеко развести первичный и обратный лучи. Желательна замена светоделительной пластины на аналогичную с диаметром 50 мм.
4. Возможна проблема связанная с возникновением бликов от боковых патрубков вакуумной камеры, которые хорошо заметны на красном свете юстировочного лазера. Для их подавления требуется установка дополнительных экранов внутри вакуумной камеры ГОЛ-НВ.

Таким образом, для корректной работы интерферометра и его дальнейшего использования в эксперименте ГОЛ-НВ необходимо устранение наводок магнитного поля на источник питания детектора, а так же конструктивных недостатков оптической системы интерферометра, связанных с недостаточной апертурой светоделительной пластины и большими потерями в тракте рабочего луча с нерасчётно-сильным влиянием магнитного поля.

4 Программа обработки сигналов

4.1 Обработка сигнала

Для обработки экспериментальных данных на языке Python была написана программа, обрабатывающая сигнал интерферометра в линейную плотность плазмы. Данная программа состоит из двух независимых частей, причем вторая по смыслу разделена ещё на два блока.

Первая часть программы работает с базой данных эксперимента ГОЛ-NB записанной в формате .gmn и извлекает из неё сигнал интерферометра по заданному номеру эксперимента [21].

Вторая часть программы обрабатывает полученный сигнал. Первый блок сначала сглаживает весь сигнал методом скользящего среднего (параметр сглаживания задается вручную), а затем разделяет сигнал на его смысловые части по временным отсечкам в три разных списка (lists) – включение детектора, включение лазера, плазменный разряд и калибровка сигнала. Данные обо всех этих отсечках есть в базе данных эксперимента, однако их можно расставлять и вручную в самой программе.

Второй блок непосредственно работает с уже разделенными в несколько разных списков частями сигнала.

Сначала обрабатывается четвертый список, содержащий данные о калибровке сигнала. Калибровка сигнала осуществляется сразу после разряда посредством подачи напряжения на пьезоэлемент. На интерферограмме калибровочный сигнал напоминает синусоиду. Размах этой синусоиды поз-

воляет определить амплитуду A сигнала.

Далее программа обрабатывает первый и второй список, содержащий данные записанные сразу после включения детектора и после включения лазера и до плазмы соответственно. Данные в первом списке усредняются, по ним устанавливается "ноль" сигнала U_0 . Данные во втором списке так же усредняются и по ним вычисляется начальная фаза сигнала, так как на этом отрезке $U_{det} = A \cos \varphi_0 + U_0$, где A – уже известная из калибровки амплитуда, U_0 – "ноль" сигнала.

После получения всех необходимых констант, программа начинает обработку третьей части сигнала – сигнал непосредственно во время плазменного разряда. Для восстановления линейной плотности используется формула 2.1:

$$nL = \frac{mc^2}{\lambda e^2} \Delta\varphi = \frac{mc^2}{\lambda e^2} \left(\arccos \left(\frac{U_{det} - U_0}{A} \right) - \varphi_0 \right).$$

Таким образом, вычисляя разность фаз в каждый момент времени, программа восстанавливает линейную плотность плазмы в зависимости от времени.

4.2 Генерация модельных сигналов

Для тестирования программы обработки экспериментальных данных была написана программа генерации модельных сигналов. За основу были взяты интерферограммы приведенные в [6], [22], [23] и формы сигналов, типичные для ГОЛ-NB (рис. 4.1) . Программа генерации модельных сигналов создает сигнал похожий на них с учетом характерного набега фаз, вычисленного, например, для профиля плотности на рис. 4.2 или для произвольного значения плотности плазмы, входящего в область возможных значений плотности плазмы эксперимента ГОЛ-NB.

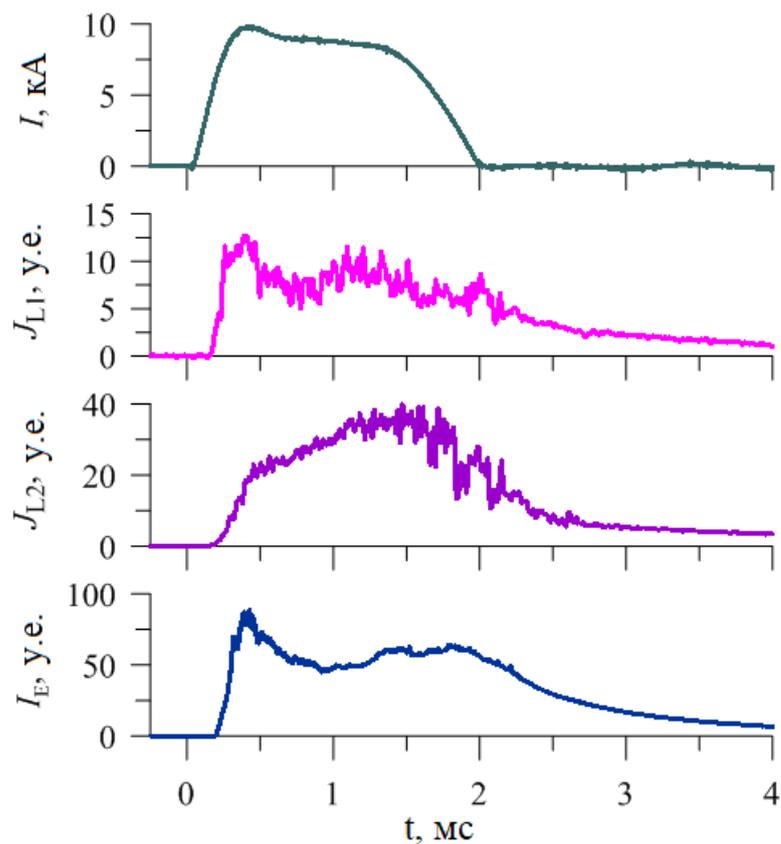


Рисунок 4.1: Типичные формы сигналов: ток плазменной пушки, ионный ток насыщения Ленгмюровского зонда в секции сильного поля, ионный ток насыщения Ленгмюровского зонда в центральной секции, ток в центральной торцевой пластине плазмоприемника [24].

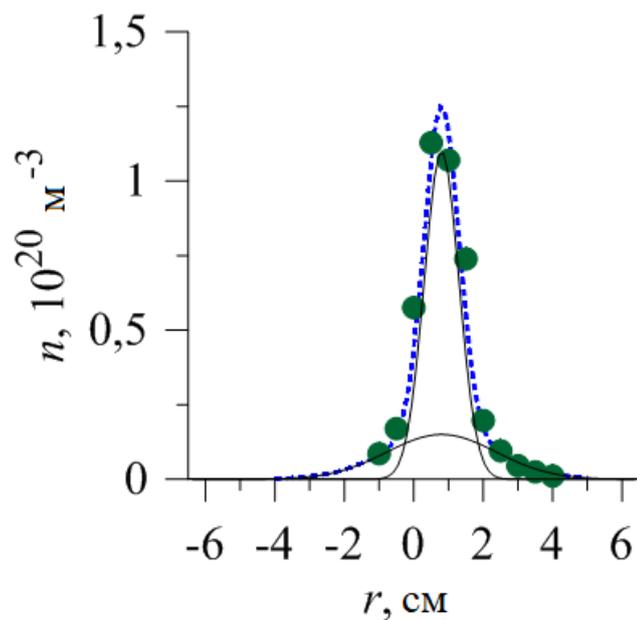


Рисунок 4.2: Примерный радиальный профиль плотности низкотемпературной стартовой плазмы во входном соленоиде ГОЛ-НВ по данным измерений Ленгмюровскими зондами.

Структурно сигнал состоит из четырех частей: сигнал детектора, сигнал лазера, сигнал от плазмы, калибровочный сигнал. В разделе 4.1 было подробно описано как сигнал разделяется по этим частям для вычисления линейной плотности плазмы. В этом разделе ограничимся лишь изложением особенностей и последовательности программной генерации модельного сигнала.

Сигнал генерируется по тому же принципу, по которому в дальнейшем будет обрабатываться - сигнал от детектора, сигнал от лазера, сигнал от плазмы и калибровка. Параметрами сигнала являются максимальная плотность плазмы, начальная фаза и "ноль детектора", но так как последний влияет только на уровень отсчета амплитуды напряжения, то далее будет рассматривать только различные начальные фазы и максимальную плотность плазмы. После генерации сигнала на него накладываются шумы - так как они обязательно будут в реальном сигнале, то необходимо тестировать сглаживание сигнала методом скользящего среднего с различным размером окна.

На рис. 4.3 изображены три различных модельных сигнала с наложенными шумами и без для одного значения максимальной плотности плазмы $n_{max} = 2,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, но с разными начальными фазами. А на рис. 4.4 изображены модельные сигналы с наложенными шумами и без для различных значений n_{max} и $\varphi_0 = 0, 1$ рад.

Например, для профиля плазмы на рис. 4.2 максимальная плотность плазмы составляет $n_{max} = 1,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а ожидаемая линейная плотность для такого профиля составляет $nL = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Оценка набега фазы для данного значения линейной плотности в соответствии с 2.1 составляет $\sim 0,1$ рад. С этими параметрами был сгенерирован модельный сигнал. Далее этот модельный сигнал был загружен в программу обработки для сглаживания от шумов и вычисления линейной плотности плазмы. Результат представлен на рис. 4.5.

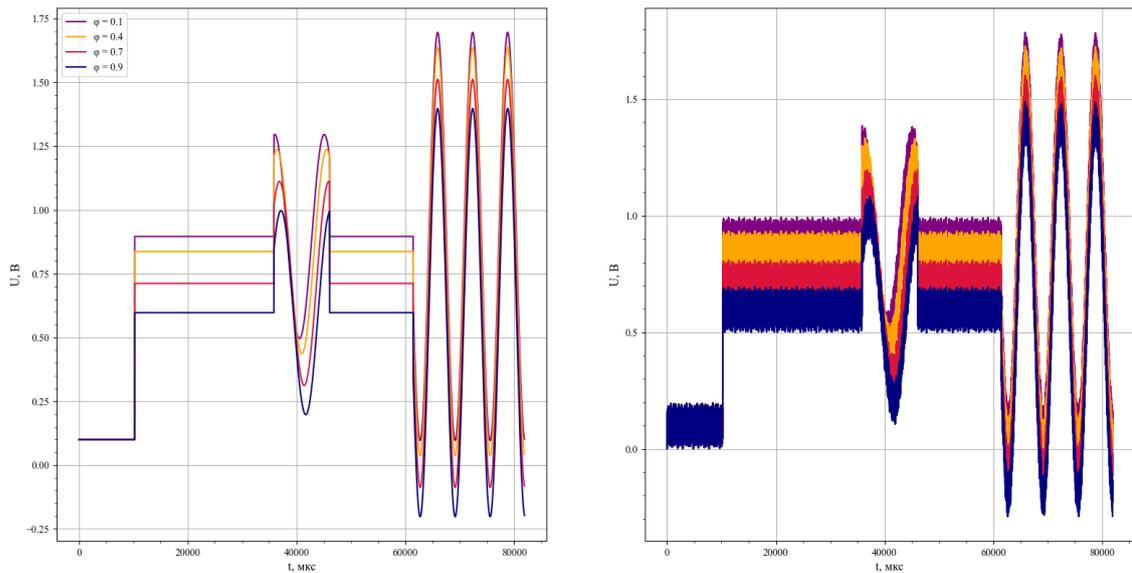


Рисунок 4.3: Модельные сигналы с различной начальной фазой φ_0 и максимальной плотностью плазмы $n_{max} = 2,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Слева модельные сигналы, справа они же после наложения шумов.

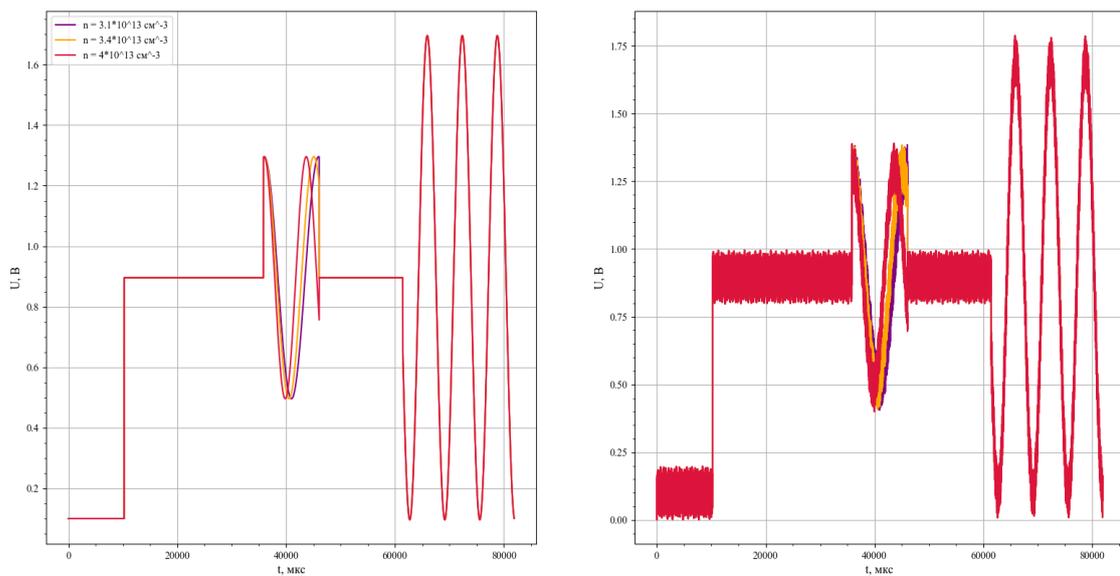


Рисунок 4.4: Модельные сигналы для различных n_{max} с $\varphi_0 = 0,1$ рад. Слева модельные сигналы, справа они же после наложения шумов.

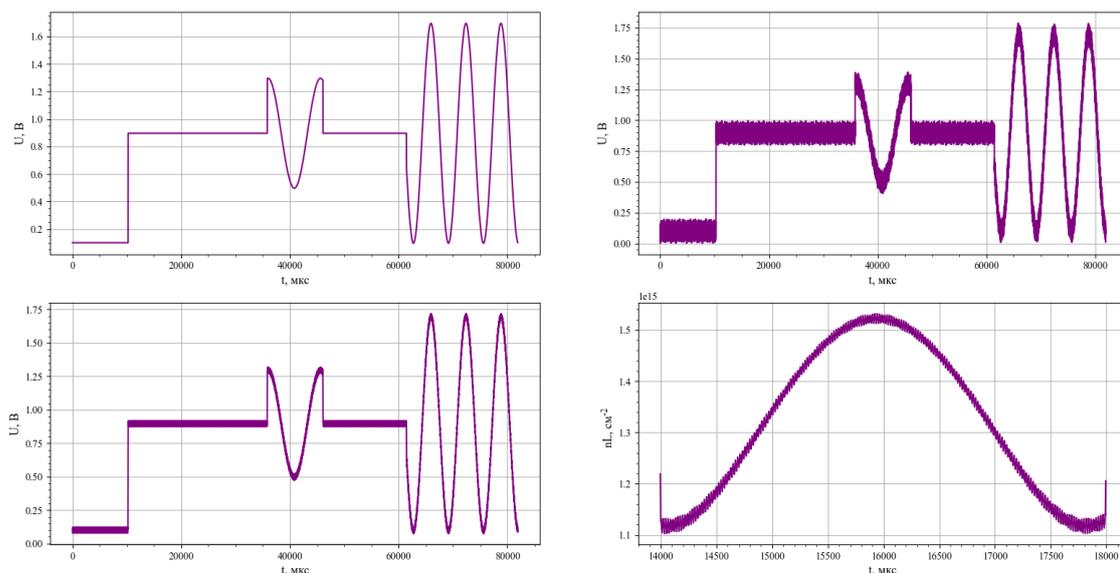


Рисунок 4.5: Генерация и обработка модельного сигнала с параметрами $n_{max} = 1,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $\varphi_{plasma} = 0,1$ рад. Слева направо сверху вниз: сгенерированный тестовый сигнал, тестовый сигнал после наложения шумов, тестовый сигнал после сглаживания с параметром сглаживания $S = 10$, зависимость nL от времени.

Таким образом, после проведения тестов с использованием модельных сигналов, программа обработки готова к обработке данных эксперимента ГОЛ-НВ. В настоящее время ведется тестирование диагностики в экспериментах.

Заключение

В результате проделанной работы:

1. В проектной конфигурации собран и отъюстирован интерферометр на основе инфракрасного CO_2 -лазера для измерения линейной плотности плазмы во входной секции сильного поля на установке ГОЛ-НВ. Интерферометр включен в систему управления и сбора данных установки ГОЛ-НВ.
2. Начата отладка интерферометра в экспериментах с плазмой на установке ГОЛ-НВ. Выявлен ряд недостатков конструкции, приводящих к появлению помех и паразитной интерференции. Определены возможные причины проблем, проводятся меры по их устранению.
3. На языке программирования Python написана программа обработки сигналов интерферометра, записанных в базу данных установки ГОЛ-НВ. Программа была протестирована при помощи модельного сигнала, сгенерированного для ожидаемых параметров плазмы в ГОЛ-НВ и имеющего искусственно наложенный шум.

В настоящее время диагностика активно тестируется в экспериментах, продолжается работа над устранением конструктивных недостатков интерферометра. В дальнейшем для обеспечения возможности калибровки экспериментального сигнала планируется присоединение источника питания к пьезоэлементу, на котором расположено опорное зеркало. Это позволит полноценно использовать интерферометр в эксперименте.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность В. В. Поступаеву за научное руководство, А. Ф. Ровенских за помощь в подключении диагностики к системе синхронизации установки и консультации по работе ПО, используемого в эксперименте ГОЛ-NB, а так же всему коллективу установки ГОЛ-NB за проведенные эксперименты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Будкер Г. И., Мирнов В. В., Рютов Д.Д. Влияние гофрировки магнитного поля на расширение и остывание плотной плазмы // Письма в ЖЭТФ. — 1971. — Т. 14, № 5.
- [2] Multiple-mirror confinement of plasmas / Logan B. Grant, Lichtenberg A. J., Lieberman M. A., and Makhijani A. // [Physical Review Letters](#). — 1972. — Vol. 28, no. 3. — P. 144.
- [3] Post R.F. The magnetic mirror approach to fusion // [Nucl. Fusion](#). — 1987. — Vol. 27, no. 10. — P. 1579.
- [4] Novosibirsk project of gas-dynamic multiple-mirror trap / Beklemishev A., Anikeev A., Astrelin V., Bagryansky P., Burdakov A., Davydenko V., Gavrilenko D., Ivanov A., Ivanov I., Ivantsivsky M., et al. // [Fusion Science and Technology](#). — 2013. — Vol. 63, no. 1T. — P. 46–51.
- [5] Бурдаков А. В., Поступаев В. В. Многопробочная ловушка: путь от пробкотрона Будкера к линейному термоядерному реактору // [Усп. физ. наук](#). — 2018. — Т. 188, № 6. — С. 651–671.
- [6] Инфракрасный интерферометр для исследования субтермоядерной плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3 / Бурмасов В. С., Бобылев В. Б., Иванова А. А., Иваненко С. В., Касатов А. А., Касатов Д. А., Кругляков Э. П., Куклин К. Н., Попов С. С., Поступаев В. В. и др. // [Приборы и техника эксперимента](#). — 2012. — № 2. — С. 120–120.

- [7] Rosenbluth Marshall N., Longmire C. L. Stability of plasmas confined by magnetic fields // [Annals of Physics](#). — 1957. — Vol. 1, no. 2. — P. 120–140.
- [8] Иоффе М. С., Кадомцев Б. Б. Удержание плазмы в адиабатических ловушках // [Успехи физических наук](#). — 1970. — Т. 100, № 4. — С. 601–639.
- [9] Experiments on the containment of an alkali plasma in a corrugated magnetic field / Budker G. I., Danikov V. V., Kruglyakov E. P., Ruytov D. D., and Shun'ko E. V. // [ZhETF Pisma Redaktsiiu](#). — 1973. — Vol. 17. — P. 117.
- [10] Experimental Evidence of multiple-mirror plasma confinement / Logan B Grant, Brown I. G., Lieberman M. A., and Lichtenberg A. J. // [Physical Review Letters](#). — 1972. — Vol. 29, no. 21. — P. 1435.
- [11] The GOL-NB program: further steps in multiple-mirror confinement research / Postupaev V. V., Batkin V. I., Beklemishev A. D., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Chernoshtanov I. S., Gorbovsky A. I., Ivanov I. A., Kuklin K. N., Mekler K. I., et al. // [Nuclear Fusion](#). — 2016. — Vol. 57, no. 3. — P. 036012.
- [12] Формирование потока стартовой плазмы в открытой ловушке с помощью дуговой плазменной пушки / Иванов И. А., Баткин В. И., Бурдаков А. В., Куклин К. Н., Меклер К. И., Поступаев В. В., Ровенских А. Ф. и Сидоров Е. Н. // [Физика плазмы](#). — 2021. — Т. 47, № 9. — С. 856–864.
- [13] Postupaev V. V., Burdakov A. V., Ivanov A. A. Outlook for New Experimental Program on Multiple-Mirror Confinement in GOL-3 with NBI-

- Heated Plasma // [Fusion Science and Technology](#). — 2015. — Vol. 68, no. 1. — P. 92–98.
- [14] Давыденко В. И., Иванов А. А., Вайсен Г. Экспериментальные методы диагностики плазмы // НГУ, Новосибирск. — 1999.
- [15] Kikuchi Mitsuru, Lackner Karl, Tran Minh Quang. Fusion physics. — International Atomic Energy Agency, 2012.
- [16] Michelson Albert A, Morley Edward W. LVIII. On the relative motion of the earth and the luminiferous Æther // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. — 1887. — Vol. 24, no. 151. — P. 449–463.
- [17] Dispersion interferometer based on a CO₂ laser for TEXTOR and burning plasma experiments / Bagryansky P. A., Khilchenko A. D., Kvashnin A. N., Lizunov A. A., Voskoboynikov R. V., Solomakhin A. L., Koslowski H. R., and team TEXTOR // [Review of scientific instruments](#). — 2006. — Vol. 77, no. 5. — P. 053501.
- [18] Two-color interferometer for study of dense low-ionized plasma on the target in high-power pulse linear accelerator / Danilov V. V., Skovorodin D. I., Popov S. S., Burdakov A. V., Trunev Yu. A., Kurkuckekov V. V., Anikeev M. A., Atlukhanov M. G., Kolesnikov P. A., and Politov V. Yu. // [Review of Scientific Instruments](#). — 2021. — Vol. 92, no. 6. — P. 063519.
- [19] Sarkisov G. S. Simulation of laser beam propagation through an axisymmetric dense plasma // [Quantum Electronics](#). — 1996. — Vol. 26, no. 9. — P. 799.
- [20] Виттеман В Дж. СО₂-лазер: Пер. с англ. — Мир, 1990.

- [21] Система регистрации и сбора данных установки ГОЛ-3 / Бурдаков АВ, Квашнин АН, Койдан ВС, Поступаев ВВ, Ровенских АФ и Хильченко АД // Приборы и техника эксперимента. — 2004. — № 2. — С. 38–44.
- [22] Bulk plasma heating by a microsecond E-beam in the GOL-3 facility : Rep. / Institute of Nuclear Physics AS USSR ; executor: Burdakov A. V., Voropaev S. G., Guber A. F. : 1992.
- [23] ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ДВУХСТУПЕНЧАТОМУ НАГРЕВУ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3 / Астрелин В. Т., Бурдаков А. В., Койдан В. С., Меклер К. Н., Мельников П. Н., Поступаев В. В. и Щеглов М. А. — 1992.
- [24] Start of experiments in the design configuration of the GOL-NB multiple-mirror trap / Postupaev V. V., Batkin V. I., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Ivanov I. A., Kuklin K. N., Lykova Y. A., Melnikov N. A., Mekler K. I., Nikishin A. V., et al. // [Nuclear Fusion](#). — 2022.