

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени магистра**

Кафедра физики плазмы

Семионов Виталий Владимирович

СО₂-метод измерения градиента плотности плазмы на установке ГОЛ-3

Научный руководитель:

Бурмасов Владимир Степанович

Новосибирск – 2007 год

Содержание

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Введение..... | 2 |
| 1.1 | Механизм быстрого нагрева ионов в установке ГОЛ-3..... | 2 |
| 1.2 | Постановка задачи..... | 3 |
| 2 | Теоретическое описание используемых эффектов..... | 6 |
| 2.1 | Распространение света в оптически неоднородной среде..... | 6 |
| 2.2 | Связь градиентов плотности плазмы и показателя преломления | 7 |
| 3 | Измерения | 8 |
| 3.1 | Модифицированный метод Теплера..... | 8 |
| 3.2 | Метод смещения фокального пятна | 10 |
| 4 | Калибровка системы и оценка градиента плотности плазмы | 12 |
| 4.1 | Калибровка по смещению фокального пятна..... | 12 |
| 4.2 | Калибровка при помощи поворотного зеркала..... | 12 |
| 4.3 | Оценка градиента плотности плазмы..... | 12 |
| 5 | Обсуждение результатов | 14 |
| 6 | Заключение..... | 15 |
| 7 | Благодарности..... | 16 |

1 Введение

1.1 Механизм быстрого нагрева ионов в установке ГОЛ-3

На установке ГОЛ-3 [1] (гофрированной открытой ловушке), расположенной в ИЯФ СО РАН, проводятся эксперименты по нагреву и удержанию плазмы в гофрированном поле. Соленоид установки состоит из 110 катушек, включённых через одну и создающих периодически-неоднородное (гофрированное) магнитное поле ($H_{\max}/H_{\min}=4.8/3.2\text{T}$, пространственный период $l=0.22\text{м}$), с независимым питанием и общей длиной около 12м. Внутри соленоида располагается вакуумная плазменная камера. Нагрев плазмы осуществляется мощным релятивистским электронным пучком (1МВ, 30кА, 8мкс), который генерируется ускорителем У-2.

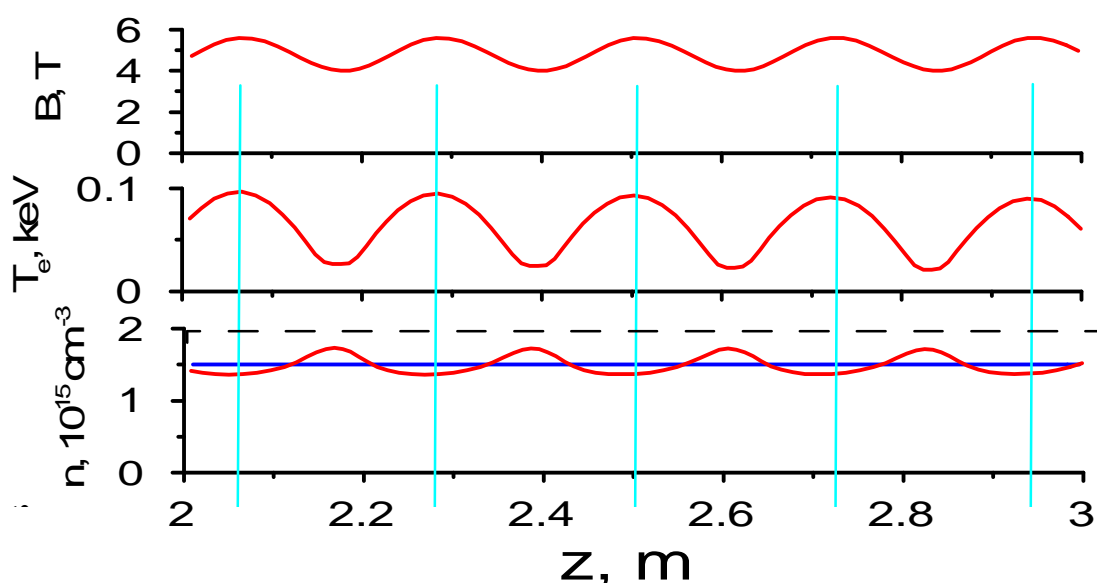


Рис.1. Предсказание моделью модуляций плотности плазмы.

Установлено, что при наличии гофрировки магнитного поля наблюдаются существенные изменения в физике происходящих процессов по сравнению с режимом однородного поля. Значительно (от 50-100 эВ до 1-2 кэВ) возрастает ионная температура, что было обнаружено по данным всех ионных диагностик, причём нагрев происходит в течение нескольких микросекунд. При плотности плазмы 10^{15}см^{-3} этого времени недостаточно для нагрева за счёт парных столкновений электронов и ионов [1]. Для объяснения этого явления был предложен новый, коллективный механизм передачи энергии от электронного пучка к ионам плазмы, существенно зависящий от наличия гофрированного поля. Теоретическая модель данного механизма содержит следующие пункты:

- § пространственная зависимость нагрева от величины магнитного поля (то есть неравномерность нагрева);
- § подавление продольной теплопроводности во время инжекции пучка в плазму, приводящее к возникновению больших градиентов давления;
- § коллективное ускорение плазмы в каждой ячейке из областей большего магнитного поля в область меньшего;
- § возникновение и термализация встречных потоков ионов.

Таким образом, модель предполагает возникновение модуляции плотности и, соответственно, наличие продольного градиента плотности плазмы в отдельной ячейке магнитной системы.

Ранее для исследования нового механизма быстрого нагрева ионов на установке ГОЛ-3 проводились эксперименты с магнитной ямой [1] и была модифицирована система томсоновского рассеяния [2], использовавшаяся для проверки предположений теоретической модели.

1.2 Постановка задачи

Для подтверждения предложенной модели нагрева ионов было предложено освоить на установке ГОЛ-3 простой метод определения возникающего градиента по отклонению светового луча на неоднородности плазмы [3, 4]. С этой целью был приобретён CO₂-лазер, работающий на длине волны $\lambda=10.29\text{мкм}$, с диаметром луча 2.2мм, мощностью излучения 14Вт и расходимостью не более 10^{-2} рад. Луч лазера проводился через плазму при помощи двух ВаF₂-окон, установленных в металлических держателях между 16-й и 17-й катушками соленоида. Относительное расположение диагностики показано на рис.2.

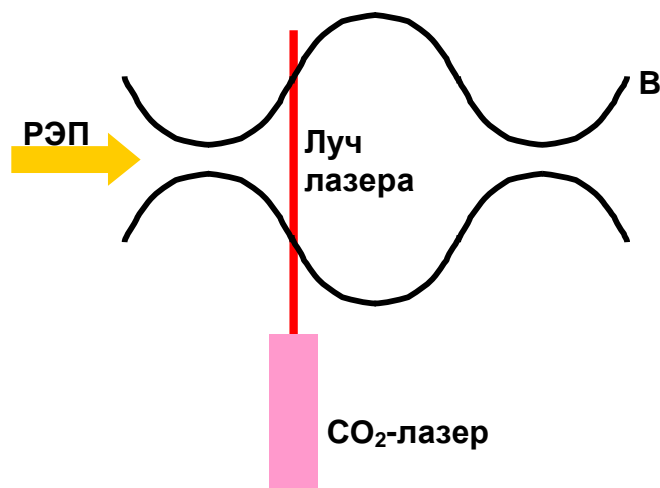


Рис.2. Расположение диагностики относительно магнитного поля и инжектируемого электронного пучка

Для регистрации прошедшего через плазму излучения этого лазера смонтирована система, основным элементом которой является полупроводниковый фотодетектор (КРТ-диод, помещённый в криостат), разработанный в ИФП СО РАН. Спектральная чувствительность детектора представлена на рис.3. Видно, что максимум чувствительности находится недалеко от длины волны лазера. Диаметр активной площадки детектора составляет 250мкм., для его охлаждения используется жидкий азот. Детектор может работать в двух режимах: режиме прямого детектирования и в гетеродинном режиме. В данной работе использовался режим прямого детектирования. Остальные характеристики КРТ-диода представлены в Приложении. Для юстировки оптической системы был разработан и собран специальный модулятор, позволяющий получать периодический сигнал. Сигнал детектора обрабатывался двумя АЦП – 101S (интервал отсчётов 1мкс, амплитуда от 0.08В) и 810dx (интервал отсчётов от 10нс, амплитуда от 0.16В)

Целью моей работы было создание диагностики для измерения градиентов плотности плазмы, возникающих при взаимодействии электронного пучка с плазмой. Также задачей было освоение в работе детектора на основе полупроводникового КРТ-диода.

Градиент плотности определялся по отклонению лазерного луча в плазме. При этом оптическая система из линз и зеркал была устроена таким образом, что отклонение луча преобразовывалось в изменение сигнала с детектора. Измерения проводились по двум оптическим схемам. После измерений, также по двум схемам, была проведена калибровка системы, что позволило дать верхнюю оценку градиента плотности плазмы.

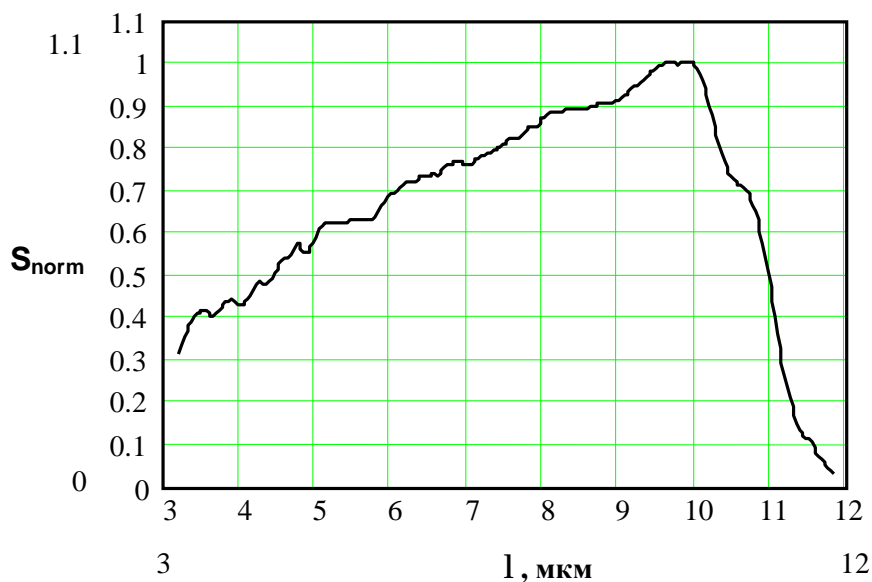


Рис.3. Спектральная чувствительность детектора (Чувствительность S нормирована на максимальную)

Подобный метод измерения градиента плотности плазмы использовался ранее. В частности, на установке СТІХ применялись 4 детектора, регистрирующие отклонение лазерного луча по двум координатам. [3]

2 Теоретическое описание используемых эффектов

2.1 Распространение света в оптически неоднородной среде

Распространение луча в среде с показателем преломления $n=n(x,y,z)$ описывается следующим дифференциальным уравнением [4]:

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = \nabla n,$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор произвольной точки луча, а s – длина луча, отсчитываемая от этой точки. В частности, для однородной среды $n=const$ и это уравнение принимает вид:

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{ds^2} = 0,$$

откуда можно получить уравнение прямой линии.

Рассмотрим вектор кривизны \mathbf{K} :

$$\mathbf{K} = \frac{d\mathbf{s}}{ds} = \frac{1}{\rho} \mathbf{v},$$

где ρ – радиус кривизны, \mathbf{v} – единичный вектор главной нормали в данной точке луча (рис.4). Используя это выражение и учитывая, что $\frac{d\mathbf{r}}{ds} = \mathbf{s}$, из первого уравнения можно

вывести:

$$n\mathbf{K} = \nabla n - \frac{dn}{ds} \mathbf{s}.$$

Из этого следует, что градиент показателя преломления лежит в соприкасающейся плоскости луча. Умножив обе части скалярно на \mathbf{K} и проделав некоторые преобразования, получаем:

$$|\mathbf{K}| = \frac{1}{\rho} = \mathbf{v} \cdot \nabla \ln n$$

откуда видно, что вдоль главной нормали n возрастает, то есть луч отклоняется в сторону большего показателя преломления.[4]

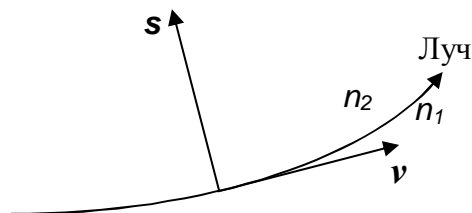


Рис.4. Распространение света в оптически неоднородной среде. $n_2 > n_1$

2.2 Связь градиентов плотности плазмы и показателя преломления

Коэффициент преломления плазмы выражается следующим образом[2]:

$$n = 1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_0^2}{\omega^2},$$

где ω – частота проходящего света, а ω_0 – плазменная частота. Следует заметить, что коэффициент преломления плазмы, таким образом, всегда меньше единицы. Подставив в это уравнение выражения для частот (здесь и далее N – плотность плазмы):

$$\omega = \frac{2\pi c}{l}; \quad \omega_0^2 = \frac{4\pi e^2 N}{m_e},$$

получаем:

$$n = 1 - \frac{1}{2} \frac{e^2 N l^2}{\pi m_e c^2}.$$

Подставив в это выражение значения констант, находим:

$$n = 1 - 4.48 \cdot 10^{-14} N l^2$$

Из этого уравнения и п.2.1 следует, что при наличии градиента плотности плазмы луч отклоняется в сторону уменьшения плотности, а градиенты коэффициента преломления и плотности плазмы связаны следующим образом:

$$\nabla n = -4.48 \cdot 10^{-14} l^2 \nabla N$$

3 Измерения

3.1 Модифицированный метод Теплера

Для исследования градиентов различных величин удобно использовать методы визуализации оптических неоднородностей, которые называются методами шлирен-фотографии.[5] На таком методе - методе Теплера была основана одна из оптических схем, использовавшихся в работе. Она приведена на рис.5.

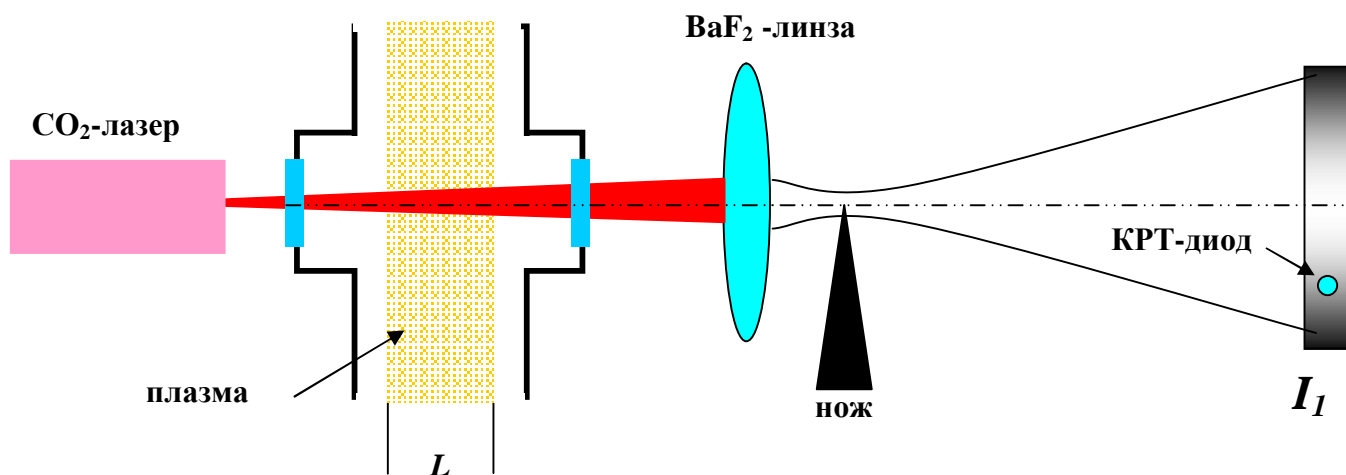


Рис.5. Модифицированный метод Теплера

Луч лазера, прошедший через плазму, фокусируется при помощи линзы из фторида бария, после чего расходится. В фокусе линзы установлен нож, который закрывает ровно половину фокального пятна при отсутствии отклонения луча. Детектор расположен на расстоянии 1.5-2.5м от выходного окна плазменной камеры. Мощность излучения распределена по сечению светового пучка неравномерно (на рис.5 и рис.6 более светлые участки соответствуют большей интенсивности), поэтому было решено установить детектор на расстоянии около 20см от оптической оси системы во избежание его сгорания. Каждая точка фокального пятна вносит вклад в интенсивность света, попадающего на детектор. При отклонении луча в плазме и, следовательно, при смещении фокального пятна интенсивность света, падающего на детектор, изменяется (рис.6). Соответственно, изменяется и сигнал с детектора. При этом разность I_2-I_1 пропорциональна углу отклонения β .

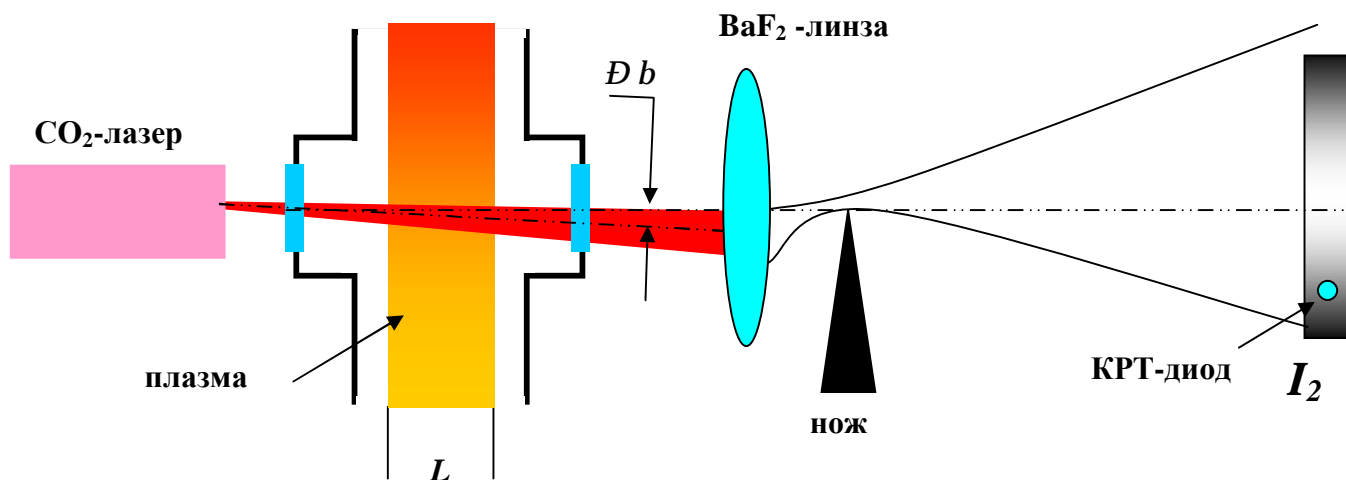


Рис.6. Отклонение лазерного луча в модифицированном методе Теплера

Характерный сигнал детектора, полученный при помощи данной измерительной схемы, представлен на рис.7. При выключении CO₂-лазера сигнал не менялся, следовательно, основной вклад в него давали наводки. Так как выделить полезный сигнал с детектора не удалось, было принято решение изменить оптическую схему.

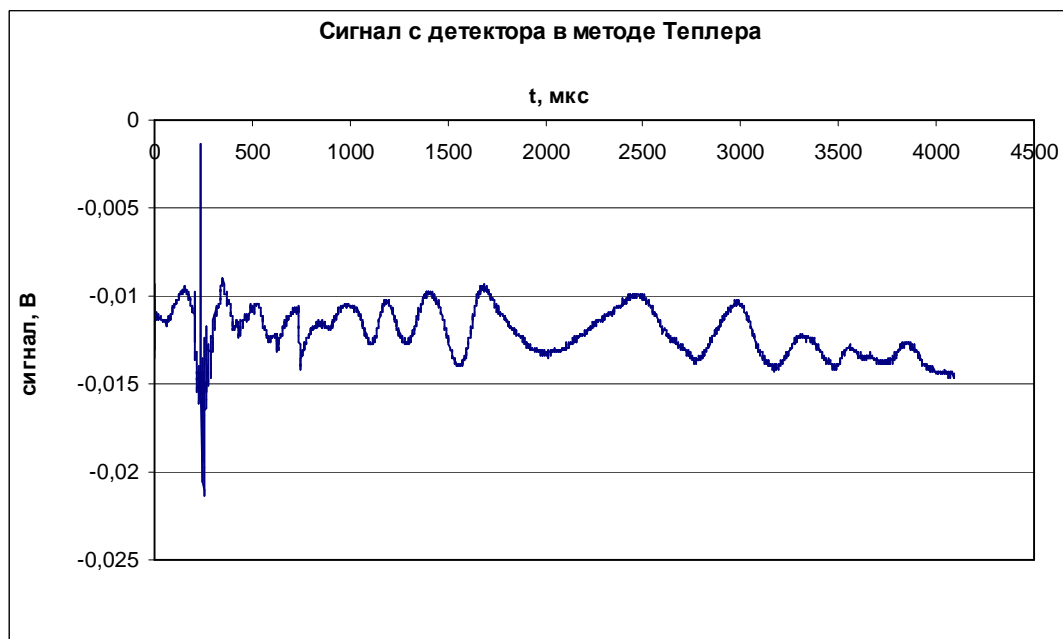


Рис.7. Типичный вид сигнала, полученного методом Теплера

3.2 Метод смещения фокального пятна

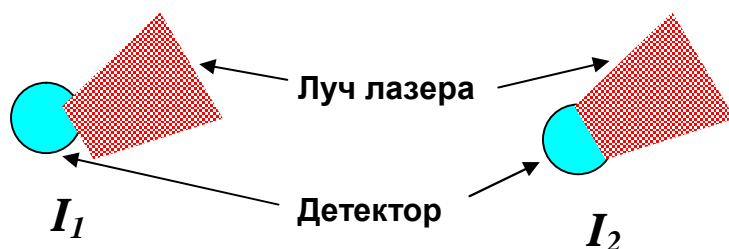


Рис.8. Физическое обоснование метода смещения фокального пятна

Идея метода проиллюстрирована на рис.8. Если размер фокального пятна будет сравним с диаметром детектора, то смещение этого пятна вследствие отклонения луча в плазме будет вызывать изменение сигнала с детектора. При этом разность $I_2 - I_1$, и изменение сигнала с детектора, окажутся пропорциональны углу отклонения β .

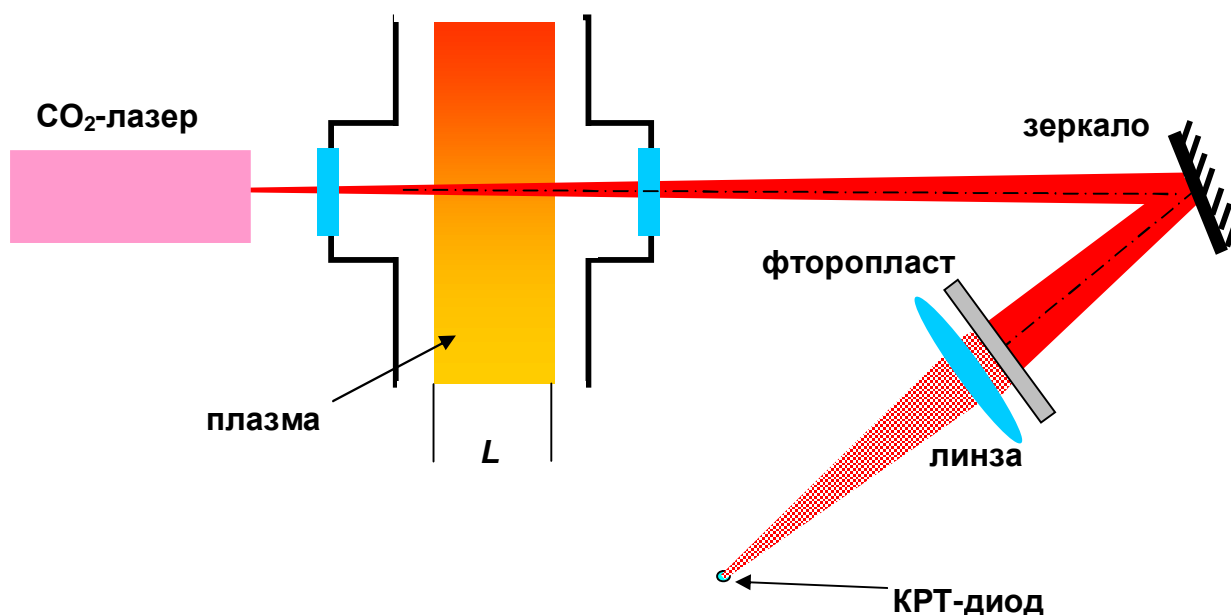


Рис.9. Схема метода смещения фокального пятна

Оптическая схема метода приведена на рис.9. Прошедший через плазму свет после отражения от поворотного зеркала при помощи линзы фокусировался на детектор. Диаметр фокального пятна составлял при этом около 200мкм. Для предотвращения сгорания детектора, перед линзой была установлена защита из фторопласта, каждый из которых ослабляла ИК-излучение в 1000 раз.

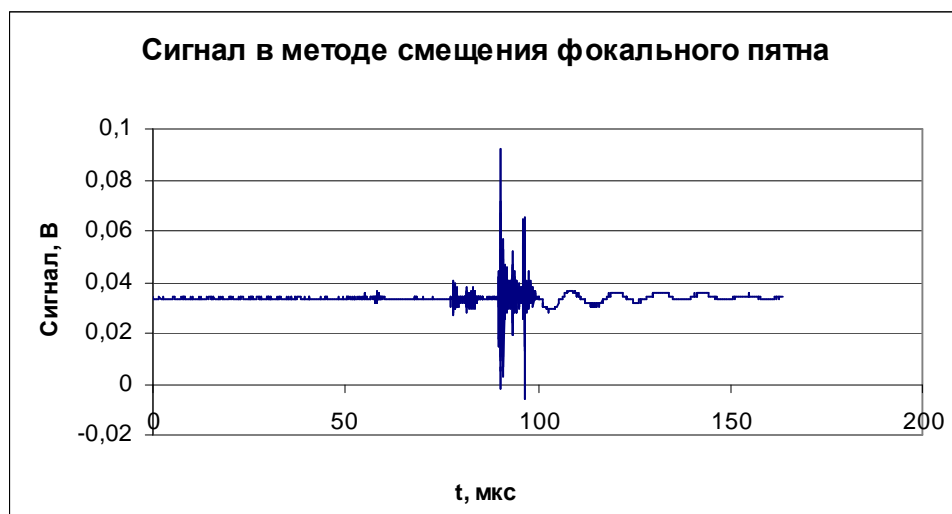


Рис.10. Сигнал, полученный по методу смещения фокального пятна

Сигнал детектора, полученный при использовании данной схемы, приведён на рис.10. Как и в методе Теплера, сигналы при включенном и при выключенном CO_2 -лазере не различались, то есть выделить полезную часть сигнала не удалось.

4 Калибровка системы и оценка градиента плотности плазмы

4.1 Калибровка по смещению фокального пятна

В данном случае для определения чувствительности системы использовалась схема метода смещения фокального пятна (рис.7) при отсутствии плазмы в вакуумной камере. Линза, установленная перед детектором на расстоянии 1м. от него контролируемо перемещалась перпендикулярно направлению лазерного луча. Таким образом, было определено минимальное смещение линзы, приводящее к изменению сигнала с детектора. Оно оказалось равным 0.03мм. Из этой величины был вычислен минимальный угол, регистрируемый оптической системой:

$$b = \frac{3 \cdot 10^{-5} \text{ м}}{1 \text{ м}} = 3 \cdot 10^{-5}$$

4.2 Калибровка при помощи поворотного зеркала

Схема данного метода калибровки приведена на рис.11. Зеркало, расположенное после вакуумной камеры, контролируемо поворачивалось с помощью установленных на нём микрометрических винтов. Тем самым определялся минимальный угол поворота, при котором наблюдалось изменение сигнала с детектора.

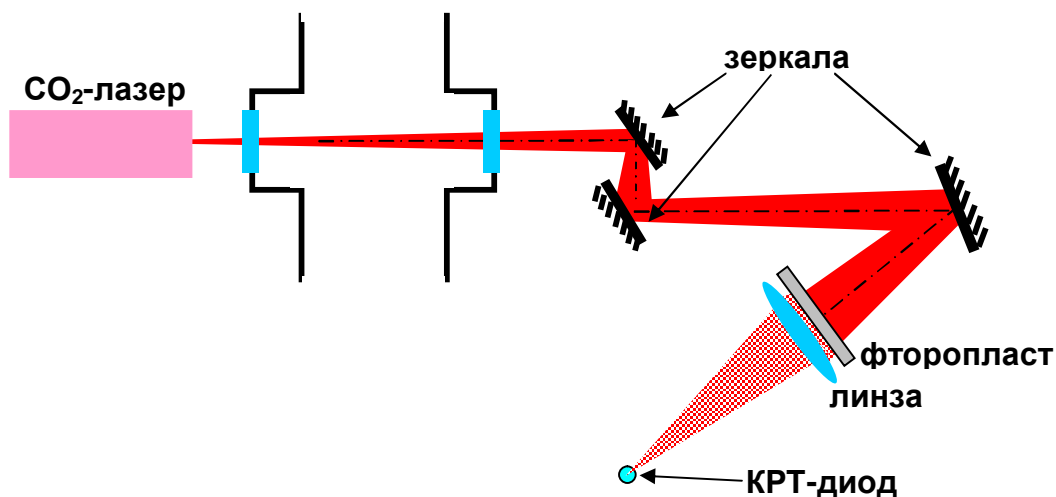


Рис.11. Схема калибровки при помощи поворотного

4.3 Оценка градиента плотности плазмы

Так как измерения не дали полезного результата, то был сделан вывод, что чувствительность оптической системы недостаточна для измерения предсказываемого градиента плотности плазмы. То есть градиент плотности плазмы не превышает минимального измеримого значения.

Для оценки минимального измеримого градиента плотности выразим через него минимальный детектируемый угол отклонения луча. При прохождении расстояния L в среде с показателем преломления $n=n(x)$ луч отклоняется на угол [5]

$$\Delta b = \frac{1}{n_0} \int_0^L \frac{\partial n}{\partial x} dz,$$

где n_0 – среднее значение коэффициента преломления. Если в направлении распространения луча (оси z) плазма однородна (что для установки ГОЛ-3 не совсем верно [2]), то

$$\Delta b = \frac{\nabla n}{n_0} L.$$

Учитывая, что $n_0 \approx 1$, и подставляя выражение для градиента n (п.2.2), получаем:

$$\Delta b = 4.48 \cdot 10^{-14} I^2 L \nabla N.$$

Следовательно, минимальный измеримый градиент плотности плазмы вычисляется по следующей формуле [2]:

$$\nabla N_{\min} = \frac{b_{\min}}{4.46 \cdot 10^{-14} I^2 L}.$$

Подставляя сюда $\beta=10^{-5}$, $\lambda=10^{-3}$ см., $L=10$ см., находим.:

$$\nabla N_{\min} = 10^{15} \text{ см}^{-4}.$$

То есть градиент плотности плазмы в данном месте установки ГОЛ-3 не превышает минимального измеримого значения 10^{15} см^{-4} .

5 Обсуждение результатов

В данной работе не было измерено значение градиента плотности плазмы. Это может быть связано как с недостаточной для измерения существующего градиента чувствительностью метода, так и с отсутствием градиента плотности в данном месте установки.

Была дана верхняя оценка градиента плотности плазмы, равная 10^{15} см^{-4} , что согласуется с предсказаниями численных расчётов В.Т. Астрелина, изложенных в работе [1].

При этом, по данным измерений системы томсоновского рассеяния [2], были обнаружены флуктуации плотности плазмы на стадии нагрева, что также соответствует предсказаниям теоретической модели быстрого нагрева ионов. Размер этих флуктуаций не превышает 10мм., а сами флуктуации затухают в течении 50мкс. после начала инъекции пучка.

На основании вышеизложенного было принято решение перемонтировать данную диагностику между 7-й и 8-й катушками соленоида, на расстоянии около 1м от места инъекции пучка в плазму, где наблюдается модуляция нейтронного потока из плазмы и, следовательно, увеличивается вероятность наблюдения градиента плотности плазмы.

6 Заключение

1. На установке ГОЛ-3 на основе оптического метода создана диагностика для измерения градиента плотности плазмы с целью проверки предсказаний теоретической модели механизма быстрого нагрева ионов.

2. Были проведены измерения по двум оптическим схемам. Также двумя способами была проведена калибровка оптической системы, в результате чего была сделана верхняя оценка величины градиента.

3. Градиент плотности плазмы на расстоянии 2м от места инъекции РЭП (между 16 и 17 катушками магнитной системы) не превышает 10^{15} см^{-4} .

4. Был освоен в эксплуатации полупроводниковый детектор на основе КРТ-диода, специально разработанный в ИФП СО РАН для этой методики.

В настоящее время диагностика собрана между 7-й и 8-й катушками магнитной системы, на расстоянии $z \approx 1 \text{ м}$. от места инъекции пучка в плазму.

7 Благодарности

Я хочу выразить благодарность Бурмасову Владимиру Степановичу. за постановку задачи и руководство работой и Ровенских Андрею Фёдоровичу за помощь в автоматизации исследований.

Литература

1. Аржанников А.В. и др., Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3, Физика плазмы, 2005, том 31, № 5, с.1-15
2. Иванцовский М.В., Семионов В.В и др., Изучение динамики плотности плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3 многоканальной системой томсоновского рассеяния, Тезисы докладов 32-й Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 14-18 февраля 2005, с.95
3. В. А. Knyazev, J. B. Greenly, D. A. Hammer, G. Krastelevb, M. E. Cuneo, Telescopic refractive index gradient diagnostic of an ion diode anode plasma Review of scientific instruments, may 2001 vol.72, num.5
4. S.J.E. Brockington et al, Plasma density gradient measurement using laser deflection, Rewiew of scientific instruments, 2005, vol.76, p.063503
5. Борн М., Вольф Э., Основы оптики, М.: Наука, 1973
6. Душин Л.А., Павличенко О.С., Исследование плазмы с помощью лазеров, М.: Атомиздат, 1968

Приложение

Характеристики КРТ-диода

| | |
|---|---|
| Диаметр активной площади | 250 мкм |
| Длинноволновая граница чувствительности по уровню 0,1 | 11.7 мкм |
| Длина волны в максимуме чувствительности, мкм | 9.9 мкм |
| Быстродействие при прямом детектировании: | |
| режим 1 | 70 нс |
| режим 2 | 20 нс |
| Быстродействие при гетеродинном приеме* | < 0.5 нс |
| Пороговая мощность в максимуме чувствительности при прямом детектировании: | |
| режим 1** | $3.8 \times 10^{-13} \text{ ВтГц}^{-0.5}$ |
| режим 2 | $1.0 \times 10^{-12} \text{ ВтГц}^{-0.5}$ |
| Пороговая мощность в максимуме чувствительности при гетеродинном приеме *** | |
| | < $10^{-19} \text{ ВтГц}^{-1}$ |
| Максимальная рабочая мощность гетеродинного пучка | 1 мВт |
| Максимально допустимая мощность гетеродинного пучка | 10 мВт |
| Коэффициент передачи тока по НЧ выходу: | |
| режим 1 | $3.3 \times 10^4 \text{ В/А}$ |
| режим 2 | $1.0 \times 10^3 \text{ В/А}$ |
| Коэффициент передачи тока по ВЧ выходу: | |
| по выходу 1 | $6 \times 10^3 \text{ В/А}$ |
| по выходу 2 | $2 \times 10^3 \text{ В/А}$ |
| Полоса частот ВЧ предусилителя по уровню -3 dB | $(0.008 \div 1) \times 10^9 \text{ Гц}$ |
| Входное окно криостата | ZnSe (сменное) |
| Время непрерывной работы при одной заливке | 8 часов |
| Апертурный угол ФЧЭ, ограниченный охлаждаемой диафрагмой | 30^0 |
| Выходной разъем РС-50-108ФВ | |
| Разъем питания РГ1Н-1-Г: | |
| контакт 1 | 0 / +9 В, $\leq 30 \text{ мА}$ |
| контакт 2 | общий, |
| контакт 3 | + (9 \div 10) В, $\leq 75 \text{ мА}$ |
| контакт 4 | - (9 \div 10) В, $\leq 75 \text{ мА}$ |

*При обратном смещении на ФД – 500мВ.

** При обратном смещении на ФД – 100мВ.

***Расчетное значение.