



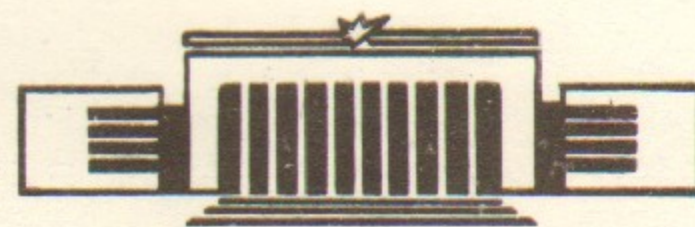
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

2

Л.Н. Вячеславов, Э.П. Кругляков, О.И. Мешков,
А.Л. Санин

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПРИБОР
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕ
ПО УШИРЕНИЮ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

ПРЕПРИНТ 86-16



НОВОСИБИРСК

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
МИКРОПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕ ПО УШИРЕНИЮ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Л.Н.Вячеславов, Э.П.Кругляков, О.И.Мешков, А.Л.Санин

А Н Н О Т А Ц И Я

Описан светосильный пятнадцатиканальный прибор с высоким спектральным ($0,2 \text{ \AA}$) и временным (~ 10 нсек) разрешением, предназначенный для исследования электронной ленгмюровской турбулентности плазмы по уширению спектральных линий.

Введение

Важной физической характеристикой процессов, происходящих в плазме при её взаимодействии с высокоэнергетическим релятивистским электронным пучком (РЭП), является уровень возбуждаемых им колебаний. Несмотря на длительное и интенсивное изучение эффектов пучково-плазменного взаимодействия в различных странах мира, до настоящего времени нет ни одного прямого эксперимента по измерению уровня ленгмюровской турбулентности плазмы, что объясняется, в частности, сложностью необходимых экспериментальных методик.

Уровень турбулентности можно определить, анализируя форму профиля водородных линий серии Бальмера, таких как H_{α} , H_{β} / I /, или по интенсивности запрещенных компонент $He / 2 /$. В обоих случаях речь идет о детальном изучении спектрального интервала масштаба нескольких ангстрем за времена порядка десятков наносекунд (характерное время инжекции РЭП). Для решения поставленной задачи требуется аппаратура, которая наряду с высокой разрешающей способностью по спектру обладает большой светосилой.

Данная работа посвящена развитию спектроскопической методики определения электрических микрополей непосредственно в процессе взаимодействия РЭП с плазмой.

Цель работы состояла в создании светосильной аппаратуры для регистрации формы профиля спектральных линий с высоким временным разрешением и с хорошим разрешением по спектру. Аппаратура предназначена для исследования турбулентности плазмы в процессе её взаимодействия с РЭП на установке ГОЛ-1М.

§ I. Требования к аппаратуре

Для регистрации профиля линии с полушириной масштаба 1 \AA , необходим спектральный прибор с большой дисперсией. Существующая спектральная аппаратура при необходимой дисперсии не обладает достаточной светосилой. Поэтому был создан прибор, основным элементом которого является интерферометр Фабри-Перо (ИФП). Оценки показывают, что ИФП обладает на два порядка большей светосилой, чем дифракционный прибор с аналогичными параметрами. Действительно, светосила ИФП по потоку

$$L_{\text{ФП}} = \frac{\pi}{2} T S \frac{\delta\lambda}{\lambda}$$

где T - прозрачность ИФП,

S - действующая площадь пластин ИФП,

λ - длина волны анализируемого излучения,

$\delta\lambda$ - регистрируемый спектральный интервал.

В случае дифракционного спектрометра соответствующая светосила по потоку имеет вид:

$$L_{\text{Д}} = ThS \frac{1}{F} \left(\frac{d\psi}{d\lambda} \right)$$

Здесь h - высота щели,

F - фокусное расстояние входного объектива,

$\frac{d\psi}{d\lambda}$ - угловая дисперсия прибора,

S - рабочая площадь решетки.

Проведем сравнение светосилы нашего прибора с двойным монохроматором ДФС-24.

Данные ДФС-24:

Относительное отверстие монохроматора	1:5,3
Фокусное расстояние зеркал	822 мм
Обратная линейная дисперсия двойного монохроматора (нм/мм)	0,45
Решетка	1200 штр/мм
Размер решетки	150x140 мм ²

Прибор на основе интерферометра Фабри-Перо:

Действующий диаметр ИФП 45 мм

Принимая равными коэффициенты пропускания T , получим $\frac{L_{\text{ФП}}}{L_{\text{Д}}} = 17$. Поскольку в действительности $T_{\text{ФП}} > T_{\text{Д}}$, реальный выигрыш по светосиле еще значительней.

§ 2. Оптическая схема прибора

Основу прибора составляет мультиплекс из двух ИФП с различными величинами промежутков. На рис.1 представлены аппаратные функции интерферометров с расстояниями между зеркалами t_2 (а) и t_1 (б) ($t_2 = 2t_1$). На рис.1(в) приведена аппаратная

функция системы из двух интерферометров. Таким образом, разрешающая способность мультиплекса равна разрешающей способности интерферометра, имеющего большую величину промежутка t_2 , а область дисперсии такая же, как у интерферометра с меньшим промежутком t_1 .

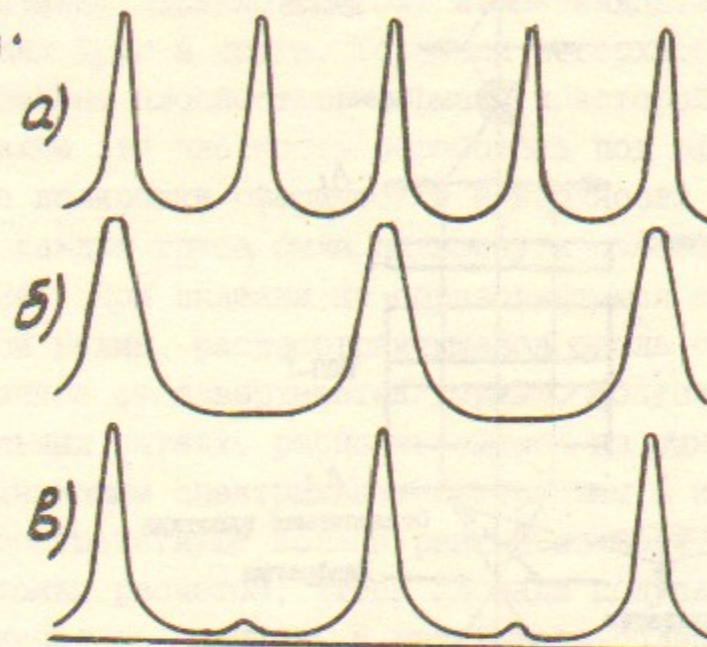


Рис.1. Аппаратные функции двух интерферометров Фабри-Перо (а, б) и составленного из них мультиплекса (в).

Для предварительной монохроматизации падающего на прибор излучения был применен интерференционный фильтр, полуширина которого (6 \AA) существенно меньше области дисперсии мультиплекс-интерферометра (27 \AA).

Оптическая схема прибора приведена на рис.2. Ось исследуемой плазмы помещалась в фокальной плоскости линзы L_1 . Излучение, прошедшее сквозь линзу, пропускалось сквозь узкополосный интерференционный фильтр с полушириной $\Delta\lambda \approx 6 \text{ \AA}$ и через первый ИФП (ИФП-1) с областью свободной дисперсии 27 \AA . Такое превышение области дисперсии над пропусканием фильтра необходимо, поскольку аппаратная функция фильтра имеет сильно вытянутые крылья. Диафрагма, расположенная в плоскости интерференционной картины, выделяла спектральный интервал в 3 \AA . Излучение выделенное диафрагмой, расположенной в фокальной плоскости линзы L_3 , трансформируется в слаборасходящийся пучок с углом расходимости $\Delta\psi = \frac{d}{2F} \approx 0,03$ ($d = 8 \text{ мм}$ - диаметр диафрагмы, $F = 135 \text{ мм}$ - фокус линзы L_3). Этот пучок заполняет апертуру второго интерферометра ИФП-2 с областью дисперсии 3 \AA . Система линз L_4, L_5 образует телескоп, способный формировать в

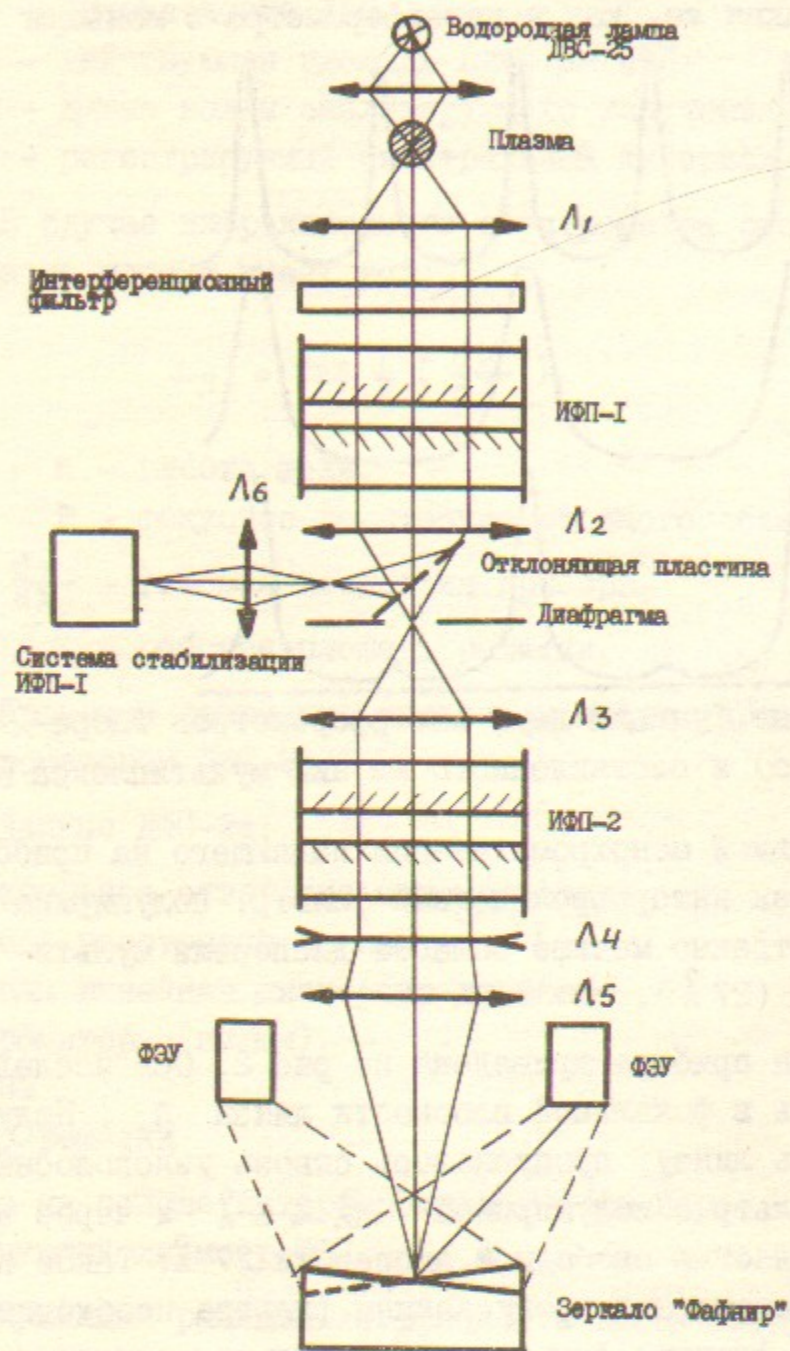


Рис.2. Оптическая схема прибора.

своей фокальной плоскости интерференционную картину с различными увеличениями.

Анализируемая область спектра интерференционной картины, совпадающая с областью дисперсии ИФП-2, разлагалась на 15 оди-

наковых спектральных интервалов с помощью специального зеркала "Фэфнир" /3,4/. Световой поток каждого из таких спектральных интервалов фокусировался на отдельный фотоумножитель.

Конструктивно зеркало состоит из пятнадцати соосных труб, плотно входящих друг в друга. Торцевая поверхность труб предварительно срезана плоскостью, нормаль к которой составляет 8° с осью труб. Далее эта плоскость обработана под сферу с радиусом 500 мм. После полировки сферической поверхности и напыления на нее алюминия каждая труба была развернута относительно соседней на угол 24° . При падении на образовавшуюся конфигурацию зеркал плоской волны, распространяющейся вдоль оси труб, излучение, отраженное от поверхностей зеркал, фокусируется в пятнадцати фокальных пятнах, располагающихся на одной окружности. Поскольку одинаковым спектральным интервалам в интерференционной картине соответствуют кольца равной площади, диаметры труб подобраны с таким расчетом, чтобы площади получившихся кольцевых зеркал оказались равными. В результате область дисперсии мультиплекс-интерферометра оказывается поделенной на пятнадцать равных спектральных интервалов. На рис.3 представлен внешний вид зеркала. Рис.4 иллюстрирует работу зеркала при падении на него параллельного пучка лучей.

В качестве детекторов излучения использовались 15 фотоумножителей ФЭУ-119, сигналы с которых регистрировались аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП) с полосой 8 МГц.

§ 3. Метод стабилизации интерференционной картины

Толщина зазора между зеркалами каждого ИФП должна подбираться с таким расчетом, чтобы пропускание системы на длине волны регистрируемой линии (в нашем случае $n_\alpha \quad \lambda = 6563 \text{ \AA}$) было максимальным. Изменение расстояния между зеркалами осуществлялось изменением температуры распорного кольца (4) интерферометра (см. Рис.5) с помощью подогревающей спирали (5).

Распорное кольцо изготовлено из материала с большим коэффициентом температурного расширения (бронзы БРХ-0,5). Материал с высокой теплопроводностью позволяет избежать неоднородностей прогрева распорного кольца, вызывающих нарушение юстировки интерферометра.

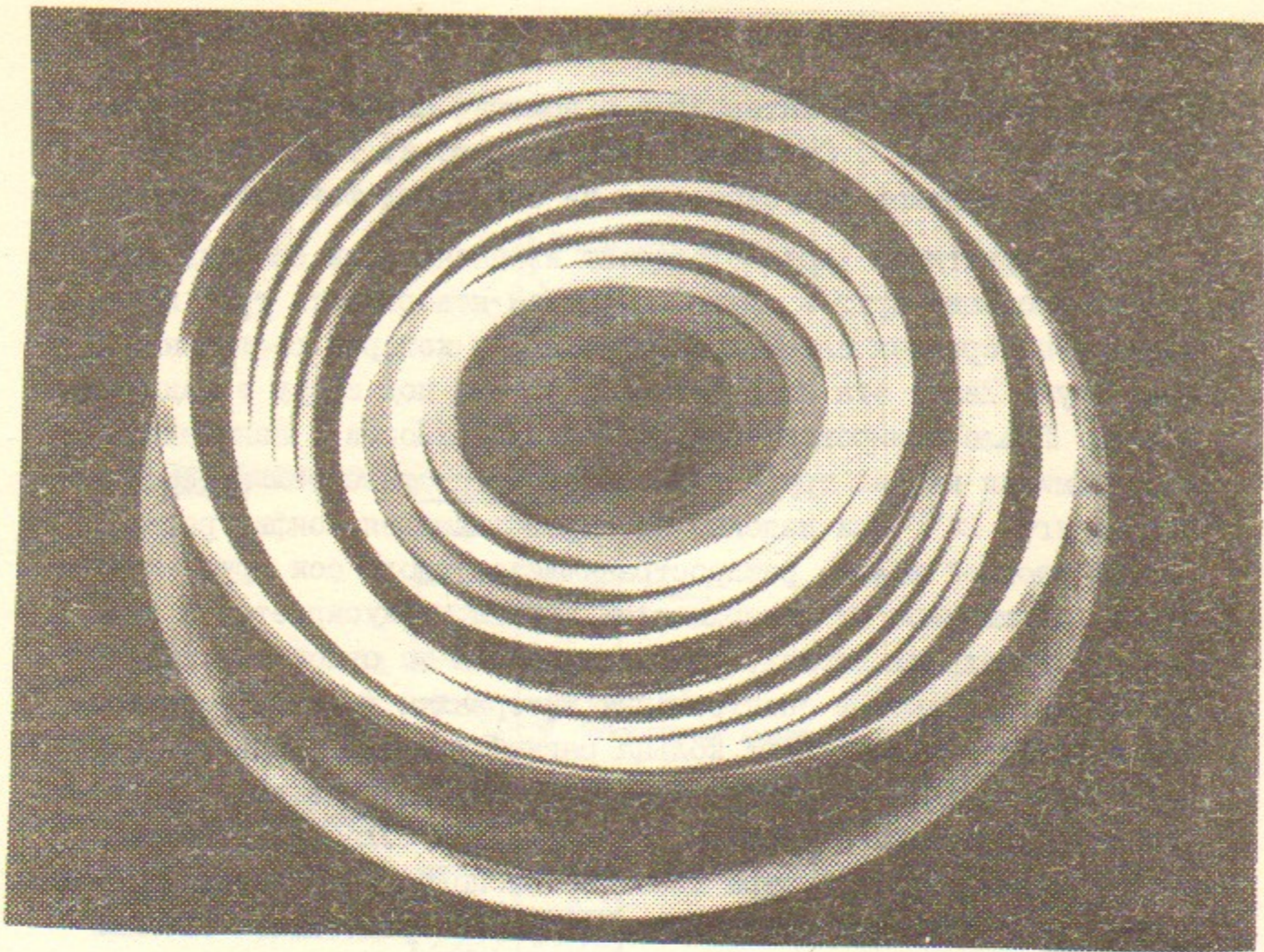


Рис.3. Пятнадцатизлементное сферическое зеркало.

Настройка на нужный спектральный интервал и стабилизация интерферометра от внешних тепловых воздействий осуществляется с помощью ЭВМ. Схема стабилизации представлена на рис.6.

Излучение водородной лампы ВЛ, прошедшее через интерференционный фильтр ИФ и первый ИФП, отклоняется светоделительной пластинкой С. Линзой L_6 интерференционная картина строится на блоке (БС) из трех световодов с сечением каждого $3 \times 3 \text{ мм}^2$. Излучение, прошедшее сквозь световоды, попадает на отдельные ФЭУ. Центр интерференционной картины совпадает с центром среднего световода. Линзой L_6 подбирается такое увеличение, чтобы размеру центрального световода соответствовала область спектра в 3 \AA . Максимум сигнала в среднем ФЭУ соответствует максимальному пропусканию ИФП-I вдоль оптической оси на длине волны n_{α} . Сигналы с ФЭУ регистрируются узкополосными 10-разрядными АЦП и заводятся в ЭВМ. Последняя через цифро-аналоговый преобразователь и усилитель постоянного тока (УПТ) устанавливает через греющую спираль ток, при котором уровень сигнала в

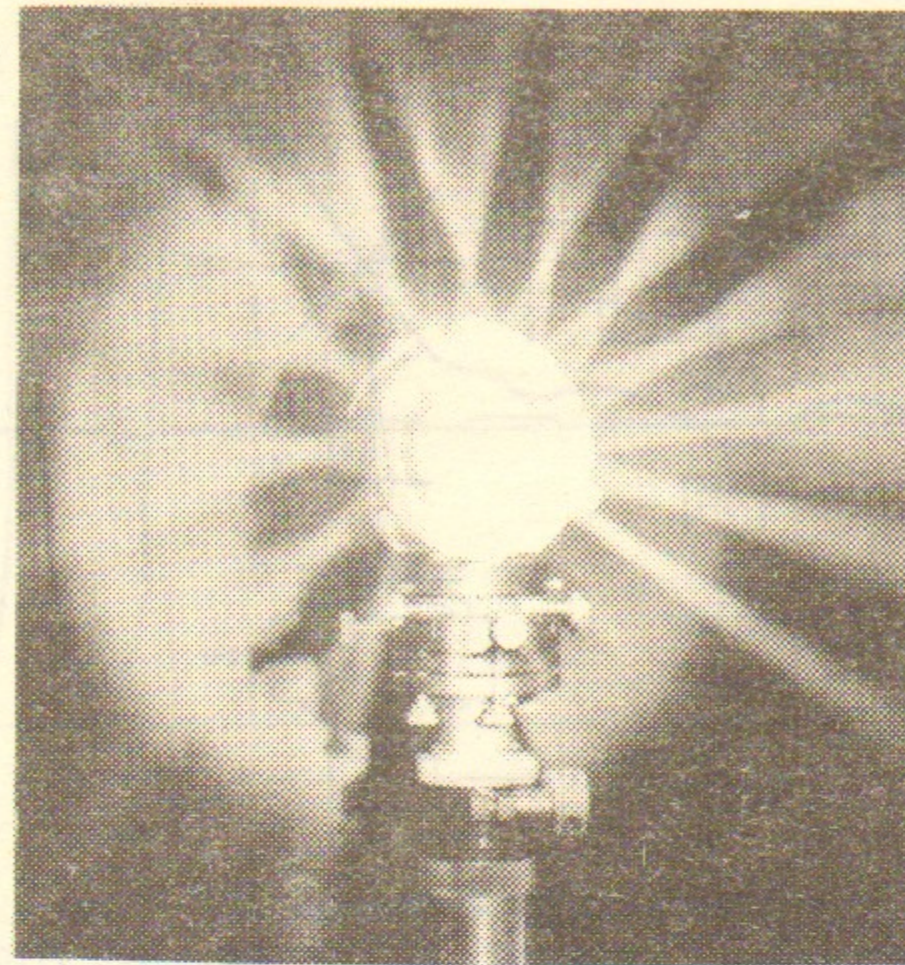


Рис.4. Разложение падающего излучения на пятнадцать пучков и фокусировка этих пучков (сфотографировано в рассеянном свете).

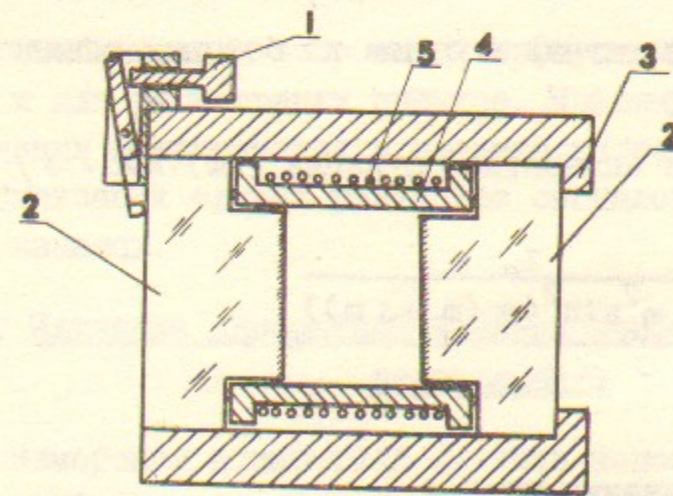


Рис.5. Конструкция интерферометра с системой термодобстройки. 1 - кустировочное приспособление; 2 - зеркала; 3 - корпус; 4 - распорное кольцо; 5 - спираль.

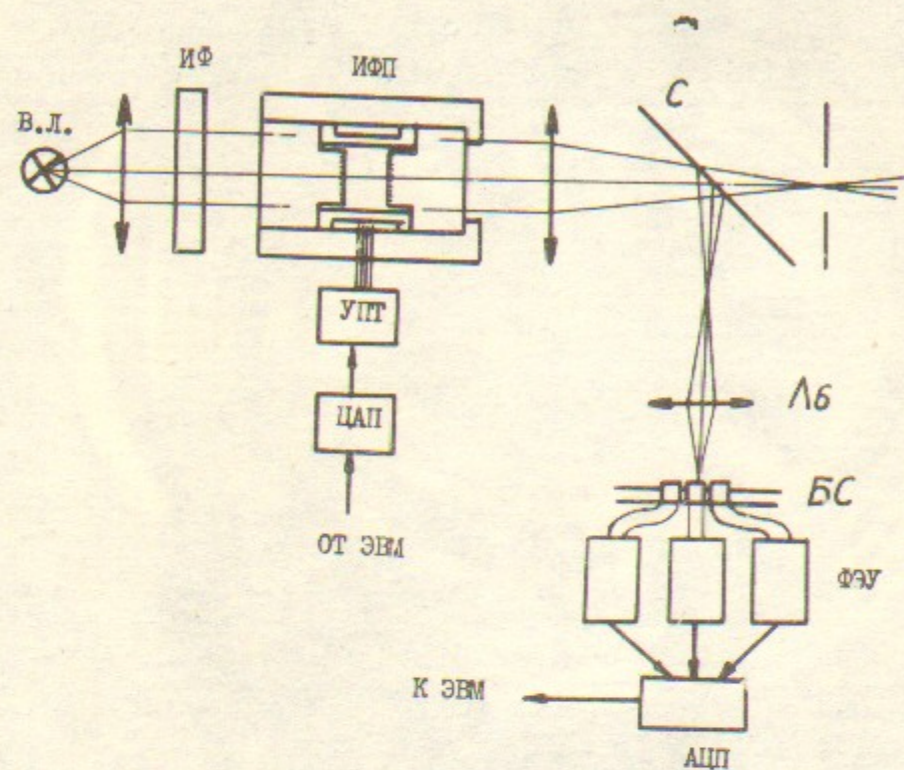


Рис.6. Схема стабилизации интерферометра.

центральный канал близок к максимальному. Практически стабилизация осуществлялась по уровню сигнала в одном из боковых каналов, поскольку эти каналы более чувствительны к изменениям интерференционной картины (производная сигнала центрального канала вблизи максимума мала, в то же время она максимальна для боковых каналов).

На Рис.7 показан сигнал в одном из боковых каналов в зависимости от времени.

Из выражения для аппаратной функции (АФ) ИФП /5/

$$I = \frac{I_0}{1 + \eta^2 \sin^2(\pi(m + \delta m))}$$

где $\eta = \frac{2\sqrt{\rho}}{1-\rho}$

ρ - коэффициент отражения зеркал,

m - номер порядка интерференции, $\delta m < 1$,

I_0 - амплитуда АФ

дно, что производная имеет максимум в области $I \approx \frac{I_0}{2}$

$$\frac{I}{m} = \frac{I_0}{2} \pi \eta$$

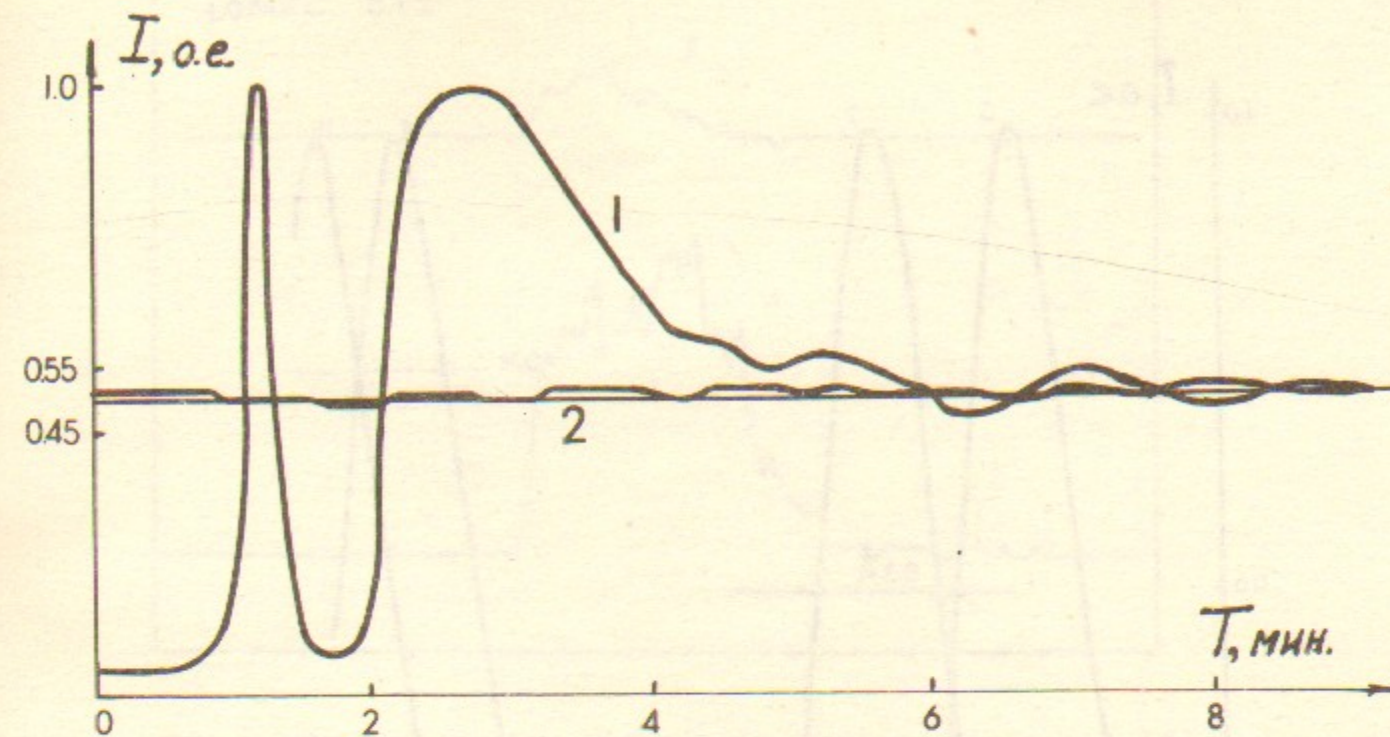


Рис.7. Временное поведение сигнала в боковом канале в процессе стабилизации интерферометра.

АФ канала уширена по сравнению с АФ ИФП примерно в полтора раза, поэтому изменению $\frac{\Delta I}{I} \approx 5\%$ соответствует точность стабилизации $\delta m \approx 5 \cdot 10^{-3}$ интерференционного порядка (0,1 Å), что и подтверждается экспериментально.

Для стабилизации второго интерферометра используются те же ФЭУ, что и для регистрации спектра. Максимум излучения спектральной линии направляется в заранее выбранный канал, а критерием стабилизации служит равенство сигналов от крыльев линии в соседних каналах.

§ 4. Изучение аппаратной функции прибора и модельные эксперименты

Для измерения аппаратной функции использовалась водородная лампа ДВС-25 с узкой спектральной линией. Сигналы с ФЭУ регистрировались десятиразрядными АЦП, встроенными в высоковольтные блоки питания /6/.

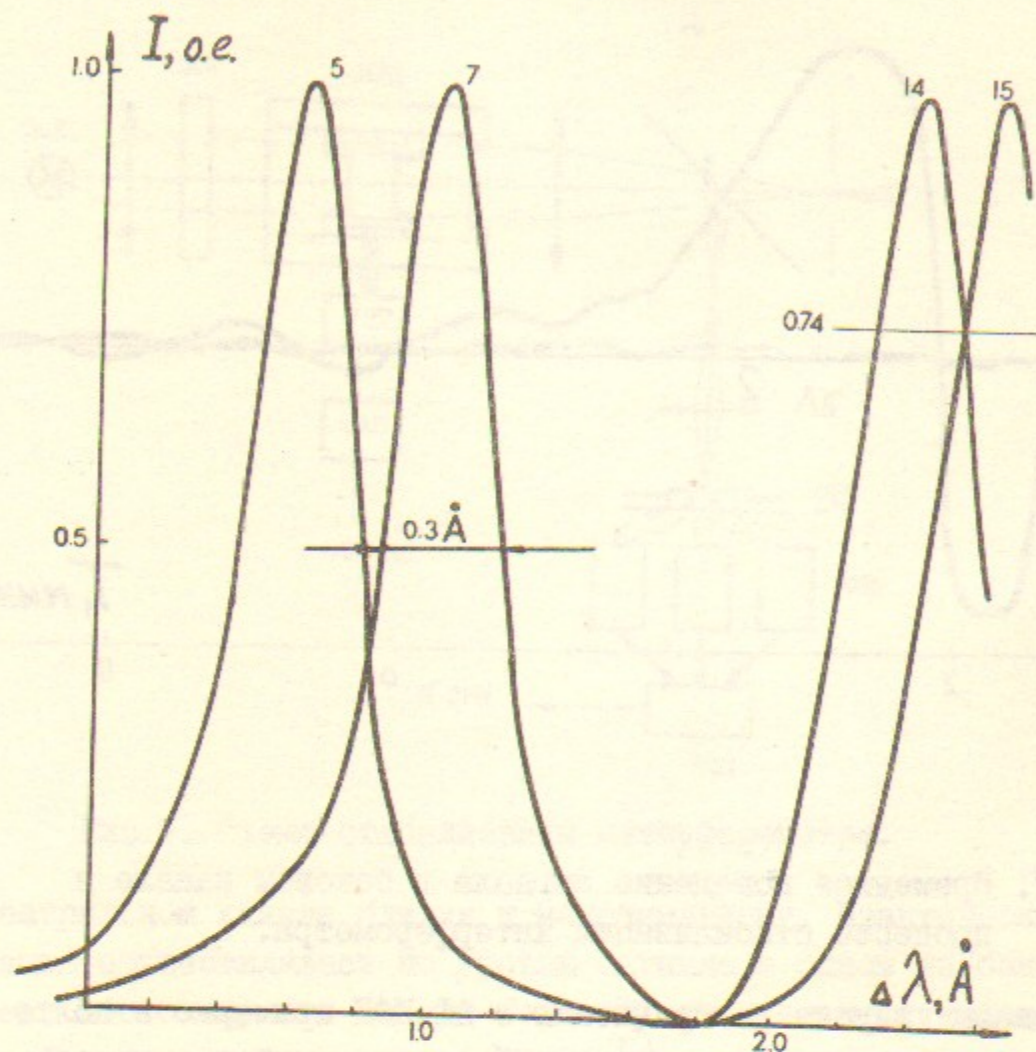


Рис.8. Аппаратные функции каналов № 5, 7, 14, 15.

Аппаратные функции нескольких каналов показаны на Рис.8. Измеренная полуширина составляет $0,3 \text{ \AA}$, соседние каналы перекрываются на уровне $0,74$.

Для проверки работоспособности системы были проведены измерения спектра излучения плазмы тиратрона ТТИГ-325/16 с водородным наполнением.

Типичные осциллограммы сигналов представлены на рис.9. Сигнал (1) соответствует центру линии, (2) - крылу.

Полученные спектры линии H_{α} приведены на рис.10. Сплошная кривая - профиль линии H_{α} , построенный по таблицам Грима [7] для плазмы с параметрами $n_e \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $T_e \approx 5 \text{ эВ}$. Экспериментальные данные приведены для двух различных моментов времени: темные кружки - через $0,5 \text{ мсек}$ после начала разряда, светлые - $1,5 \text{ мкс}$.

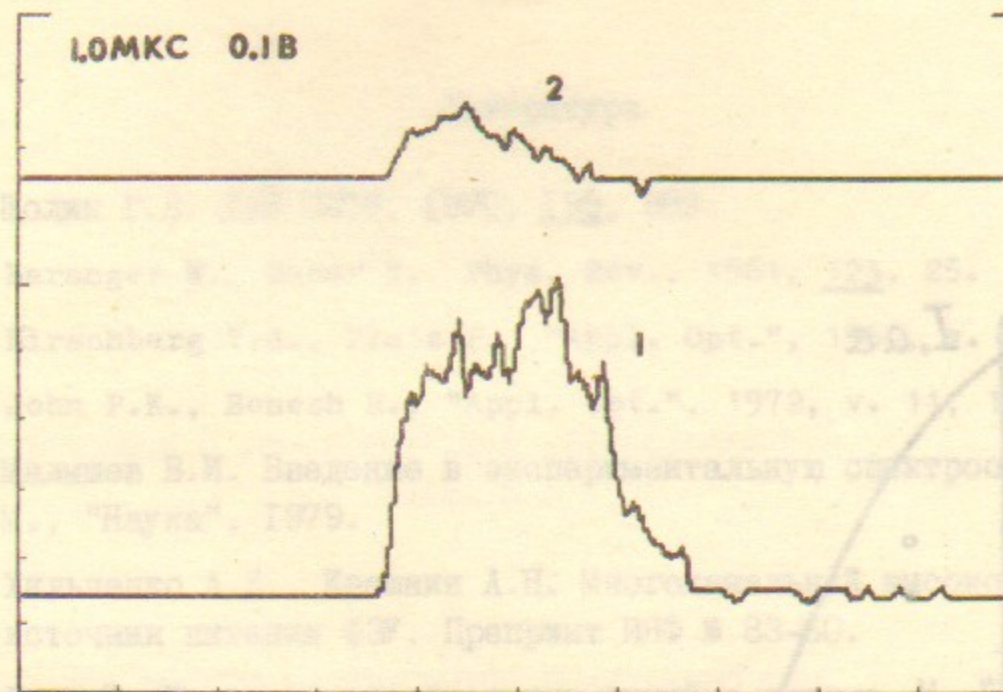


Рис.9. Осциллограммы сигналов в каналах первом - (1) и восьмом (2).

Значительный экспериментальный разброс интенсивностей в различных каналах, по-видимому, связан с тем, что в модельных экспериментах ток, пропускавшийся через тиратрон (несколько килоампер), существенно превосходил паспортное значение. В этих условиях разряд тиратрона состоит из множества микродуг, что и объясняет наблюдаемые осцилляции интенсивности излучения. Одновременно это приводит к неравномерностям засветки фокусирующего зеркала "фафнир" и, как следствие, к разбросу экспериментальных данных.

Заключение

Разработан и изготовлен прибор со спектральным и временным разрешением, достаточным для исследования лентимировских микрополей, возникающих при взаимодействии РЭП с плазмой.

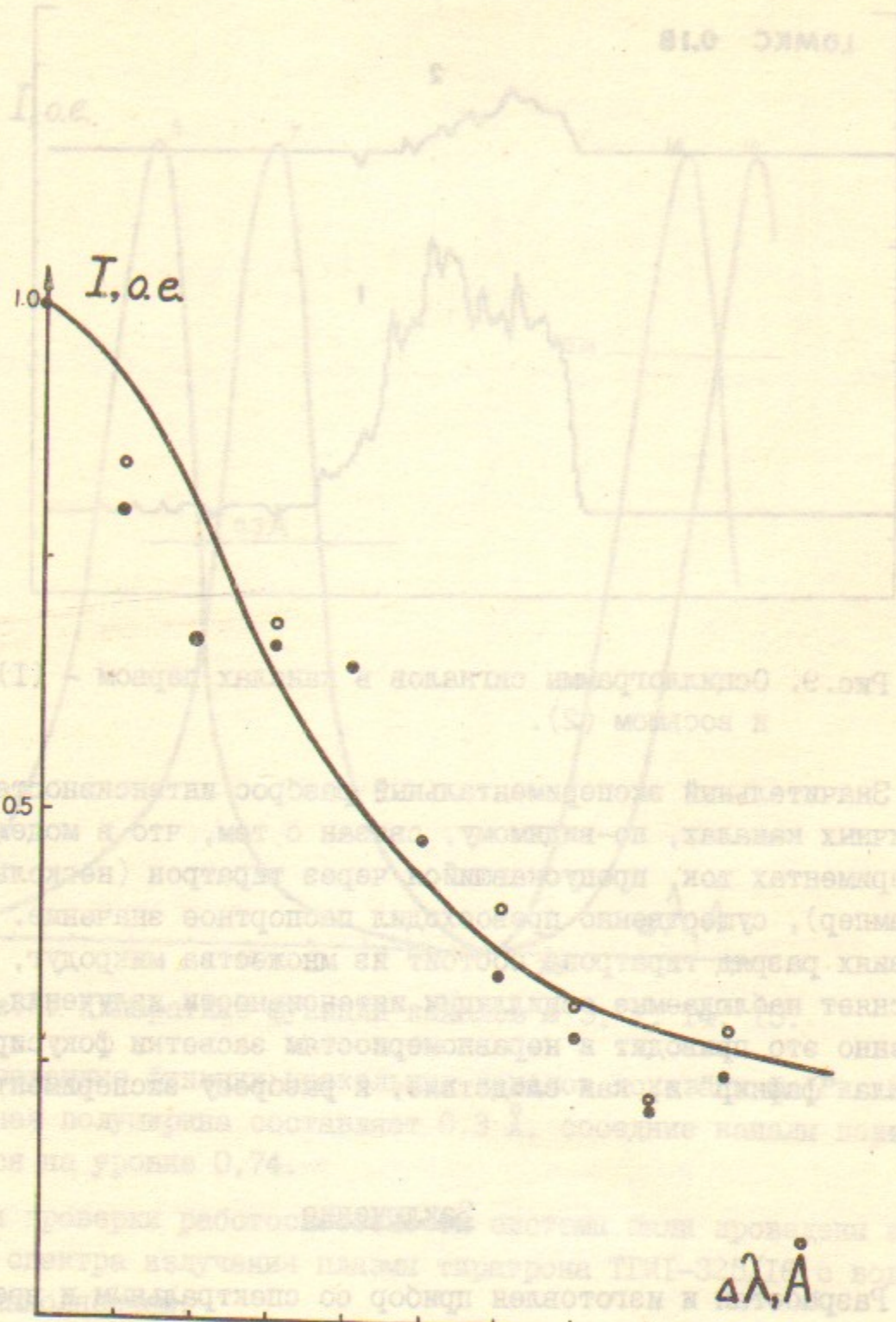


Рис.10. Профиль линии H_{α} плазмы водородного тиратрона. Темные и светлые кружки – результаты измерения сигналов в каналах для двух различных моментов времени.

Литература

1. Шолин Г.В. ДАН СССР, 1970, 195, 589.
2. Baranger M., Mozer B. Phys. Rev., 1961, 123, 25.
3. Hirschberg T.G., Platz P. "Appl. Opt.", 1965, v. 4, 1375.
4. John P.K., Venesh R., "Appl. Opt.", 1972, v. 11, 153.
5. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М., "Наука", 1979.
6. Хильченко А.Д., Квашнин А.Н: Многоканальный высоковольтный источник питания ФЭУ. Препринт ИЯФ № 83-60.
7. Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М. "Мир", 1978.

Л.Н.Вячеславов, Э.П.Кругляков, О.И.Мешков,
А.Л.Санин

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕ ПО
УШИРЕНИЮ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Препринт
№ 86-16

Работа поступила - 22 ноября 1985 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 21.01-1986 г. МН II634

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.1,3 печ.л., 1,0 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 16.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90