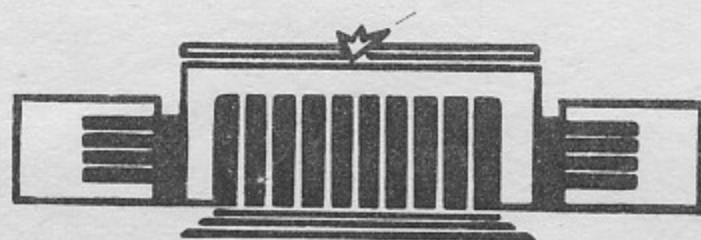


Л. Н. Вячеславов, Э. П. Кругляков, О. И. Мешков,
А. Д. Хильченко, Ю. А. Цидулко

**СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ
ЛАЗЕРНОГО РАССЕЯНИЯ
НА УСТАНОВКЕ «ГОЛ-1»**

ПРЕПРИНТ 84-148



НОВОСИБИРСК

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО РАССЕЙЯНИЯ
НА УСТАНОВКЕ "ГОЛ-1"

Вячеславов Л.Н., Кругляков Э.П., Мешков О.И.
Хильченко А.Д., Цидулко Ю.А.

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается система лазерного рассеяния для измерения температуры и плотности плазмы на установке с мощным РЭП. Питание ФЭУ, используемых для регистрации рассеянного света, осуществляется многоканальными программируемыми источниками. Для регистрации сигналов применен цифровой осциллограф "Магнолия", работающий совместно с ЭВМ *ОДРА* -1325. Имеется возможность вести обработку сигналов в полуавтоматическом режиме с использованием дисплея ЦДР. Относительная импульсная калибровка каналов производится засветкой ФЭУ частью излучения лазера, задержанного в одножильном световоде.

Установка ГОЛ-1 [1] предназначена для исследования нагрева плазмы мощным релятивистским пучком электронов (РЭП). Основные ее параметры таковы: длина соленоида 7,5 м, напряженность магнитного поля в центральной части 13,5 кЭ. В плазму с плотностью $2+5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ инжектируется РЭП с энергией электронов 0,5 МэВ, током 60 кА и длительностью порядка 40 нс.

Система лазерного рассеяния, расположенная на расстоянии 3,5 м от места инжекции РЭП, используется для измерений плотности и температуры плазмы вблизи оси установки. Ее общее устройство показано на рис.1. Система начала функционировать в 1977 г. и неоднократно модернизировалась. В данной статье описывается последний вариант.

Источником излучения служит двухкаскадный рубиновый лазер, обеспечивающий до 5 Дж энергии в импульсе с длительностью около 30 нсек и расходимостью $5 \cdot 10^{-3}$ рад.

Спектральный анализ света, рассеянного под углом 90° , осуществляется с помощью монохроматора МДР-2 с обратной линейной дисперсией 20 Å/мм.

Элемент рассеивающего объема с размерами 1,5x30 мм² переносится объективом с относительным отверстием 1:9 на входную щель монохроматора с уменьшением в три раза. Для улучшения отношения сигнал/шум перед входной щелью МДР-2 установлена поляризационная призма, ориентированная на полное пропускание рассеянного лазерного излучения. При этом неполяризованное фоновое излучение плазмы ослабляется в два раза.

Световодный коллектор, устанавливаемый в плоскости выходной щели монохроматора, первоначально был изготовлен из оргстекла. Из десяти его каналов пять имели ширину около 0,5 мм, а остальные - около 1,5 мм. Это позволяет, не меняя дисперсию монохроматора, достаточно точно измерять электронные температуры, различающиеся в несколько раз. Однако такой коллектор трудоемок в изготовлении. Впоследствии, в новой аппаратуре, он был заменен девятиканальным стекловолоконным коллектором с коэффициентом пропускания 60% для света, собираемого в телесном угле коллимирующей оптики МДР-2. Размеры одного канала составляют $0,5 \times 10 \text{ мм}^2$.

Использование в монохроматоре сменных дифракционных ре -

шеток позволяет варьировать измеряемую ширину спектра в пределах 90 \AA (решетка с 1200 штр/мм) + 360 \AA (300 штр/мм), что соответствует диапазону измеряемой электронной температуры $I \pm 500 \text{ эВ}$.

Для регистрации световых сигналов используются фотоумножители ФЭУ-84. Световоды крепятся к входным окнам ФЭУ под углом $\sim 20^\circ$. Наклонный ввод света повышает квантовый выход фотокатода примерно в полтора раза. Блок из девяти ФЭУ размещается в двухслойном корпусе из магнитомягкой стали и меди и защищен свинцовым экраном толщиной 5 см от жесткого рентгеновского излучения, возникающего при работе ускорителя.

Специфика регистрации спектров томсоновского рассеяния при взаимодействии сильноочного РЭП с плазмой состоит в присутствии быстро меняющегося во времени фоновго излучения плазмы, нарастающего во время инжекции РЭП и спадающего в течение нескольких сотен наносекунд (см. рис. 2(a)). Фоновый сигнал определяется как собственно излучением плазмы при ее взаимодействии с РЭП, так и флуоресценцией оптических элементов, возникающей под воздействием жесткого рентгеновского излучения. Фонсовая засветка в несколько раз превосходит сигналы рассеяния в каналах, удаленных по спектру от линии излучения лазера. При этом дробовой шум составляет порядка 10% полезного сигнала.

Указанные обстоятельства существенно затрудняют использование методов частотной фильтрации сигналов рассеяния с последующей регистрацией на основе схем с накоплением заряда [2], а также использование дифференциальной методики с вычитанием фона [3]. Естественным выходом из положения представляется осциллографирование сигналов. Для этого использован цифровой осциллограф "Магнолия", разработанный в ИЯФ СО АН СССР [4]. 10 каналов регистрации, занимающие две стойки "Вишня", связаны с ЭВМ ОДРА-1325. Сразу после считывания сигналов существующее программное обеспечение позволяет просмотреть развертку каждого канала на дисплее ЦДР [5]. Это же программное обеспечение позволяет, при необходимости, производить измерения амплитуд на экране ЦДР с помощью "движущегося уровня", управляемого с дисплея "VT-340". При этом задача экспериментатора ограничивается указанием положения нуля и максимума сигнала.

Вычисление температуры электронов по полученному набору амплитуд производится автоматически.

Питание блока фотоумножителей осуществлялось многоканальным высоковольтным стабилизированным источником [6]. Возможность независимого подбора напряжений на делителях ФЭУ существенно расширяет динамический диапазон системы регистрации. Источник питания оборудован блоком связи с ЭВМ, установка напряжения на ФЭУ производится программным образом и контролируется в ходе эксперимента. Погрешность коэффициента стабилизации напряжения - 0,05%. Конструкцией прибора предусмотрена возможность непрерывного контроля за относительной чувствительностью каналов при постоянной засветке ФЭУ извне. Для этого в источнике встроен 10-ти разрядный АЦП. Для проведения относительной импульсной калибровки каналов непосредственно в ходе эксперимента часть излучения лазера заводилась в световод $\varnothing 0,2 \text{ мм}$, длиной около 65 мм и подавалось на ФЭУ (рис. 2б). Амплитуда калибровочного импульса подбиралась в соответствии с чувствительностью данного канала. Уровню типичного сигнала в 50-100 мВ на нагрузке 50 Ом соответствует погрешности в 5-10%, обусловленная дробовым шумом.

Абсолютная калибровка системы осуществлялась стандартным образом - по рэлеевскому рассеянию на газе. Давление в разрядной камере в несколько мм.рт.ст., соответствующее плотности плазмы $2 + 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ создавалось напуском воздуха из калиброванного объема. Энергия лазера контролировалась по фотоэлементу ФЭК-14, сигналы с которого регистрировались АЦП АФИ-16 [7]. Блок-схема системы регистрации приведена на рис.3.

Обработка результатов измерений

Для максвелловского распределения электронов плазмы по скоростям график зависимости логарифма значения рассеянной мощности P_3 от квадрата величины отстройки $\Delta \lambda_k$ канала k от центра линии имеет вид прямой с тангенсом угла наклона

$$G = -2,68 \cdot 10^{-3} / T_e, \Delta \lambda_k [\text{\AA}]$$

T_e - температура электронов, э-в. Температура определялась методом наименьших квадратов, при этом ошибка равна [8]

$$\Delta T_e \approx \frac{373 T_e^2}{\sum_{k=1}^N (\frac{\Delta I_k}{S_k})^2}, \quad \sigma_k' = \frac{\sigma_k}{S_k}$$

где N - число каналов, σ_k - погрешность измерения в k -ом канале, S_k - сигнал в этом канале.

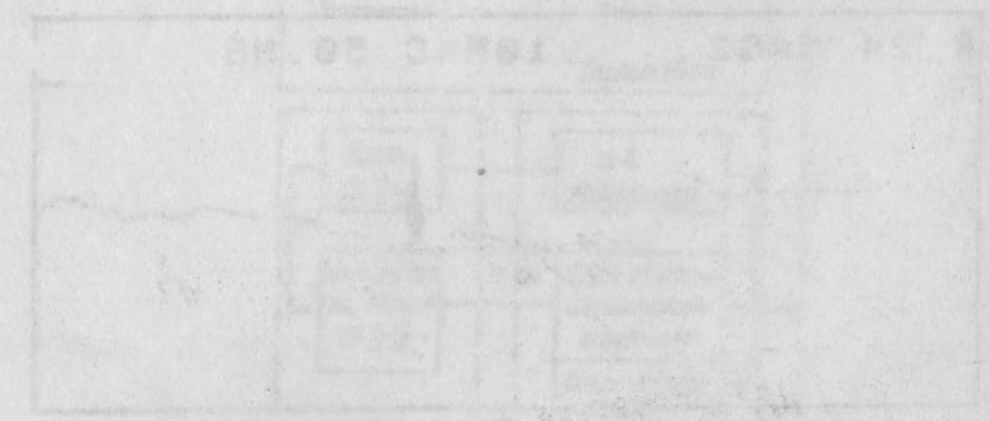
Плотность плазмы определялась по интегральной интенсивности рассеянного света. Результат обработки одного из экспериментов с инъекцией РЭП в плазму приведен на рис.4.

В заключении отметим, что описанная система позволяет надежно определять температуру и плотность плазмы, начиная с $n_e \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Использование сменных дифракционных решеток дает возможность проводить температурные измерения в диапазоне $1 \text{ э-в} \lesssim T_e \lesssim 500 \text{ э-в}$. При сильно загрубленной дисперсии монохроматора, когда сигнал рассеяния регистрируется только в одном канале, минимальная обнаружимая плотность $n_{e \min} \approx 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Авторы выражают признательность В.Ф.Жарову за помощь при отладке системы и проведении измерений.

Л и т е р а т у р а

1. Будкер Г.И. и др. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, IAEA, Вена, 1975, 2, 763.
2. Atsushi O., IPPJ-T-1G, Nagoya Univ., Nag., J., Oct. 1973.
3. Kunze H.J., Eberhagen A., Funfer B. "Phys. Lett.", 1964, v.13, p.38.
4. Аульченко В.М., Коршунов Ю.В., Кутовенко В.Д., Мелехов Г.Г., Усов Ю.В. ПТЭ, № 5, 1978, стр.266.
5. Купер Э.А., Нифонтов В.И., Пискунов Г.С., Репков В.В. Препринт ИЯФ СО АН СССР 79-38.
6. Квашин А.Н., Хильченко А.Д. Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-60.
7. Сазанский В.Я., Шейнгузихт А.А. Препринт ИЯФ СО АН СССР 79-37.
8. Д.Худсон. Статистика для физиков. М., "Мир", 1967.



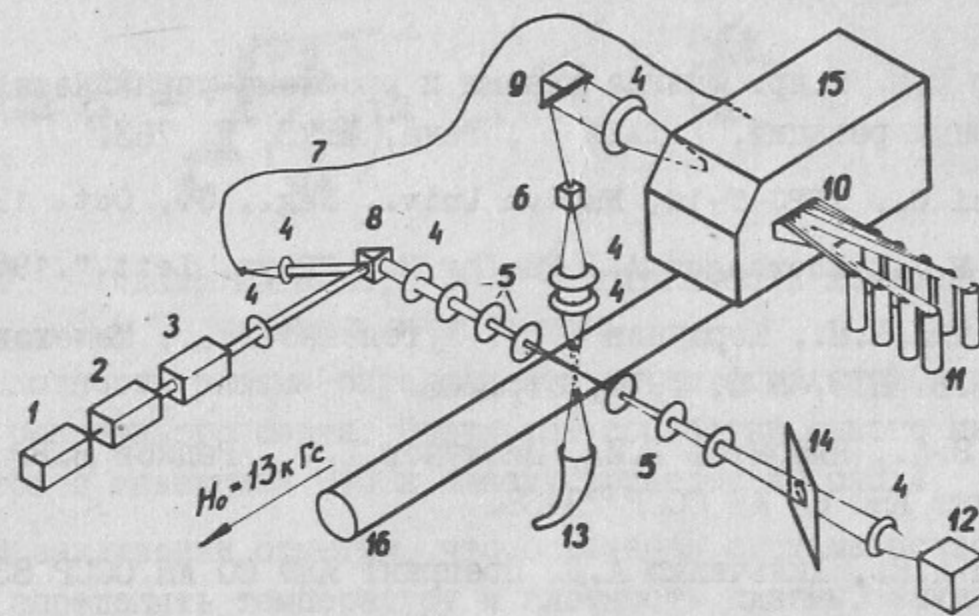


Рис.1. Система лазерного рассеяния на установке "ГОЛ-1":
 I – He-Ne- лазер; 2,3 – рубиновый лазер (5 Дж, 30 нсек)
 4 – линза; 5 – коллимирующие диафрагмы; 6 – поляризационная призма; 7 – световая задержка; 8 – поворотная призма; 9 – поворотное зеркало; 10 – световодный коллектор; 11 – блок ФЭУ; 12 – коаксиальный фотозащелк; 13 – световая ловушка; 14 – окно вывода излучения (стекло КС-9); 15 – монохроматор МДР-2; 16 – вакуумная камера установки.

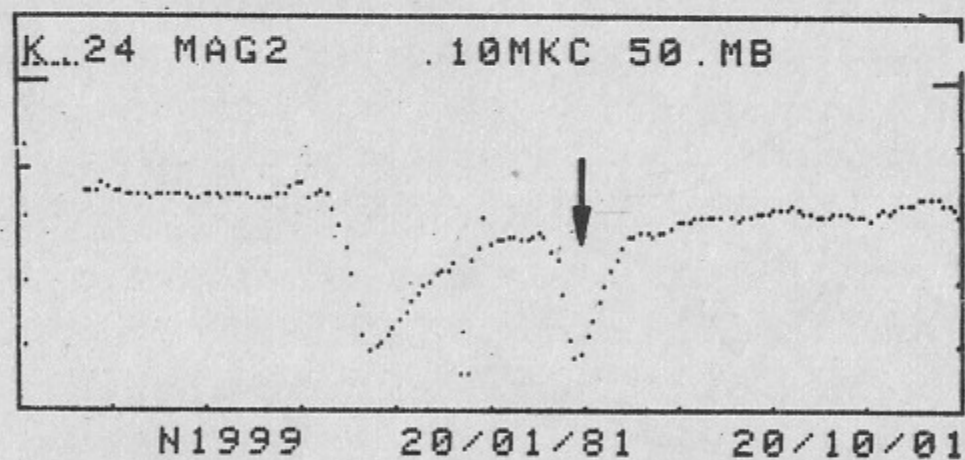


Рис.2а. Изображение на ЦДР развертки луча одного из каналов цифрового осциллографа "Магнолия". На осциллограмме хорошо виден фоновый сигнал, возникающий после инъекции РЭП в плазму. Сигнал рассеяния отмечен стрелкой.

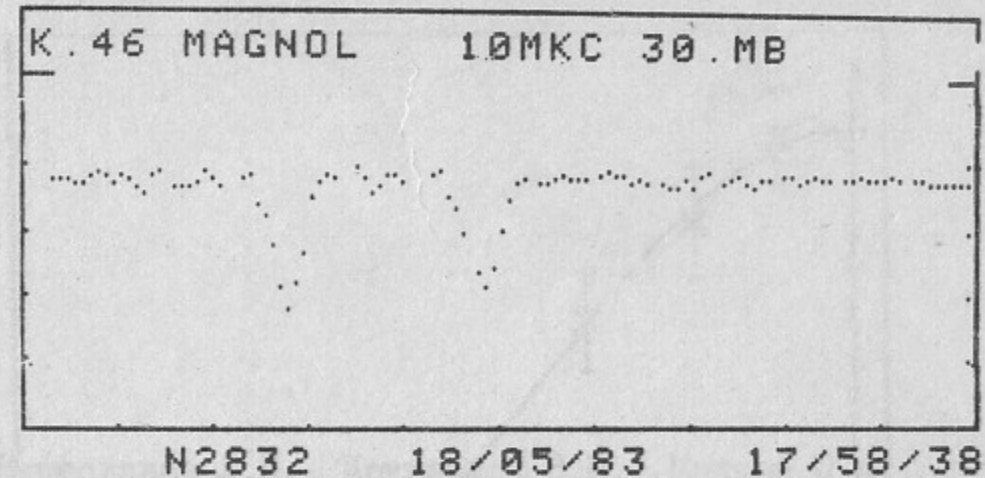


Рис.2б. Сигнал рассеяния на предплазме. Второй импульс калибровочный.

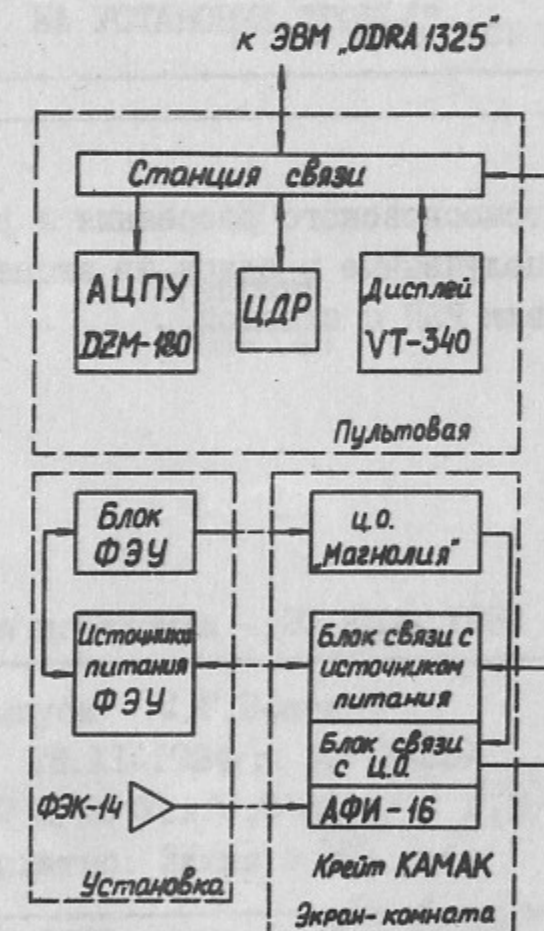


Рис.3. Блок-схема системы регистрации лазерного рассеяния.



Рис.4. Спектр томсоновского рассеяния и результат его обработки, полученные в одном из экспериментов по взаимодействию РЭП с плазмой.

Вячеславов Л.Н., Кругляков Э.П., Мешков О.И.,
Хильченко А.Д., Цицулко Ю.А.

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО РАССЕЯНИЯ
НА УСТАНОВКЕ "ГОЛ-1"

Препринт
№ 84-148

Работа поступила - 20 июля 1984 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 28.XI-1984 г. МН 06229

Формат бумаги 60x90 I/I6 Усл.0,9 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 148.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90