

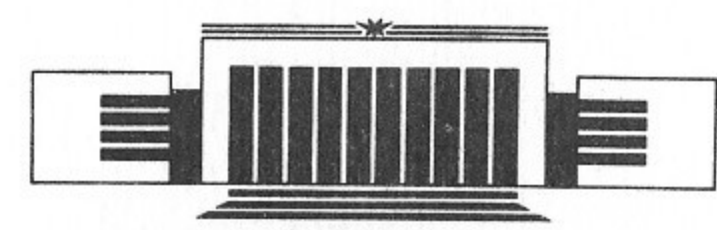


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.В. Бурдаков, В.В. Поступаев, Е.П. Семенов

**СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ПО 90°
ТОМСОНОВСКОМУ РАССЕЯНИЮ
НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3**

ПРЕПРИНТ 91-33



НОВОСИБИРСК

Система измерения температуры плазмы
по 90° томсоновскому рассеянию на установке ГОЛ-3

А. В. Бурдаков, В. В. Поступаев, Е. П. Семёнов

А Н Н О Т А Ц И Я

Описана диагностическая система, предназначенная для измерения температуры и плотности плазмы по 90° томсоновскому рассеянию излучения рубинового лазера. В неё входит рубиновый лазер, оптическая система, системы контроля, управления и регистрации. Рубиновый лазер состоит из задающего генератора, работающего в режиме гигантского импульса, и трёх усилителей с нарастающим диаметром активного элемента. Выходная энергия около 15 Дж при длительности импульса 25 нс. Управление зарядкой лазера, сбор информации и синхронизация работы всех систем автоматизированы.

Приводятся примеры работы диагностической системы в экспериментах на установке ГОЛ-3.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих плазменных экспериментах важные результаты по определению параметров плазмы получены при помощи активных диагностик, использующих рассеяние света зондирующего лазера на плазме. В зависимости от параметра $\alpha = (kr_D)^{-1}$ (где k - разность волновых векторов падающего и рассеянного излучения, r_D - дебаевский радиус) этой методикой измеряется либо томсоновское рассеяние ($\alpha \ll 1$) с определением электронной температуры и плотности, либо коллективное рассеяние в случае $\alpha > 1$. Для томсоновского рассеяния в случае максвелловской функции распределения электронов плазмы спектр рассеянного света имеет гауссовскую форму с полушириной $\Delta\lambda = 19.3 \cdot \sqrt{T_e} [\text{Å}]$ (по уровню $1/e$, T_e в эВ), а его интенсивность линейно зависит от плотности плазмы.

Особую роль такие диагностики играют в экспериментах по нагреву плазмы мощными релятивистскими электронными пучками (РЭП) по нескольким причинам. Во-первых, как было показано в экспериментах [1 - 3], энергия пучка в результате коллективных эффектов передаётся в основном электронам плазмы. Во-вторых, в результате взаимодействия в плазме образуется большое количество надтепловых электронов ("хвосты" функции распределения), которые существенно затрудняют использование ряда других диагностик, например, рентгеновской. В-третьих, в плотной и горячей плазме затруднено использование других локальных диагностик, например, ленгмюровских зондов. В-четвёртых, измерения коллективного рассеяния на ленгмюровских колебаниях могут дать уникальную информацию о природе взаимодействия пучка с плазмой [4].

Эффективность передачи энергии от пучка к плазме, достигнутая на установках первого поколения ИНАР, ГОЛ-1 и других, доходит при оптимальных условиях до 30 - 40%. Это позволило приступить к экспериментам на новом уровне энергетики на

установке ГОЛ-3 [5, 6]. При подготовке этого эксперимента было принято решение в числе диагностик первой очереди подготовить систему лазерного рассеяния, начав с 90° томсоновского рассеяния излучения рубинового лазера. Для этой системы были максимально использованы узлы системы томсоновского рассеяния установки ИНАР, эксперименты на которой были прекращены.

Томсоновская диагностика установки ИНАР [7] состояла из мощного рубинового лазера с хорошим качеством луча и трёх независимых систем регистрации: 8-канальной системы 90° рассеяния для измерения температуры основной компоненты электронов плазмы, 4-канальной системы 8° рассеяния для измерения "хвостов" электронной функции распределения и 8-канальной системы контроля радиального профиля плотности плазмы. Регистрация велась на осциллографы.

Несмотря на то, что при подготовке диагностики для ГОЛ-3 было намерение максимально использовать готовые оптические и механические узлы существовавшей лазерной системы ИНАР, потребовался значительный объём оптико-механических работ. Большая сложность установки ГОЛ-3 потребовала также перехода к автоматизации систем управления, питания и регистрации.

КОМПОНОВКА СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОГО РАССЕЯНИЯ

Перенос лазерной диагностики на установку ГОЛ-3 потребовал существенных переделок как в конструкции, так и в оптической части. Практически заново была сделана система силового питания, управления и регистрации. Основной особенностью системы лазерного рассеяния установки ГОЛ-3 является "жесткость" конструкции: лазер и приёмная оптическая система (объектив, полихроматор) находятся на общей массивной раме, так что смещение вакуумной камеры и соленоида в момент включения магнитного поля не сбивают юстировку. Такая конструкция позволяет в течение длительного времени (практически - до месяца) сохранять юстировку на всём тракте лазерной системы и регистрации оптического излучения.

Расположение диагностики на установке ГОЛ-3 показано на рис. 1. Она смонтирована на силовой раме 1. После лазерной системы 2 луч попадает в юстировочный блок 3, состоящий из двух юстировочных призм и фокусирующей линзы 4, после чего фокусируется в центр вакуумной камеры 13 (который является и центром плазменного столба). Регистрация рассеянного света осуществляет-

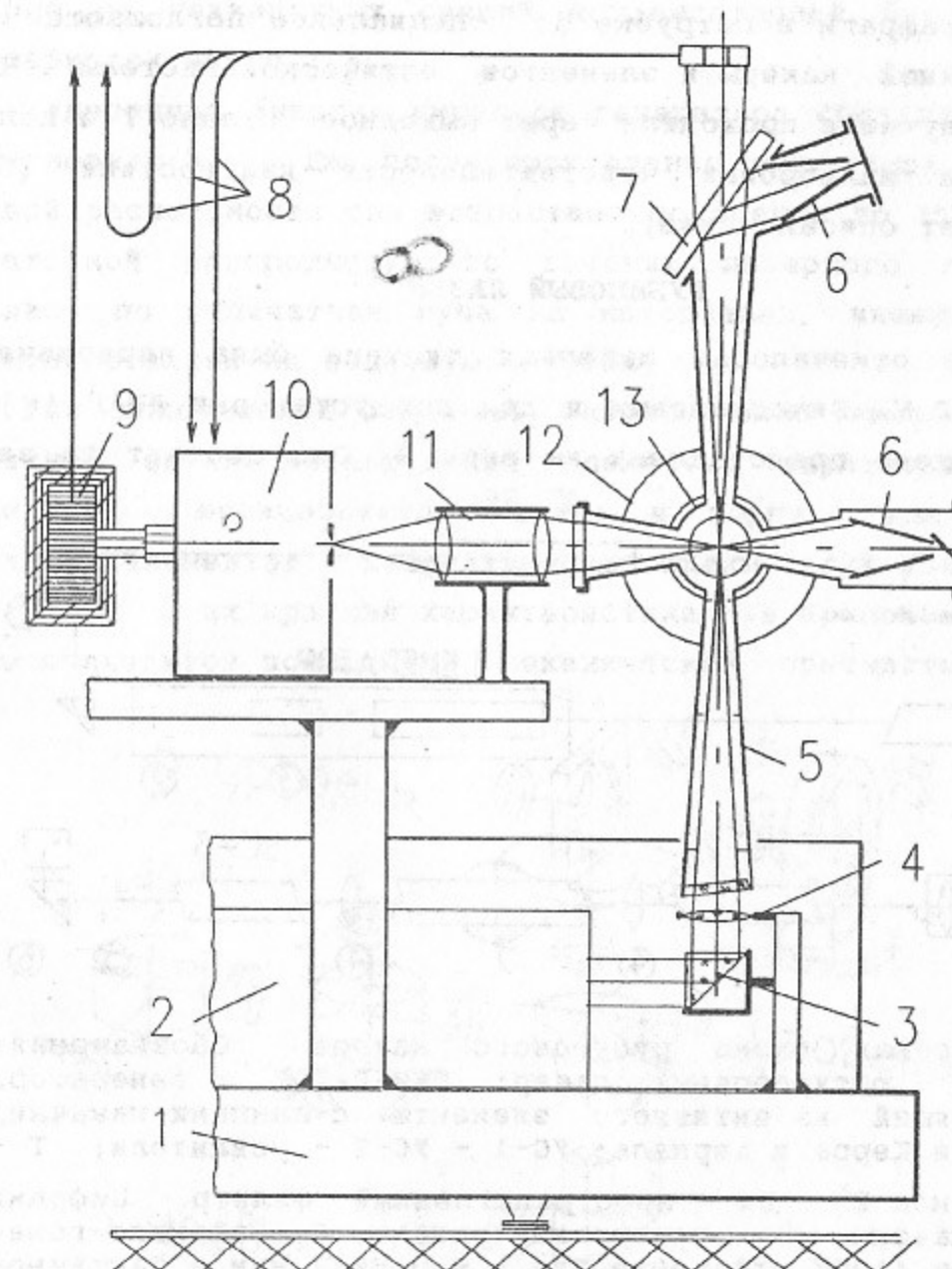


Рис. 1. Расположение диагностики на установке. Показана плоскость, перпендикулярная вакуумной камере. Цифрами обозначены: 1 - силовая рама лазерной диагностики; 2 - рубиновый лазер; 3 - юстировочные призмы; 4 - фокусирующая линза с $f = 600$ мм; 5 - входной патрубок с диафрагмами; 6 - ловушка-поглотитель света; 7 - выходное стекло; 8 - калибровочные световоды; 9 - блок ФЭУ; 10 - полихроматор; 11 - объектив; 12 - катушка соленоида; 13 - вакуумная камера.

ся при помощи объектива 11 и полихроматора 10 блоком ФЭУ 9. Для уменьшения паразитной засветки системы регистрации излучением лазера, рассеянным на элементах конструкции, предусмотрены конструктивные решения: ловушки-поглотители основного лазерного луча после прохождения через плазму и излучения, рассеянного в противоположную от регистрирующей системы сторону 6; набор

апертурных диафрагм в патрубке 5; специальное поглощающее покрытие вакуумной камеры и элементов оптической системы. Часть лазерного излучения проходила через выходное стекло 7 и использовалась для калибровки чувствительности диагностики (более подробно будет описано ниже).

РУБИНОВЫЙ ЛАЗЕР

Как уже отмечалось, лазерная система была первоначально разработана Л.Н. Вячеславовым и др. для установки ИНАР [8]. Её оптическая схема представлена на рис. 2. Она состоит из задаю-

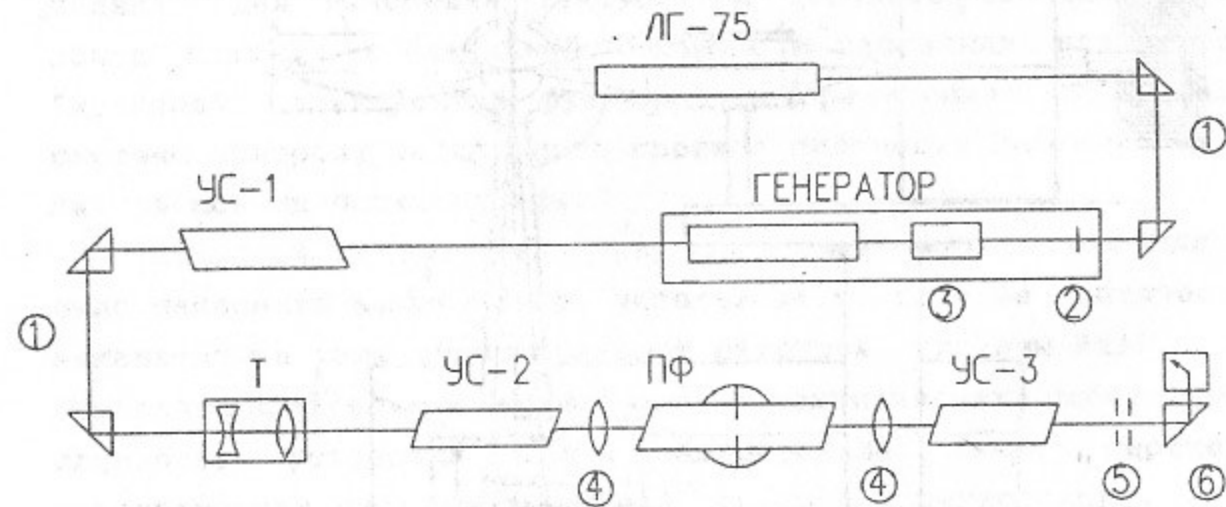


Рис. 2. Оптическая схема рубинового лазера. Обозначения: ЛГ-75 - юстировочный лазер; ГЕНЕРАТОР - генератор, состоящий из активного элемента с лампами накачки, ячейки Керра и зеркала; УС-1 - УС-3 - усилители; Т - телескоп 2^х; ПФ - пространственный фильтр. Цифрами обозначены: 1 - поворотные призмы; 2 - зеркало генератора (100% отражение для $\lambda = 0.6943$ мкм и частичное пропускание для $\lambda = 0.6328$ мкм); 3 - ячейка Керра; 4 - линзы пространственного фильтра; 5 - апертурные диафрагмы; 6 - система юстировки в центр вакуумной камеры.

щего генератора с ячейкой Керра, работающего в режиме гигантских импульсов и трёх усилителей. В качестве активных элементов используются рубиновые стержни длиной около 250 мм и диаметром (начиная от генератора) 14, 14, 20 и 30 мм. Для улучшения однородности и уменьшения угловой расходимости луча между Усилителем 1 и Усилителем 2 введён телескоп 2^х, а между Усилителем 2 и Усилителем 3 - вакуумный пространственный фильтр, который одновременно служит для согласования диаметров усилителей. В качестве источника накачки используются импульсные лампы типов ИФП-8000 или ИФП-5000 в количестве (последовательно по каскадам, начиная от генератора) 2, 2, 4 и 6 шт. Питаются они

попарно от независимых секций конденсаторной батареи током с полупериодом около 1 мс.

Измеренная энергия импульса генератора составляет в типичных условиях 3 - 5 Дж, после прохождения усилителей и уменьшения угловой расходимости она возрастает по оценке до 15 - 20 Дж при достаточной однородности по сечению лазерного луча (оценки делались по отпечаткам луча на материалах, имеющих пороговый характер отклика на падающую энергию).

Для описываемой лазерной системы были вновь разработаны различные оптико-механические элементы: держатели оптических элементов, юстировочные столики и корпуса для активных и пассивных элементов. Кинематические схемы этих узлов приведены на рис. 3, а их краткая характеристика - в Приложении. Эти элементы отличаются повышенной механической прочностью, надёжной

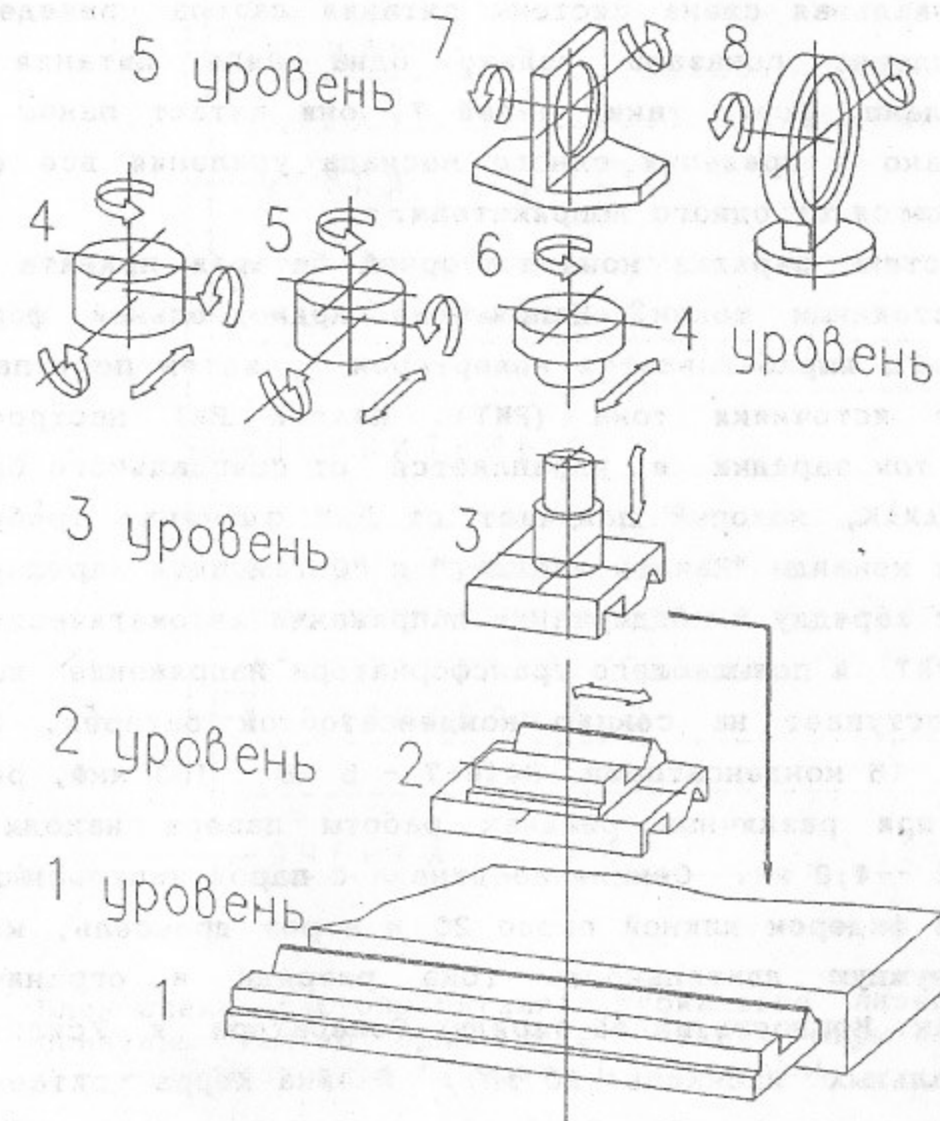


Рис. 3. Кинематические схемы вновь разработанных механических узлов для крепления оптических элементов. Стрелки обозначают направления возможных перемещений. Краткое описание этих узлов см. в Приложении.

фиксацией положения и устойчивостью к импульсным нагрузкам при достаточно большом числе степеней регулировки по всем координатам. Они могут быть рекомендованы для использования во вновь разрабатываемых лазерных системах.

СИСТЕМА ПИТАНИЯ ЛАЗЕРА

Одной из особенностей установки ГОЛ-3 является большая степень автоматизации не только процессов сбора информации, но также и подготовки установки к работе. Поэтому описываемая диагностика имеет принятое на установке построение электротехнических цепей с управлением от ЭВМ. Подробно используемые системы были описаны их разработчиками на примере батареи для питания соленоида в работе [9] и приведённой там литературе, поэтому здесь даётся лишь их краткое описание.

Принципиальная схема системы питания лазера приведена на рис.4¹⁾. Условно показана только одна цепь питания пары импульсных ламп. Всего таких цепей 7, они питают лампы независимо, однако в пределах одного каскада усиления все секции батареи питаются от одного выпрямителя.

Для системы зарядки конденсаторной батареи принята схема зарядки постоянным током. Напряжение прямоугольной формы с частотой 1 кГц вырабатывается инвертором 1, затем поступает на регулируемые источники тока (РИТ). Каждый РИТ настроен на оптимальный ток зарядки и управляется от специального блока в стандарте КАМАК, который получает от ЭВМ значение требуемого напряжения и команды "Начать зарядку" и "Остановить зарядку", и обрабатывает зарядку и поддержание напряжения автоматически.

После РИТ и повышающего трансформатора напряжение выпрямляется и поступает на секцию конденсаторной батареи. Секция состоит из 16 конденсаторов К41И-7 - 5 кВ - 100 мкФ, рабочее напряжение при различных режимах работы лазера находится в пределах 3,2 - 4,0 кВ. Секция соединена с парой импульсных ламп коаксиальным фидером длиной около 20 м через дроссель, который формирует нужную длительность тока разряда и ограничивает разрядный ток. Мощность цепей зарядки Генератора и Усилителя 1 3 кВт, остальных каскадов 20 кВт. Ячейка Керра питается от отдельного выпрямителя 20 кВ, 3 кВт, нагруженного на небольшую

¹⁾ Система питания с использованием сети 1 кГц разработана В. А. Капитоновым, В. В. Конюховым, А. Г. Макаровым.

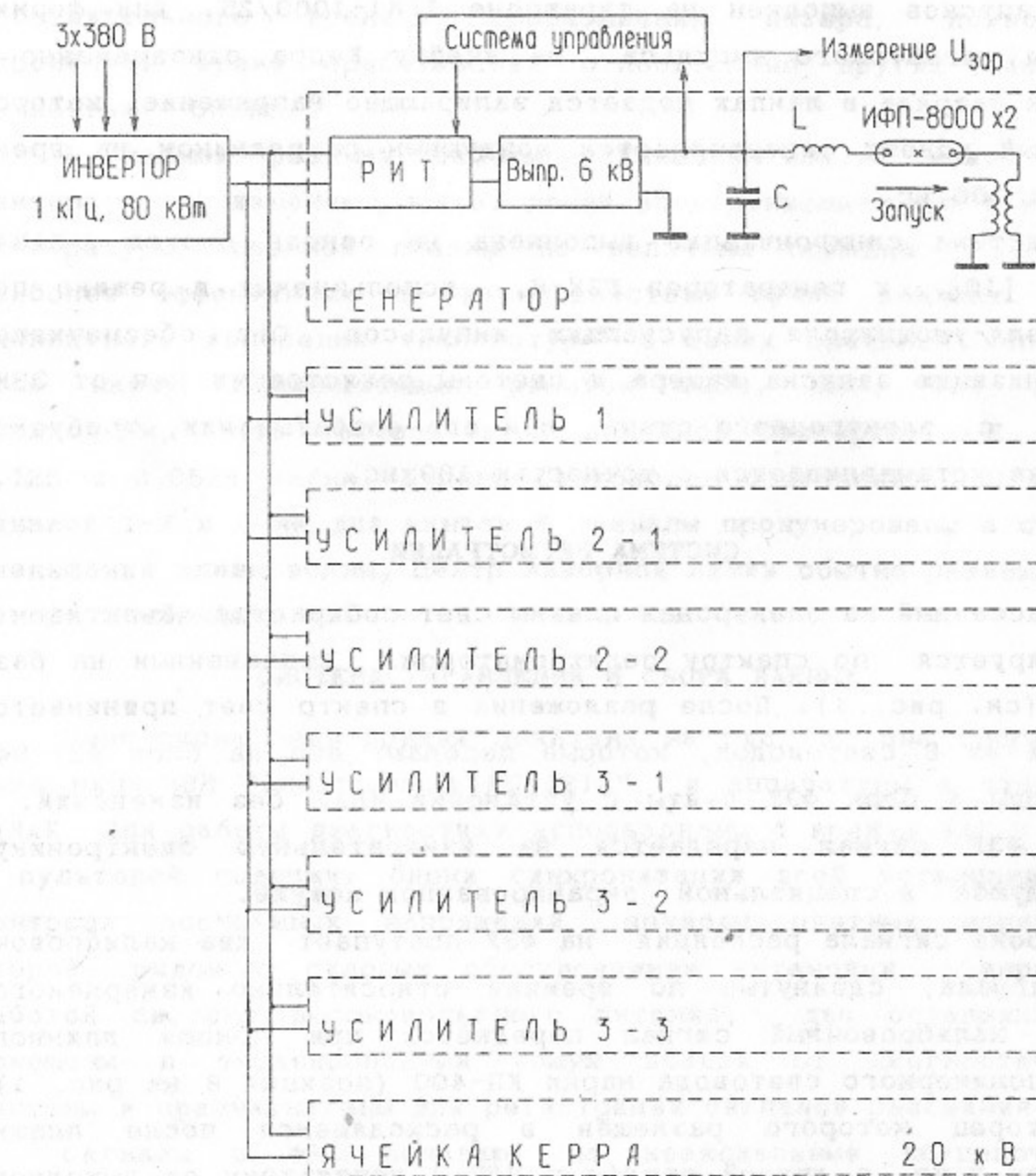


Рис.4. Блок-схема системы питания рубинового лазера. Условно показана только одна цепь питания пары ламп накачки. С - конденсаторная батарея; L - дроссель.

балластную ёмкость. Длительность зарядки до рабочего напряжения не превышает 10 с. Частота повторения импульсов ограничивается не системой питания, а тепловыми нагрузками на лампы и активные элементы и не превышает 1 мин^{-1} .

Для запуска ламп на них через трансформатор подаётся дополнительный короткий импульс напряжения амплитудой 16 кВ. Блок запусков выполнен на тиратроне ТГИ1-1000/25. Для формирования гигантского импульса на ячейку Керра одновременно с началом разряда в лампах подаётся запирающее напряжение, которое в нужный момент закорачивается воздушным разрядником на время порядка 100 нс.

Система синхронизации выполнена на основе блоков КАМАК ГВИ-8М [10] и генераторов ГЗИ-6, используемых в режиме повторителя-умощнителя запускающих импульсов. Она обеспечивает синхронизацию запуска лазера и системы регистрации как от ЭВМ, так и от электронного пучка при его срабатывании, требуемая задержка устанавливается с точностью 100 нс.

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ

Рассеянный на электронах плазмы свет собирается объективом и анализируется по спектру полихроматором, выполненным на базе МДР-2 (см. рис. 1). После разложения в спектр свет принимается сборкой из 8 световодов, которые передают его на блок ФЭУ-84. Световоды и блок ФЭУ взяты с установки ИНАР без изменений. С блока ФЭУ сигнал передаётся на измерительную электронику, находящуюся в специальном экранированном кожухе.

Кроме сигнала рассеяния на ФЭУ поступает два калибровочных сигнала, сдвинутые по времени относительно измеряемого. Каждый калибровочный сигнал передаётся при помощи длинного кварц-полимерного световода марки КП-400 (позиция 8 на рис. 1), один торец которого размещён в расходящемся после плазмы лазерном луче, а другой введён в МДР-2 неподалёку от выходного параболического зеркала так, чтобы обеспечивалась равномерная засветка выходного окна. Эти два калибровочных сигнала, задержанные на ≈ 230 и 330 нс относительно сигнала рассеяния на плазме, измеряются при каждом срабатывании системы и позволяют проводить оперативную калибровку ФЭУ по чувствительности и линейности. Наличие такой калибровки поднимает достоверность проводимых измерений, поскольку снимает вопросы о нелинейности и падении коэффициента усиления ФЭУ за счёт неустойчивости

источника питания и влияния фоновой засветки от излучения плазмы. Заметим, что калибровка проводится на излучении с основной длиной волны, поэтому в принципе возможны ошибки, связанные с разным поведением фотокатода ФЭУ при различных длинах волн, однако они представляются гораздо менее опасными.

Ещё один световод проложен в пультовую и является монитором действительного времени срабатывания лазера, позволяющим определить время срабатывания относительно других систем с точностью ≈ 50 нс.

В разных режимах работы установки плазма может иметь температуру, изменяющуюся от долей электронвольта при измерении температуры мишенной плазмы до величины порядка 1 кэВ в наиболее эффективных по взаимодействию пучка режимах. Для адекватного измерения температур в таких пределах используется набор дифракционных решёток 1200, 600, 300 и 150 штрихов/мм, что соответствует линейной дисперсии 0,5, 0,25, 0,125 и 0,0625 мм/нм. Ширина световодов составляет 0,8 мм для каналов 1-7 и 2 мм для канала 8 (каналы пронумерованы в сторону уменьшения длины волны, центр лазерной линии обычно размещался в центре 1 канала).

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ

Блок-схема электроники показана на рис. 5, она собрана на базе мини-ЭВМ "Электроника МС-1212" и аппаратуры в стандарте КАМАК. Для работы диагностики использованы 4 крейта КАМАК: один в пультовой содержит блоки синхронизации всей установки, АЦП контроля постоянных напряжений, приводы цветных мониторов; второй, рядом с силовым оборудованием установки, управляет работой системы высоковольтного питания; два оставшихся помещены в экранированный кожух вблизи от диагностической системы и предназначены для регистрации сигналов рассеяния.

Сигналы с ФЭУ попадают на коаксиальные RC-цепочки с постоянной времени около 100 нс, где происходит отделение низкочастотных составляющих света плазмы, а далее измеряются при помощи быстрых АЦП АФИ-1700 (разработка лаб. 6 ИЯФ) [11]. Основные метрологические характеристики этих блоков: период дискретизации 2 нс, полоса частот до 250 МГц, линейность до 1 В, точность 1 - 2%, длительность развёртки - 384 точки на канал. Кроме АФИ-1700 измерительные крейты КАМАК содержат управляемые от ЭВМ высоковольтные источники ВВИ-2 для питания ФЭУ

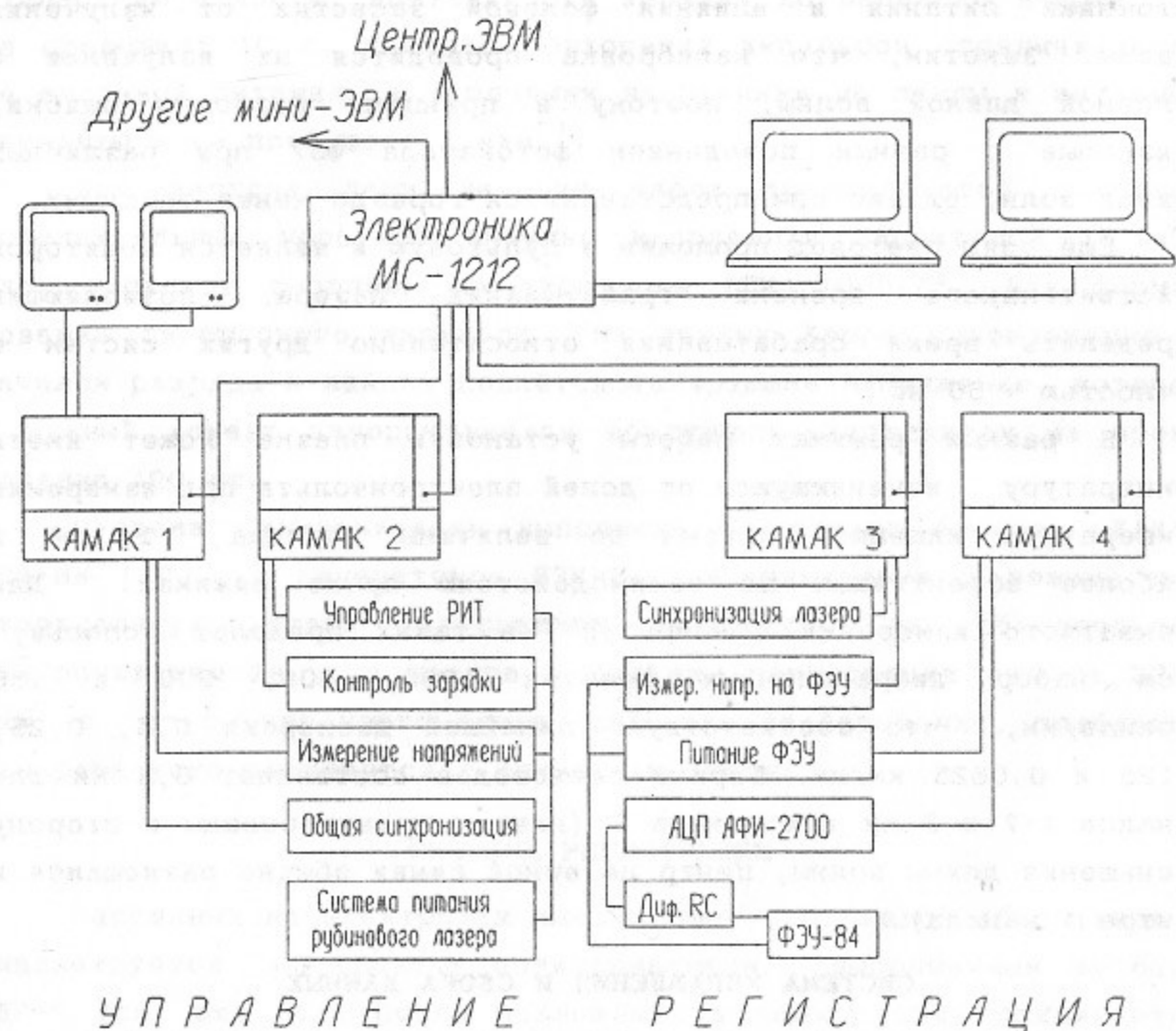


Рис. 5. Блок-схема измерительной и управляющей систем.

(разработка лаб. 6 ИЯФ), блоки синхронизации, измерения напряжений и токов питания ФЗУ.

Работа с лазерной системой ведётся с двух терминалов, один предназначен для программы управления системой высоковольтного питания установки, другой - для программы сбора и обработки информации. Программа управления зарядкой высоковольтных систем является общей для установки и выполняет следующие функции: старт и остановка зарядки в разных каналах; циклический опрос напряжений на заряжаемых устройствах с частотой 1 с^{-1} и индикация их на мониторе (цепи измерения напряжения работают независимо от цепей управления зарядкой); медленный циклический опрос большого количества медленно меняющихся напряжений и их индикация; запоминание мгновенных значений измеренных величин по команде оператора и их запись в банк; подача запускающего импульса на всю установку или её отдельную систему. Программа

сбора данных производит необходимую подготовку АФИ-1700 и работающих совместно с ними блоков к работе; проводит оперативную калибровку аналоговых трактов АФИ-1700 перед каждым выстрелом; пересчитывает полученные данные с учётом калибровки; выводит сигналы на монитор; по команде оператора производит запись этих сигналов в банк.

Реализована запись в банк, имеющий структуру файла с индексной организацией при помощи пакета программ, описанного в [12], в стандартном для установки формате. Программы обработки реализованы частично для ЭВМ, совместимых с "Электроникой МС-1212" (первичная обработка сигналов), частично на ЭВМ класса IBM PC (определение N_e и T_e).

ПРИМЕРЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ

На рис. 6 приведен типичный сигнал рассеяния в случае калибровки чувствительности диагностики по рэлеевскому рассеянию на воздухе. Первый пик - сигнал рассеяния на воздухе с эквивалентной плотностью $6,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (в пересчёте на плазму), далее идут два калибровочных сигнала. Показан канал, соответствующий несмещённой относительно лазерной длине волны, решётка

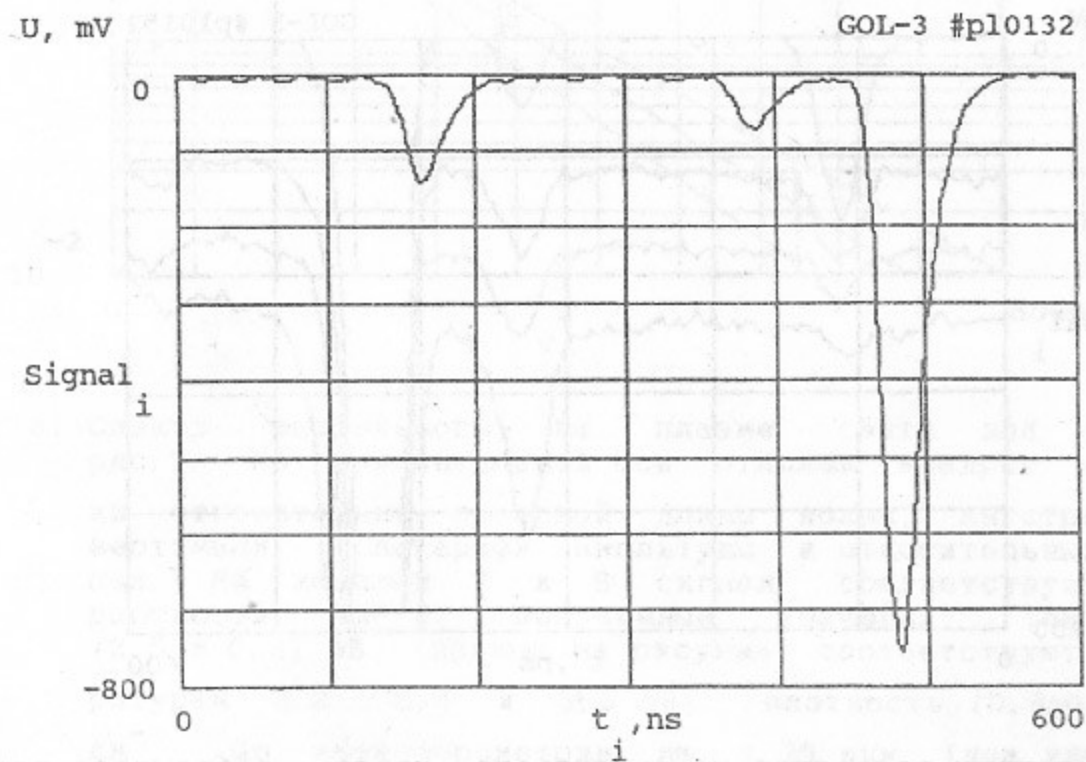


Рис. 6. Сигнал при калибровке чувствительности лазерной системы по рэлеевскому рассеянию на воздухе. Центр канала соответствует несмещённой длине волны, решётка 1200 штрихов/мм (что соответствует ширине канала 1,6 нм).

МДР-2 1200 штр/мм. Стабильные результаты калибровки получаются при выдержке газа в камере в течение 16 - 60 часов, в зависимости от давления газа. Сигнал паразитного рассеяния в этом канале зависит от состояния системы (количества срабатываний магнитного поля установки после последней юстировки) и от степени обеспыленности воздуха, в типичных условиях он составляет величину, эквивалентную рассеянию на плазме с плотностью 10^{14} см⁻³. В соседних каналах паразитное рассеяние как правило отсутствует.

На установке ГОЛ-3 проводятся эксперименты в двух существенно различных (с точки зрения требований к системе лазерного рассеяния) режимах. Первый - изучение параметров предварительной (мишенной) плазмы, создаваемой прямым разрядом в водороде (см. [13]). Такая плазма имеет температуру, изменяющуюся от долей электронвольта до нескольких эВ и плотность от 10^{14} до 10^{16} см⁻³, уширение спектра рассеянного света невелико, поэтому в этих экспериментах использовались решётки 600 и 1200 штрихов/мм. На рис. 7 и 8 приведены типичные сигналы рассеяния на предварительной плазме и спектр рассеянного излучения, полученные в одном выстреле. Собственное излучение плазмы в этом случае относительно невелико. При измерении

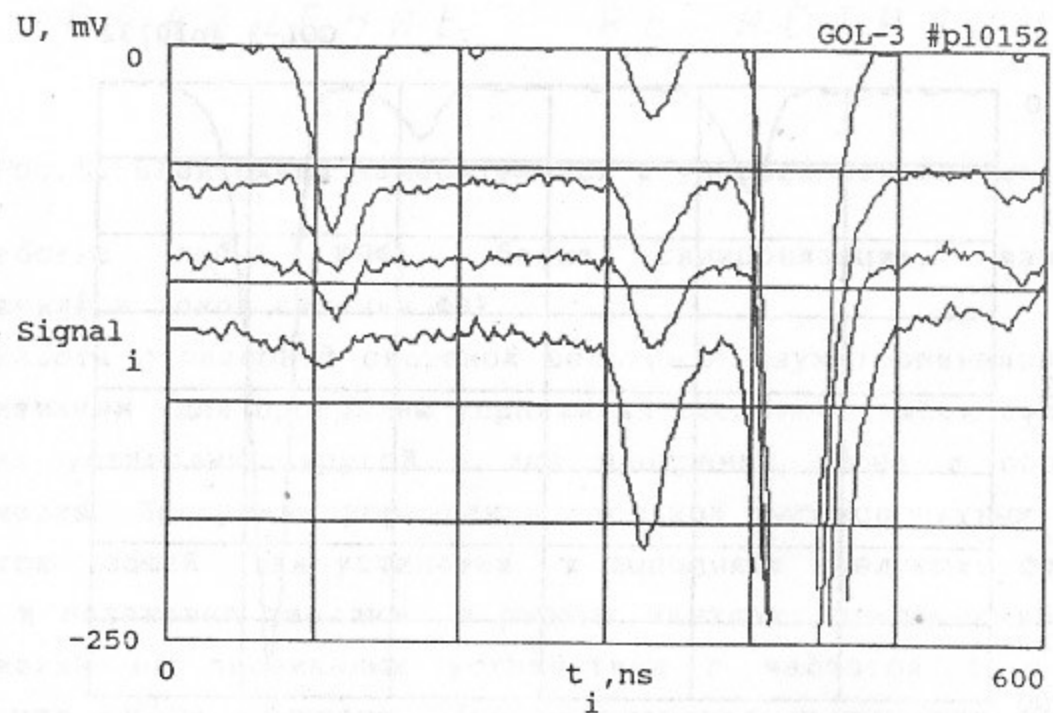


Рис. 7. Сигналы рассеяния на предплазме, лазер срабатывает через 60 мкс после начала разряда. Параметры разряда: напряжение зарядки батареи 18 кВ, $N = 55$ кЭ, начальное давление водорода $(2,0 \pm 0,2)$ Па. Показаны сигналы на каналах с отстройкой 0; 1,6; 3,2 и 4,8 нм относительно лазера (решётка 1200 штрихов/мм).

самых слабых сигналов при больших отстройках от несмещённой длины волны чувствительность методики ограничивается конечной контрастностью МДР-2, которая по нашим измерениям имеет величину порядка 500 для каналов 6 - 8 по отношению к каналу 1 для решётки 1200 штрихов/мм.

Другой, основной, режим работы диагностики используется при измерениях в экспериментах по инжекции в плазму мощного пучка релятивистских электронов. В результате коллективного взаимодействия электроны плазмы могут приобретать среднюю энергию порядка 1 кэВ (см., например, [6]), соответственно уширяется спектр рассеянного излучения и для его адекватной регистрации требуется использование более грубых дифракционных

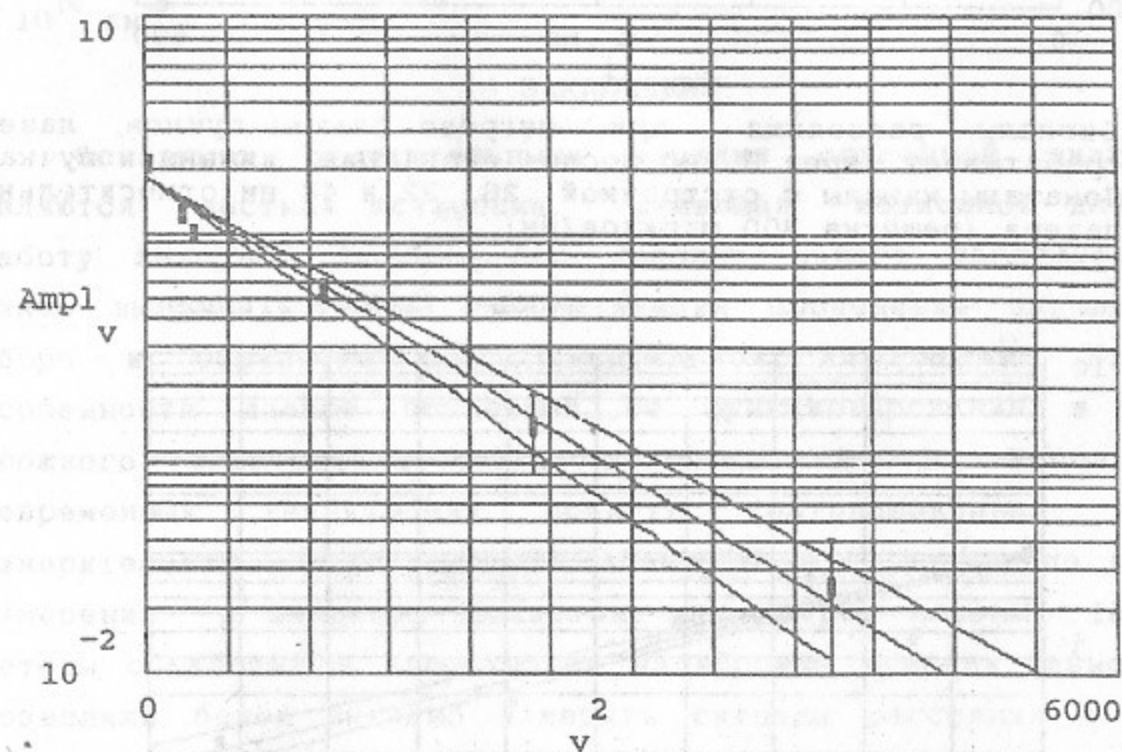


Рис. 8. Спектр рассеянного на плазме света для сигналов рис. 7. По горизонтальной оси отложен квадрат отстройки относительно лазерной длины волны, ангстрем²; по вертикали - логарифм амплитуды в относительных единицах. На каналах 7 и 8 сигнал соответствует контрастности МДР-2. Полученные значения: температура $(2,5 \pm 0,3)$ эВ (прямые на рисунке соответствуют температурам 2,2; 2,5 и 2,8 эВ), плотность $(0,9 \pm 0,1) \cdot 10^{15}$ см⁻³. По интерферометрии на 3,39 мкм (два интерферометра, расположены приблизительно на 200 см по обе стороны от лазерной диагностики) в этом выстреле в этот же момент времени величина NL равна $(1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{16}$ см⁻² и $(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^{16}$ см⁻² при ожидаемом диаметре плазменного столба 8 см.

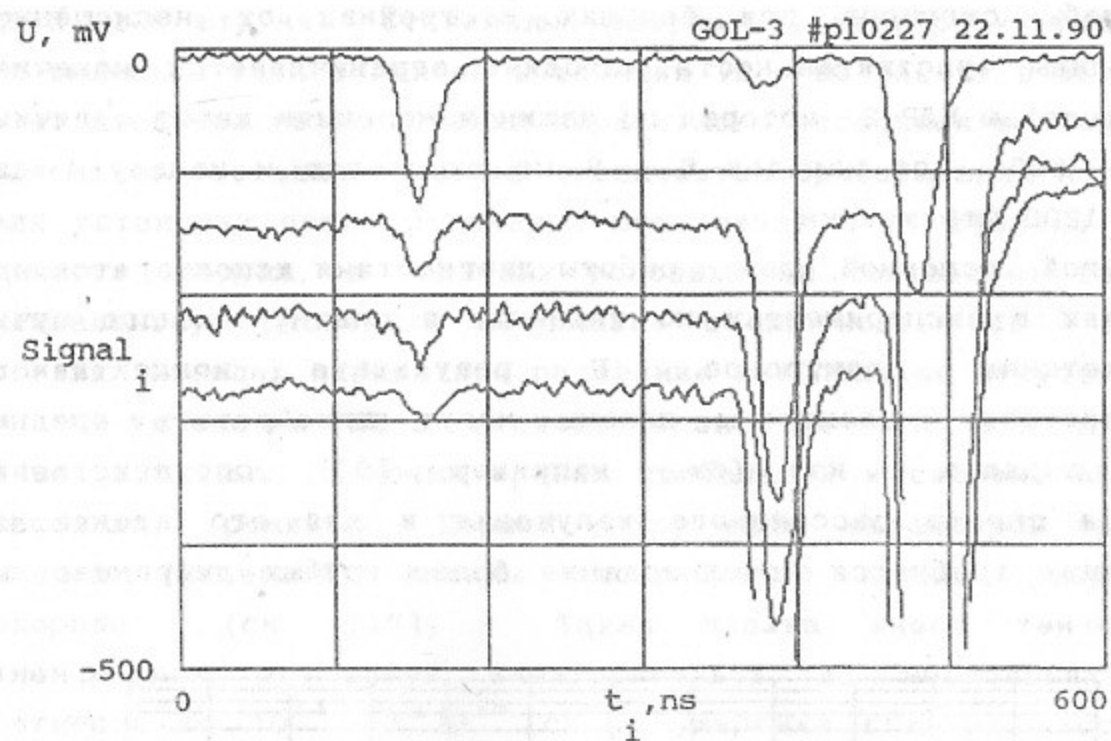


Рис. 9. Сигналы рассеяния при нагреве плазмы пучком, лазер срабатывает через 3 мкс после окончания инъекции пучка. Показаны каналы с отстройкой 26, 32 и 48 нм относительно лазера (решётка 300 штрихов/мм).

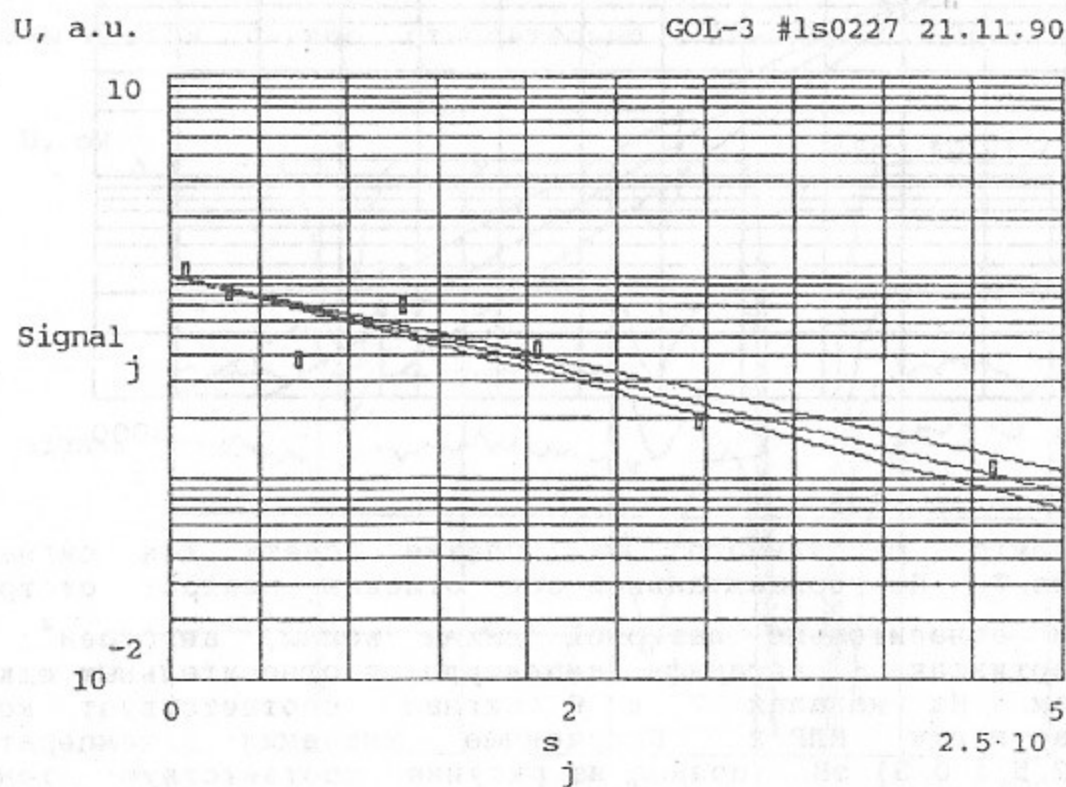


Рис. 10. Спектр рассеянного на плазме света для сигналов рис. 9. По горизонтальной оси отложен квадрат отстройки относительно лазерной длины волны, ангстрем²; по вертикали - логарифм амплитуды в относительных единицах. Полученные значения: температура $(0,27 \pm 0,03)$ кэВ (прямые на рисунке соответствуют температуре 0,24; 0,27 и 0,30 кэВ), плотность $(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

решёток. На рис. 9 и 10 приведены сигналы рассеяния и спектр рассеянного излучения в режиме нагрева плазмы мощным пучком релятивистских электронов. Уровень собственного излучения плазмы и наводок на измерительную аппаратуру в этом режиме заметно вырос, одновременно в излучении плазмы появились составляющие с периодом 50 - 100 нс, особенно в течение времени инъекции пучка в плазму, которые затрудняют выделение полезного сигнала на фоне помех и увеличивают ошибку определения его амплитуды. В разных экспериментах этой серии использовались решётки 300 и 150 штрихов/мм, при этом центр последнего канала системы регистрации был смещён относительно лазерной длины волны на 48 и 99 нм, соответственно. Температуры электронов, измеренные в этом режиме, лежат в диапазоне 0,05 - 0,6 кэВ при плотности $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными отличительными чертами описанной диагностики являются жёсткая юстировка, делающая возможной длительную работу лазерной системы без дополнительного обслуживания, а также высокая степень автоматизации проведения эксперимента, сбора и обработки экспериментальной информации. Указанные особенности делают возможным её функционирование в составе сложного электрофизического комплекса ГОЛ-3. Использование современных технических средств (оптоволоконная техника, измерительная и управляющая электроника) позволило провести измерения в широком диапазоне параметров плазмы. Цифровые методы обработки и оперативная калибровка чувствительности ФЭУ позволили более надёжно измерять сигналы рассеяния в широком динамическом диапазоне амплитуд и отделять их от высокочастотных колебаний свечения плазмы при сравнительно простой традиционной схеме построения собственно рубинового лазера.

Проведены эксперименты по измерению параметров предварительной (мишенной) плазмы, создающейся прямым разрядом в металлической камере в сильном магнитном поле. Эти измерения согласуются с измерениями, проведёнными другими методиками (интерферометрия на $\lambda = 3,39$ мкм, двойные ленгмюровские зонды). В оптимальных режимах разряда плотность плазмы соответствует 100% ионизации напускаемого водорода, а её температура составляет несколько электронвольт.

Начаты эксперименты по измерению температуры электронов

плазмы, нагретой мощным релятивистским электронным пучком. В первых экспериментах продемонстрирована работоспособность методики, ведётся набор экспериментальной информации в разных режимах работы установки.

Благодарности. Авторы благодарны В. С. Койдану и Д. Д. Рютову за поддержку работы и полезные обсуждения; Л. Н. Вячеславу, Э. П. Круглякову и В. Ф. Жарову - за ценные консультации и помощь в работе; сотрудникам установки ГОЛ-3 и НКО-9 С. Г. Воропаеву, А. В. Карюкину, В. А. Капитонову, В. В. Колюхову, С. В. Лебедеву, А. Г. Макарову, К. И. Меклеру, В. С. Николаеву, С. С. Перину, М. А. Шеглову, Д. Б. Борисову, В. А. Расторопову, А. Г. Абдрашитову - за помощь и совместное участие в экспериментах; сотрудникам лаб. 6 ИЯФ А. М. Батракову, К. А. Колесникову, А. Е. Плотникову, А. А. Шейнгезихту - за помощь в подготовке системы регистрации.

Краткая характеристика вновь разработанных оптико-механических элементов

(номер соответствует позиции элемента на рис. 3)

Перечисленные ниже механические узлы предназначены для крепления различных элементов лазерных и оптических систем (линзы, призмы и т. п.). Основная задача, которая ставилась при их разработке - обеспечить возможность плавного перемещения и/или вращения оптических элементов относительно любой оси координат при жёсткой и надёжной фиксации после юстировки. Эта цель достигается выбором подходящих для конкретного оптического элемента узлов из числа представленных на рис. 3.

Принцип компоновки узлов: любое устройство данного уровня ставится на любое устройство предыдущего уровня. Устройство N1 может ставиться на уровень 2 или 1. Устройство N5 имеет меньшие люфты, чем устройство N4 (обеспечивается конструкцией узла). Проходной диаметр устройства N7 около 80 мм, устройства N8 около 100 мм.

наименование	номер чертежа
1. Рельс	1СБ.487.00.01
2. Столик рейтера	1СН.907
3. Рейтер	1СН.730.02
4. Головка юстировочная	1СН.730.01
5. Головка юстировочная	1СН.915
6. Головка юстировочная	1СН.837.02
7. Головка наклоняющая	1СН.839.01
8. Блок сферический	1СН.837.01

Кроме перечисленных выше узлов разработан ряд устройств для активных и силовых элементов лазерных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Mekler K.I., Rogozin A.I., Vyacheslavov L.N. Plasma heating in a solenoid by a relativistic electron beam. Proc. 3 Intern. Conf. on High Power Electron and Ion Beam Research and Technology, Novosibirsk, 1979, v.1, p.29 - 42.
2. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Meshkov O.I., Koidan V.S., Postupaev V.V., Sinitskij S.L., Vyacheslavov L.N. Experimental studies of the plasma heating due to beam-induced turbulence. Proc. 1984 Intern. Conf. on Plasma Physics. Lausanne, Switzerland, 1984, Invited Papers, v.1, p.285 - 308.
3. Бурмасов В.С., Вячеславов Л.Н., Кандауров У.В., Капитонов В.А., Конюхов В.В., Кругляков Э.П., Мешков О.И., Подыминский А.А., Санин А.Л., Семенов Е.П., Хильченко А.Д., Цибулько Ю.А., Чхало Н.И. Первые эксперименты на установке ГОЛ-М. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1987, вып.2, с.31 - 34.
4. Вячеславов Л.Н., Кандауров У.В., Кругляков Э.П., Лосев М.В., Мешков О.И., Санин А.Л. Прямое наблюдение ленгмюровской турбулентности в плазме методом лазерного рассеяния. Письма в ЖЭТФ, 1989, т.50, вып.9, с.379 - 381.
5. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Kapitonov V.A., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Lebedev S.V., Mekler K.I., Nikolaev V.S., Postupaev V.V., Ryutov D.D., Shcheglov M.A., Sinitskij S.L., Voropaev S.G., Vyacheslavov L.N. New experimental results on beam-plasma interaction in solenoids. Plasma Physics and Contr. Fusion (Proc. 15 Europ. Conf., Dubrovnik, 1988), v.30, N 11, p.1571 - 1588.
6. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Chikunov V.V., Kapitonov V.A., Knyazev B.A., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Lebedev S.V., Mekler K.I., Melnikov P.I., Nikolaev V.S., Postupaev V.V., Ryutov D.D., Semenov E.P., Shcheglov M.A., Sinitskij S.L., Voropaev S.G., Yushkov M.V. GOL-3 programme. Proc. 8 Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. Novosibirsk, 1990, v.1, p.14 - 25.
7. Вячеславов Л.Н. Метод томсоновского рассеяния в исследовании нагрева плазмы релятивистским электронным пучком: Дисс. на соиск. учёной степени кандидата физ.-мат. наук, Новосибирск, 1984, 116 с.
8. Вячеславов Л.Н., Жаров В.Ф. Разработка мощных твердотельных лазеров для диагностики плазмы методом томсоновского рассеяния, Новосибирск, 1985, 25 с. (Препринт/Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 85-42).
9. Зоткин Р.П., Капитонов В.А., Койдан В.С., Конюхов В.В., Макаров А.Г., Меклер К.И., Николаев В.С., Перин С.С., Фирулёв К.Н. 10-МДж конденсаторная батарея для питания соленоида установки ГОЛ-3. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1990, вып.1, с.50 - 54.
10. Кругляков Э.П., Нифонтов В.И., Овчар В.К., Орешков А.Д., Цуканов В.М. Многоканальные преобразователи кода во временной интервал, использующие принципы сканирования ЗУ. Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Тез. докл. 6 Всес. конф., Новосибирск, 1981, с.37 - 38.
11. Купер Э.А., Плотников А.Е., Шейнгейзихт А.А., Деркач Ю.П., Коринец С.В. Регистратор формы однократных наносекундных сигналов АФИ-1700, Новосибирск, 1988, 20с. - Препринт ИЯФ 88-150.
12. Воропаев С.Г. Программное обеспечение экспериментов с микросекундными электронными пучками. VII Всес. симпозиум по модульным информационно-вычислительным системам: Тез. докл., Новосибирск, 1989, с.11 - 12.
13. Burdakov A.V., Deulin Yu. I., Kapitonov V. A., Koidan V.S., Kondratuev A. A., Konyukhov V. V., Lebedev S. V., Makarov A.G., Mekler K.I., Nikolaev V.S., Perin S.S., Postupaev V.V., Semenov E.P., Tauber M.V., Voropaev S.G. Production of 7 m-long plasma column in a metallic chamber in a strong magnetic field. Proc. 19 Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Belgrade, 1989, v.1, p.252 - 253.

А.В. Бурдаков, В.В. Поступаев, Е.П. Семенов

Система измерения температуры плазмы по 90^0
томсоновскому рассеянию на установке ГОЛ -3

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 8 апреля 1991 г.

Подписано в печать 8. 04 1991 г.

Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 2,0 печ. л., 1,6 уч-изд. л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ N 33

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР,

г. Новосибирск, 90.