

СПЕКТРОСКОПИЯ

А.А. Балашов, В.А. Вагин, А.И. Челноков

БЫСТРОСКАНИРУЮЩИЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОРАДИОМЕТР БФС-01

В настоящее время большой интерес представляет изучение спектров электромагнитного излучения различных быстроизменяющихся во времени процессов (термоядерная плазма, химическая кинетика, фазовые переходы в твердом теле, процессы плавления и т.п.). Одним из распространенных методов, обеспечивающих такие исследования, является оптическая спектроскопия и, в частности, особенно эффективная в этом случае Фурье-спектроскопия. Ее мультиплексный характер и светосильность обеспечивают значительно лучшее использование времени эксперимента и большую точность в определении временного поведения каждого фрагмента спектра по сравнению с классическими дисперсионными спектрометрами.

ЦКБ УП АН СССР - единственная организация в СССР, которая приступила к разработке Фурье-спектрометров, предназначенных для измерения нестационарных процессов. К настоящему моменту разработан и освоен в производстве Фурье-спектрометр БФС-01. Он предназначен для измерения спектральной яркости поляризованного электромагнитного излучения высокотемпературной замагниченной плазмы в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, перекрывающей спектральный интервал первых электронных циклотронных гармоник. Но этот прибор можно использовать и для измерения спектров излучения других нестационарных объектов (для исследования динамики различных быстропротекающих физических, химических и физико-химических процессов).

Основные технические характеристики прибора:

Спектральный диапазон работы	2-100 см ⁻¹
Спектральное разрешение	до 0,1 см ⁻¹
Время регистрации отдельной интерферограммы (временное разрешение)	-5 мс
Число интерферограмм (и, соответственно, спектров), регистрируемых за один цикл работы (длительностью 200 мс)	не менее 20

Быстросканирующий Фурье-спектрометр БФС-01 состоит из интерферометра, блока энергоснабжения, вакуумной системы, приемников излучения, оптического

переключателя и системы управления прибором. Перечисленные части прибора, их составляющие и основные электрические соединения представлены на рис. 1.

Интерферометр, система энергоснабжения, приемники излучения, вакуумная система и оптический переключатель, собранные в единый аппаратный комплекс, могут располагаться в непосредственной близости от исследуемого физического объекта. При этом оптический переключатель находится рядом с приемным световодом, вход которого может быть удален от интерферометра на 10-15 м.

Систему управления прибором можно распределить по двум помещениям. Одна ее часть - головная ЭВМ (СМ 14-20 или персональная ЭВМ типа IBM PC/AT) - может быть расположена в отдельной комнате (если это необходимо из требований техники безопасности). Другая часть - интерфейсная аппаратура с сателлитной ЭВМ (типа МП-М1) - находится рядом с интерферометром в составе одного аппаратного комплекса.

Основным элементом прибора является интерферометрический узел (рис. 2), собранный по схеме Мартина-Паппетта и позволяющий получать отдельно две интерферограммы с взаимно ортогональными поляризационными составляющими исследуемого излучения. Интерферометрический узел, как и другие устройства прибора, полностью автоматизирован, и управление его юстировкой, а также скоростью изменения оптической разности хода производится от головной ЭВМ.

Этот узел состоит фактически из двух интерферометров, использующих общее сканирующее устройство. На входе каждого интерферометра установлены поляризаторы в виде проволочных вольфрамовых сеток, ориентированных на требуемую поляризацию исследуемого излучения. Светоделители и выходные поляризаторы также представляют собой аналогичные сетки, ориентированные заданным образом. Подвижный и неподвижный отражатели интерферометра выполнены в виде двугранных зеркал (диздров).

Оригинальное сканирующее устройство [1], используемое в интерферометре, состоит из платформы с осью вращения, на которой укреплены отражатели в виде диздров. Последние устанавливаются таким образом, чтобы их ребра были параллельны оси вращения платформы (0) и располагались по окружности (радиуса R) с центром на этой же оси. При повороте платформы диздры поочередно выходят на рабочий участок сканирования, ограниченный относительно оси вращения углом α_M . Световой пучок, прошедший светоделитель в интерферометре, попадает на зеркальные поверхности очередного диздра, отражается от них и возвращается назад по пути, параллельному направлению падающего пучка (ось падающего на диздры пучка должна быть нормальной их ребрам). Угол α_M , в пределах которого совершается рабочее изменение оптической разности хода в интерферометре, и величина радиуса R определяют спектральное разрешение, достигаемое на Фурье-спектро радиометре. Коротковолновая граница спектрального диапазона, реализуемого на таком приборе, полностью определяется качеством изготовления оптико-механической части сканера.

На рабочем участке сканирования интерферограммы изменение оптической разности хода ($\Delta\delta$) происходит по синусоидальному закону в зависимости от угла (α) поворота платформы

$$\Delta\delta = 2R \sin \alpha + \delta_0,$$

где δ_0 - оптическая разность хода при таком положении рабочего диздра, в котором его ребро находится в точке 0 (рис. 3), а соответствующий угол $\alpha(0^\circ) = 0$ (радиус 00° нормален к оси падающего на отражатель светового пучка).

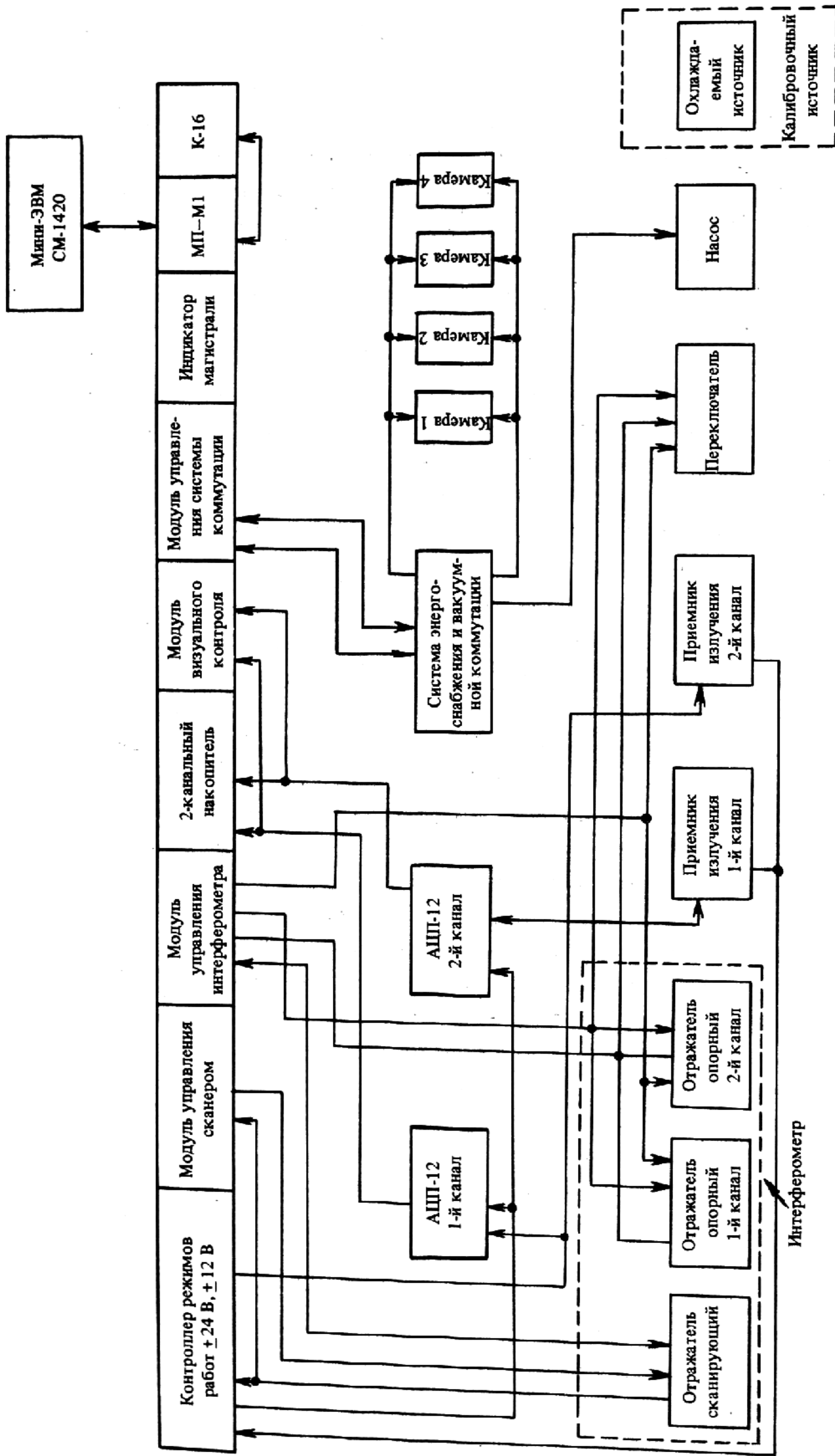


Рис. 1. Функциональная схема Фурье-спектрорадиометра БФС-01

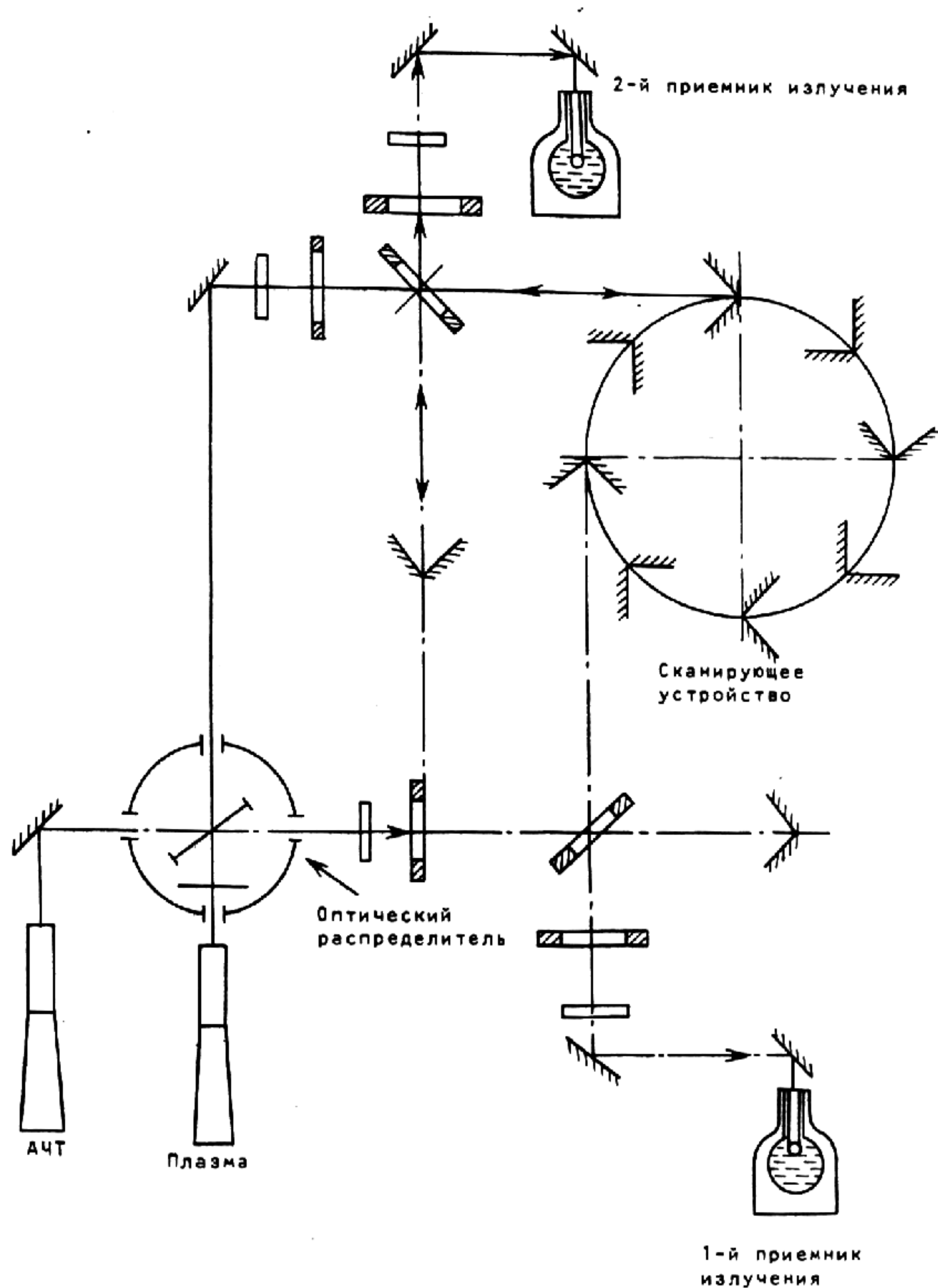


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема Фурье-спектро радиометра БФС-01

Если ω - круговая частота вращения платформы, то

$$\alpha = \omega t + \alpha_0,$$

где α_0 - некоторое значение угла, выбираемое таким образом, чтобы $\alpha(0') = 2\pi n$ (при $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

Соответственно скорость изменения оптической разности хода

$$V = \frac{d\delta}{dt} = 2R\omega \cos(\omega t + \alpha_0), \quad (1)$$

а изменение скорости сканирования

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = -2R\omega^2 \sin(\omega t + \alpha_0).$$

Из выражения (1) и рис. 3 видно, что скорость изменения оптической разности хода максимальна при прохождении диаграммой точки $0'$ - центра реальной области сканирования интерферограммы. Если при этом рабочий угол сканирования (α_M) мал и платформа вращается равномерно, то можно считать скорость изменения оптической

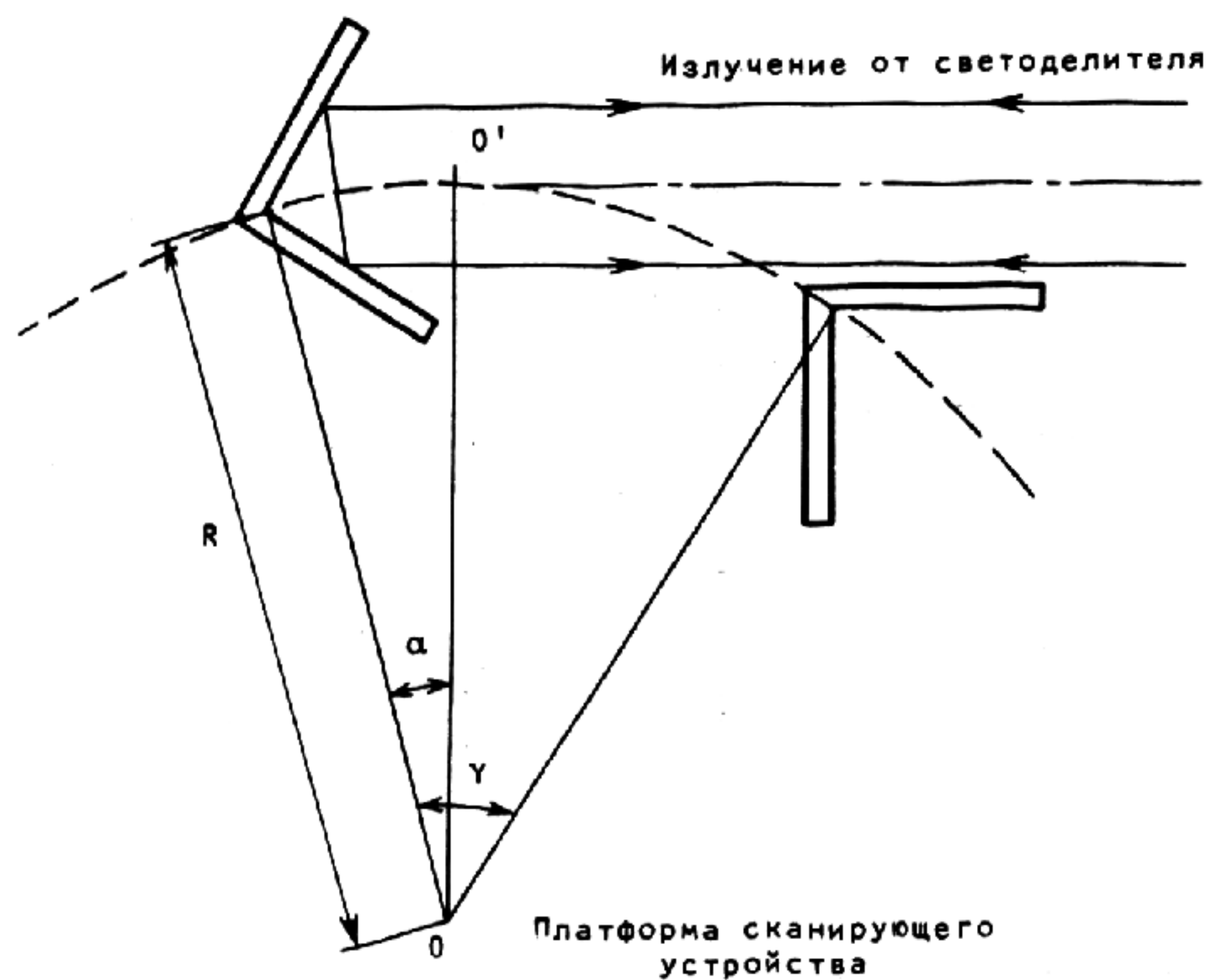


Рис. 3. Схема функционирования сканирующего устройства

разности хода постоянной и равной $2R\omega$, что существенно снижает требования к частотным характеристикам фотоприемника и приемно-усилительного тракта Фурье-спектрорадиометра [2].

Благодаря тому, что на платформе расположено несколько диэдров, можно при сравнительно низких скоростях вращения платформы (1000-5000 об./мин) добиться высокой частоты повторения регистрации интерферограмм, увеличив полезное время измерения. Эффективность использования времени эксперимента легко оценить по формуле

$$\theta = \gamma / \alpha_M,$$

где θ - скважность;

γ - угловое расстояние между ребрами соседних диэдров (рис. 3).

Для более полного использования времени эксперимента диэдры необходимо располагать максимально близко друг к другу, но с условием, чтобы на рабочем участке сканирования падающий на сканер световой поток не попадал одновременно на два отражателя.

Конструктивно сканирующее устройство представляет собой систему, состоящую из рабочего и контрольного дисков и электродвигателя, кинематически связанных одним валом. Рабочий диск предназначен для размещения на нем подвижных отражателей - диэдров. Контрольный диск с системой прецизионных отверстий и соответствующих датчиков необходим для контроля скорости вращения вала электродвигателя и синхронизации начала отсчета очередной интерферограммы. Используемый электродвигатель обеспечивает широкий набор скоростей (от 500 до 4000 об./мин) вращения сканирующего устройства.

Оптический переключатель (см. рис. 2) предназначен для переключения исследуемых потоков излучения от физической установки и от калибровочного источника к интерферометру. Предполагается, что к переключателю подстыкованы два идентичных световода, направленных соответственно на физическую установку и калибровоч-

ный источник (черное тело). Переключатель по команде от ЭВМ или от пульта ручного управления осуществляет необходимую коммутацию светового потока от излучателей к интерферометрическому узлу. Конструктивно переключатель представляет собой цилиндр, в который через фланцы входят четыре тонкостенные трубы (световоды), две из которых предназначены для подвода излучения от соответствующих источников, а другие две - для вывода из переключателя потоков излучения с взаимно ортогональными поляризациями. Внутри цилиндра установлен сеточный поляризатор в подвижной оправе, двигатель и заслонка. Поляризатор предназначен для сохранения поляризации исследуемого излучения в соответствующих каналах интерферометра путем поворота этого поляризатора на 90° при смене источника излучения. Заслонка перекрывает излучение от физической установки при работе с калибровочным источником.

В качестве приемников исследуемого излучения в спектрометре БФС-01 используются приемники, выполненные на кристаллах:

- GaAs (арсенид галлия);
- InSb (антимонид индия).

Приемники размещаются в гелиевых кристаллах, где охлаждаются до температуры 4,2 К. В качестве криостатов используются гелиевые сосуды типа СТГ-25. Световое излучение передается на приемник по световодам, выполненным из тонкостенных металлических труб. Предварительный и масштабирующий усилители, элементы питания размещены в специальной металлической коробке, устанавливаемой на световоде рядом с криостатом. Используемый предварительный усилитель обладает коэффициентом усиления (1000-5000), полосой пропускания (3000-500000 Гц) и приведенным ко входу уровнем шума (1-2 нВ/Гц). Масштабирующий усилитель имеет возможность программного управления коэффициентом усиления в пределах от 1 до 100. Для точной установки гелиевого сосуда с приемником излучения имеется специальная подставка с юстировочными механизмами.

Вакуумная система прибора обеспечивает вакуум в рабочих камерах прибора глубиной до 10^{-3} мм рт.ст. Рабочими камерами являются камера интерферометра, оптический переключатель и световоды, по которым исследуемое излучение направляется к интерферометру. Откачка газов из камер производится в камере интерферометра и в световодах. Это позволяет придать гибкость вакуумной системе, дает возможность изменять ее. Места, в которых производится откачка газов, объединены общей вакуумной магистралью, откачиваемой одним форвакуумным насосом. В каждом месте откачки установлены отсечной клапан, клапан напуска и термопарный преобразователь, позволяющий измерять глубину вакуума. Оптический переключатель откачивается через трубы, подводящие исследуемое излучение.

Для управления устройствами измерения глубины вакуума, а также для коммутации цепей питания элементов прибора БФС-01 используется блок энергоснабжения. Поскольку число вакуумных камер в приборе может быть расширено до четырех (а каждая камера должна иметь клапаны напуска и отсечки, а также устройство измерения глубины вакуума), то блок энергоснабжения рассчитан на управление четырьмя клапанами напуска (типа ZVE-4), четырьмя клапанами отсечки (типа VRE-15), двумя форвакуумными насосами (типа 2НВР-5ДМ) и четырьмя термопарными манометрическими преобразователями (типа ПМТ-4М).

Блок энергоснабжения позволяет:

- коммутировать общую цепь питания прибора БФС-01 220/380 В;
- осуществлять коммутацию перечисленных цепей питания как под управлением ЭВМ, так и в автономном режиме;

- осуществлять контроль над скоммутированными по командам управления напряжениями и наличием требуемой глубины вакуума в камерах, а также выводом соответствующих сигналов на систему световой индикации и на разъем, связывающий блок энергоснабжения с ЭВМ.

Управление элементами спектрометра, сбор и обработка полученных данных, а также отображение спектральной информации в удобном для экспериментатора виде осуществляются системой управления прибора БФС-01. Указанная система состоит (как упоминалось) из головной ЭВМ и интерфейсной аппаратуры.

Головная ЭВМ предназначена для подготовки, загрузки и запуска программ, обслуживающих прибор, а также для хранения, обработки и вывода спектральной информации на внешние устройства.

Интерфейсная аппаратура осуществляет непосредственное управление элементами прибора, съемом и первичной обработкой интерферограмм. В ее состав входят аналогово-цифровые преобразователи типа Ф-4233 (2 шт.), источники напряжения +25 В (2 шт.), крейт КАМАК с аппаратурой.

Аппаратура крейта КАМАК включает в себя крейт-контроллер К-16, микроЭВМ МП-М1, контроллер режимов работы, модули управления сканером и интерферометром, двухканальный накопитель, модули визуального контроля и сопряжения ВОКС, модуль регистров команд и состояний и ряд стандартных модулей (типа преобразователя 126, индикатора магистрали и т.п.).

Связь головной ЭВМ и интерфейсной аппаратуры осуществляется по четырехпроводной линии связи. Со стороны интерфейсной аппаратуры линия подключена к терминальному разъему ЭВМ МП-М1. Через другой разъем ЭВМ МП-М1, предназначенный для вывода системной магистрали ЭВМ, осуществляется связь ЭВМ МП-М1 с крейт-контроллером КАМАК. Поскольку с обеих сторон четырехпроводной линии связи по входам имеются оптронные развязки, то линия связи надежно защищена от помех.

Модуль управления сканером управляет двигателем постоянного тока, имеющим датчик величины скорости импульсного типа (контрольный диск с отверстиями, помещенный между светодиодом и фотодиодом). Модуль задает величину скорости вращения сканера, вырабатывает сигнал ошибки в процессе регулирования, контролирует точность управления и идентифицирует количество сбойных ситуаций.

Модуль управления интерферометром управляет с помощью шаговых двигателей оптико-механическими устройствами интерферометра (положением неподвижных отражателей в плечах обоих интерферометров, положением оптического переключателя).

Двухканальный накопитель предназначен для временного хранения и первичной обработки принятой от АЦП цифровой информации.

Модуль может принимать входную информацию (выборки интерферограммы) в виде слов размером до 16 бит в нормальном дополнительном коде, суммировать до 256 сложных выборов, записывать полученные данные в массив памяти размером 64К 32-разрядных слов, производить суммирование аналогичных выборов последовательно регистрируемых интерферограмм до 4096 раз.

Модуль регистров команд и состояний предназначен для выдачи сигналов управляющих ходов на разъемы лицевой панели модуля (и далее - на внешние устройства), а также для съема сигналов состояния внешних устройств, поступающих на разъемы лицевой панели модуля. Модуль управляет общим включением установки и всей вакуумной системой (включением и выключением форвакуумных насосов, вакуумных клапанов отсеки и напуска, манометрическими термopарами).

Контроллер режимов работ предназначен для управления каналами съема информации (регистрации интерферограмм) прибора БФС-01. Он осуществляет прием сигналов от внешних устройств, выдачу цифровых кодов коэффициента усиления предварительных усилителей и тактирующих сигналов на АЦП. (Модуль записывает в соответствующую маску номера диэдров на сканере, при прохождении которых на рабочем участке будет выполняться съем интерферограмм, а также через соответствующий счетчик задает полное число регистрируемых интерферограмм.)

Математическое (программное и алгоритмическое) обеспечение прибора решает задачи:

- обеспечения контроля за работоспособностью системы (с соответствующими сообщениями о ее состоянии);
- автоматической юстировки прибора;
- фазовой подстройки (коррекции) в обоих интерферометрах всех восьми оптических каналов (по числу диэдров на сканере) регистрации интерферограмм, необходимых для работы в режиме накопления интерферограмм при исследовании стационарных объектов;
- расчета параметров эксперимента;
- регистрации интерферограмм в режимах записи отдельных интерферограмм (с заданным временным разрешением) и накопления (когерентного суммирования) интерферограмм;
- восстановления спектра по зарегистрированным интерферограммам;
- нормировки спектра исследуемого объекта на спектр калибровочного источника (черного тела) для построения соответствующего температурного распределения, например, в циклотронных гармониках излучения высокотемпературной замагниченной плазмы в установках типа ТОКАМАК;
- хранения и вывода спектральной информации на устройства отображения (в случае нескольких спектров в изометрии).

Базовое программное обеспечение строится на основе стандартной операционной системы головной ЭВМ. Оно обладает возможностью расширения со стороны пользователя посредством соответствующего ввода новых программных средств в математическое обеспечение прибора.

Результаты опытной эксплуатации спектрорадиометра БФС-01 подтвердили его работоспособность, а также соответствие реальных и паспортных технических характеристик. В качестве примера на рис. 4 представлена запись спектра излучения лампы обратной волны с разрешением $0,1 \text{ см}^{-1}$ при временном разрешении $0,005 \text{ с}$.

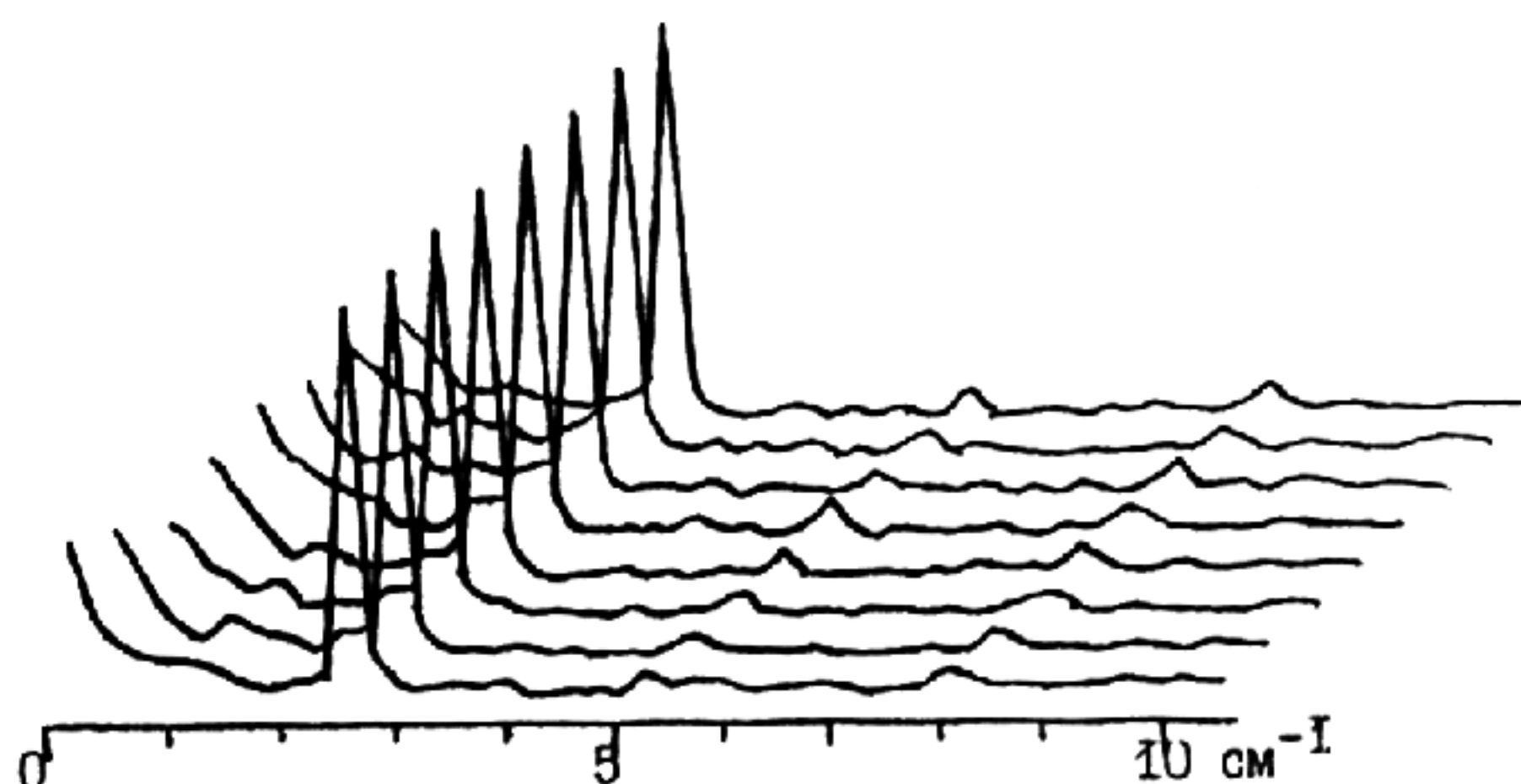


Рис. 4. Спектр излучения лампы обратной волны. Временное разрешение $0,005 \text{ с}$

Л и т е р а т у р а

1. Балашов А.А., Вагин В.А., Челноков А.И. Авт. свид. № 1300294, Бюл.изобр., 1987, № 12, с. 163.
 2. Вагин В.А. Журнал прикладной спектроскопии, 1984, т. 41, № 4, с. 635.
-