

УДК 520.353:520.22

## ПРОЕКТ ИК-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ТЕЛЕСКОПА БТА

© 2013 В. Л. Афанасьев<sup>1</sup>, Э. В. Емельянов<sup>1</sup>, В. А. Мурзин<sup>1</sup>, В. Ф. Вдовин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950 Россия

<sup>3</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, 603950 Россия

Поступила в редакцию 6 марта 2013 года; принята в печать 14 мая 2013 года

Ключевые слова: *аппаратура: спектрографы*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Целью проекта является расширение доступного для наблюдений на 6-м телескопе диапазона длин волн в сторону ближнего ИК (0.8–2.5 мкм). Этот диапазон продуктивен для изучения “холодных” объектов ( $T < 2000$  К), источников закрытых пылью, а также объектов с красными смещениями вплоть до 10. В ближнем ИК-диапазоне содержатся интересные для спектральной диагностики линии: вращательно-колебательные полосы важных для астрофизики молекул (таких как CO, OH, SiO, CH, CN, NH, H<sub>2</sub>O, HCN, CH<sub>4</sub> и пр.), вращательные переходы H<sub>2</sub>, много переходов нейтральных и ионизованных атомов. Перечень астрофизических задач, которые можно будет решать на БТА в ближнем ИК, достаточно широк и может включать в себя такие исследования:

- спектроскопия протопланетарных туманностей;
- поиск экзопланет и коричневых карликов;
- спектроскопия и фотометрия областей с мощным звездообразованием в нашей Галактике, близких и удаленных ( $z < 10$ ) галактиках;
- звездная кинематика и морфология систем различных популяций звезд в спиральных галактиках;
- физические условия в ионизованном газе, звездная кинематика и морфология в галактиках с активными ядрами (AGN) и вспышками звездообразования;
- ультраяркие инфракрасные галактики (ULIRG);
- измерение фотометрических красных смещений по спектральному распределению энергии (SED).

### 1.1. Особенности построения ИК-систем

#### 1.1.1. Фотометрия

Земная атмосфера в ИК-диапазоне оказывает ощутимое влияние на проходящее через нее излучение. Поглощение и рассеяние ИК-излучения в атмосфере довольно значительно, кроме того, оно носит неравномерный характер, обусловленный спектральными особенностями поглощения ИК-волн основными газовыми компонентами атмосферы, в первую очередь — водой. Поэтому фотометрические наблюдения в ИК-диапазоне проводят в основном в “окнах прозрачности” атмосферы. Максимумы кривых пропускания фотометрических фильтров *I*, *J*, *H* и *K* приходится на максимумы пропускания земной атмосферы.

Для уменьшения чернотельных тепловых шумов от конструкций телескопа в ИК-фотометрах обычно используется схема т.н. “холодного выходного зрачка” (cold pupil stop): в плоскости выходного зрачка размещается охлаждаемая диафрагма, экранирующая такие источники шума, как кабина первичного фокуса и оправа зеркала. Вся оставшаяся оптика фотометра может быть более теплой — ее вклад в общий шум не так значителен.

Так как охлаждение выходного зрачка невозможно без дополнительной оптики, то даже без изменения относительного отверстия изображения в фотометрическом режиме необходимо включение в оптическую схему прибора редуктора светосилы. Для согласования масштаба телескопа с размером элемента разрешения желательно уменьшить масштаб изображения на светоприемнике, т.е. увеличить светосилу прибора.

В качестве примера действующего ИК-фотометра рассмотрим FourStar — фотометр с большим полем зрения, разработанный для 6.5-м телескопа “Магеллан Бааде” обсерватории Лас Кампанас [1]. Прибор имеет поле зрения  $10'9 \times 10'9$ .

Для регистрации излучения в нем используется массив  $2 \times 2$  светоприемника HAWAII-2RG. Коллиматор прибора выполняет также роль входного окна. Формируемое коллиматором изображение выходного зрачка расположено непосредственно перед камерой. Основные источники тепловых помех экранируются охлаждаемой маской. Оптика камеры охлаждается до температуры 200 К. Расположенные в сходящемся пучке после камеры фильтры, линзы коррекции поля и светоприемник охлаждаются до 77 К. Фильтры расположены на двух шестипозиционных турелях. Криостат прибора представляет собой цилиндрическую конструкцию диаметром 0.9 м и длиной 3 м. Для поддержания рабочей температуры в течение суток требуется около 45 л жидкого азота.

В 2005 г. САО РАН была приобретена камера CIRSИ с двумя гибридными HgCdTe светоприемниками HAWAII-1 для проведения фотометрических наблюдений на БТА в ближнем ИК-диапазоне. Рабочий диапазон данных светоприемников по длине волны составляет 0.8–2.5 мкм [2].

Дюар с камерой, компьютером и контроллером располагаются на раме размером примерно  $0.9 \times 0.9 \times 0.75 \text{ м}^3$  [3]. Масса всей конструкции в сборе около 200 кг. Соответственно, устанавливаться она может лишь на достаточно крупные телескопы. При работе в главном фокусе БТА без редуктора светосилы один светоприемник покрывал бы на небе площадку размером  $2'9 \times 2'9$ .

Неоднократные попытки привести CIRSИ в работоспособное состояние закончились неудачно: течи в криостате прибора не удалось устранить в степени, достаточной даже для проведения испытаний в лаборатории. Электроника CIRSИ морально и физически устарела: она была разработана в 1997 г. [4] и не способна работать с современными цифровыми системами сбора и обработки информации.

С нашей точки зрения, наиболее рациональным способом приведения имеющейся ИК-аппаратуры в работоспособное состояние является создание нового оборудования, в котором из CIRSИ будут использоваться лишь светоприемники.

### 1.1.2. Спектроскопия

ИК-спектроскопия — относительно новое течение в наблюдательной астрономии с большим научным потенциалом. Благодаря тому, что межзвездное поглощение сильно уменьшается в сторону длинноволнового излучения, в инфракрасном диапазоне можно получить данные об объектах, скрытых от нас в видимом диапазоне за толщей пыли и газа. Кроме того, изучение галактик с большими  $z$  может производиться только в ИК-диапазоне из-за сдвига в него основных характерных спектральных линий.

Существующие ИК-спектрографы больших телескопов обладают множеством непреодолимых ограничений. Одним из них является малая ширина участка спектра, покрываемого за одну экспозицию. Кроме того, ИК-спектрографы высокого разрешения — очень дорогие узкопрофильные приборы. Снижение требований на величину дифракционного разрешения прибора позволяет расширить область применения прибора и сделать его более универсальным.

По сути, ИК-спектрографы мало чем отличаются от спектрографов, работающих в видимом диапазоне, за исключением необходимости более глубокого охлаждения элементов прибора. В литературе можно найти множество технических решений для подобных спектрографов, но все схемы представляют собой по существу редукторы светосилы, в которых в выходном зрачке установлен диспергирующий элемент — решетка или призма. Ясно, что такой спектрограф легко превращается в фотометр.

Смешанные приборы имеют возможность работать в двух режимах: фотометра и спектрографа. Например, для фокуса Несмита 10-м телескопа Субару была разработана охлаждаемая камера/спектрограф ИК-диапазона CISCO [5]. Весь прибор размещен в цилиндрическом криостате, в котором поддерживается давление порядка  $10^{-5}$  Па и температура около 54–59 К. Спектральное разрешение прибора (при работе в режиме спектрографа) порядка 200–250 в диапазоне 0.8–2.5 мкм. Изменение режимов работы прибора выполняется за счет смены элементов (призмы, набора гримз и набора фильтров), установленных на турели, управляемой шаговым двигателем. Шум считывания и темновой ток прибора достаточно малы для работы со слабыми объектами ( $22^{\text{m}}4$  при фотометрии и  $19^{\text{m}}7$  при спектроскопии).

1.88-м телескоп японской обсерватории Окияма оснащен ИК-камерой/спектрографом OASIS, используемым для фотометрии и длиннощелевой спектроскопии [6]. В инструменте используются HgCdTe матрицы NICMOS-3  $256 \times 256$  пх. При фотометрии масштаб изображения составляет  $0'97$  на пиксель, в режиме длиннощелевой спектроскопии инструмент обеспечивает спектральное разрешение  $R = 150\text{--}1000$  (в зависимости от выбора решетки: 300 или 75 штр./мм). Оптика прибора охлаждается до 110 К, в то время как температура светоприемника удерживается на отметке 80 К (процесс охлаждения от комнатной до рабочей температуры занимает порядка двух суток).

### 1.1.3. Светоприемники

Принцип работы большинства светоприемников для ближней и средней ИК-областей основан на явлении фотоэффекта. Заряды, возникающие за счет внутреннего фотоэффекта, можно накапливать в потенциальных ямах наподобие ПЗС-ячеек или же сразу регистрировать и усиливать формируемый ими ток фотопроводимости. Светоприемники могут быть также основаны на явлении внешнего фотоэффекта.

В настоящее время в качестве двумерных ИК-светоприемников чаще всего применяются HgCdTe матрицы, изготовленные по различным технологиям. Перечислим основные отличия их от ПЗС [7].

- Каждый пиксель сочетает в себе не только ячейку для накопления возникающих вследствие внутреннего фотоэффекта электронов, но и усилитель. Побочным эффектом является то, что коэффициент усиления светоприемника меняется от пикселя к пикселю.
- Накопленный ПЗС-ячейкой заряд в процессе считывания должен пройти через несколько таких же ячеек, в то время как сигнал с одного пикселя HgCdTe-матрицы считывается напрямую (посредством мультиплексирования выходов). В результате в светоприемниках этого класса отсутствует понятие шума переноса заряда, как следствие — уменьшается шум считывания.
- КМОП-мультиплексор позволяет считывать сигнал с ячеек HgCdTe-матрицы в произвольном порядке, что недоступно ПЗС-матрицам.
- Еще одним достоинством светоприемников на основе КМОП-мультиплексоров является возможность неdestructивного считывания сигнала: в любой момент времени во время экспозиции можно считать текущее состояние накопленного ячейками матрицы заряда без фатального искажения.

Так как образование свободных носителей заряда в полупроводнике возникает не только под воздействием фотонов, но и за счет тепловой энергии, для уменьшения уровня шумов светоприемник необходимо охлаждать. Причем, рабочая температура светоприемника тем меньше, чем на большую длину волны он рассчитан. Примерный предел рабочей температуры светоприемника можно считать по формуле  $T_{\max} = \frac{200}{\lambda_{\max}}$ , где температура измеряется в Кельвинах, а красная граница — в микронах.

В связи с тем, что все характеристики КМОП-мультиплексора чувствительны к его рабочей температуре, для каждого светоприемника

необходимо тщательно подбирать оптимальную температуру и поддерживать ее с высокой стабильностью в течение всего времени экспозиции.

Приобретенная САО матрица HgCdTe детекторов HAWAII-1  $1024 \times 1024$  px (размер пикселя  $18.5 \times 18.5$  мкм), имеет максимум квантовой эффективности (60% при  $T = 78$  К) в диапазоне 1.9–2.5 мкм. Глубина потенциальной ямы ячеек светоприемника составляет  $100 \text{ Ke}^-$ . Коэффициент усиления (gain) в оригинальной системе считывания составляет порядка 8 электрон на цифровой отчет ( $e^-/\text{ADU}$ ). Кривая чувствительности светоприемников линейная в пределах 1% в диапазоне 3000–7000 ADU [8].

То, что HAWAII представляют собой комбинированные приборы с индивидуальным предусилителем для каждого элемента, сильно увеличивает попиксельную неоднородность светоприемника. Это приводит к дополнительным сложностям при обработке полученной при его помощи информации. Специальные методы обработки изображений (двойная коррелированная выборка при считывании, обработка массива промежуточных изображений после считывания) позволяют увеличить динамический диапазон этого светоприемника.

### 1.1.4. Оптические компоненты

Учитывая то, что большинство материалов, используемых в оптике видимого диапазона, в той или иной степени непрозрачны для ИК-излучения, возникает необходимость исследования и внедрения новых ИК-материалов. Классическим материалом — своего рода заменителем стекла в видимом диапазоне — в ИК-диапазоне стал высокоомный кремний. Кроме того, в ИК-диапазоне используются стекла из халькогенидов (соединения элементов шестой группы таблицы Менделеева — кислорода, серы, селена, теллура и полония — с металлами). Большинство этих соединений прозрачны для излучения с длинами волн вплоть до 11–12 мкм. Этот диапазон можно расширить до 18–20 мкм посредством изготовления композитных стекол.

Для наблюдений в ИК-диапазоне зачастую используются такие же технологии изготовления фильтров, как и для видимой области. Например, в качестве широкополосных фильтров могут быть использованы абсорбционные ячейки или фильтры многократного отражения. Для фильтрации узких полос ИК-диапазона могут использоваться эталоны Фабри-Перо. Более широкие фотометрические полосы обеспечиваются интерференционными фильтрами.

Достаточно широкий спектральный диапазон в ближнем ИК (0.8–2.5 мкм) и разрешение  $R = 1000\text{--}3000$  не позволяют построить эффективный спектрограф, работающий только с

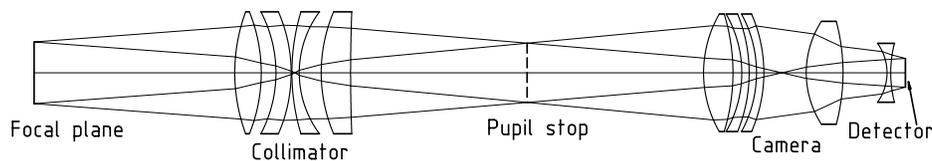


Рис. 1. Оптическая схема ИК-редуктора светосилы.

одной дифракционной решеткой. Применение же в спектрографе набора сменных решеток усложняет конструкцию и увеличивает размер криостата, что в конечном итоге увеличивает стоимость прибора. Кроме того, следует сказать, что классические “нарезные” решетки являются плохим выбором для ИК-диапазона, т.к., во-первых, их эффективность резко снижается при уменьшении периода решетки (ограничивая таким образом предельное разрешение прибора), а во-вторых, сама решетка получается очень громоздкой (иначе дифракционная эффективность прибора станет еще ниже из-за слишком широкой аппаратной функции).

Последнее время в астрономической практике активно используются объемные фазовые голографические решетки (VPHG — Volume Phase Holographic Gratings) [9]. В отличие от классических решеток, где используется пространственная модуляция, в VPHG наряду с пространственной модуляцией используется модуляция показателя преломления в тонком слое дихроматического желатина, из которого изготовлена VPHG. Толщина слоя желатина должна при этом превосходить максимальную длину волны интересующего спектрального участка.

Физика дифракции света на VPHG аналогична механизму рассеяния рентгеновского излучения на кристаллических решетках. Максимальная эффективность VPHG наблюдается при выполнении условий Брэгга, что эквивалентно зеркальному отражению от плоскостей постоянного показателя преломления. Базовая длина волны, удовлетворяющая условию Брэгга, может изменяться посредством варьирования угла падения света на решетку. Таким образом, изменяя угол Брэгга, можно получать максимальную эффективность дифракции в достаточно широком диапазоне длин волн. Максимальная эффективность VPHG может достигать величины 90–95% даже в тех случаях, когда длина волны излучения сравнима с периодом решетки (как известно, эффективность обычных решеток в этом случае резко падает). К другим преимуществам VPHG следует отнести низкое рассеяние и слабую зависимость эффективности решетки от поляризации исследуемого потока излучения.

## 2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СПЕКТРОМЕТРА

Предлагаемая оптическая схема (Рис. 1) содержит четырехлинзовый коллиматор  $F/4$  с фокусным расстоянием  $F = 160$  мм и пятилинзовую камеру  $F/2$  с фокусным расстоянием  $F = 100$  мм с полем зрения  $2\omega = 16^\circ$ . Коллиматор исправляет кому и астигматизм параболического зеркала БТА ( $F = 24\,000$  мм,  $F/4$ ). Вынос выходного зрачка составляет 120 мм, диаметр выходного зрачка — 40 мм, задний отрезок камеры 10 мм.

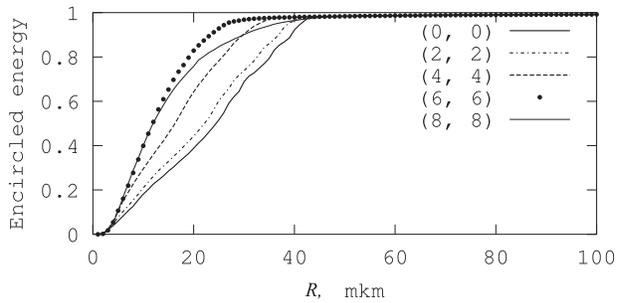
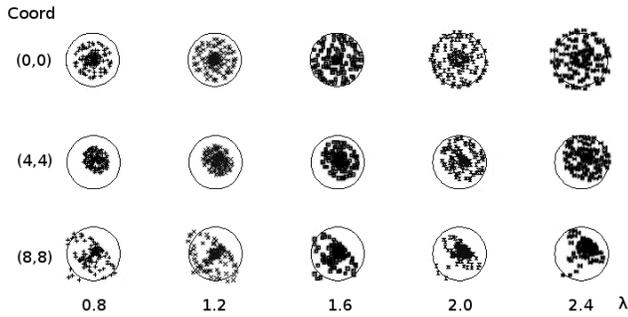
Оптическая схема прибора позволяет работать в двух режимах — фотометрическом и спектральном. Оптика изготавливается из оптических кристаллов  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{ZnSe}$  и  $\text{SiO}_2$  (плавного кварца, прозрачного в ИК-диапазоне). Все поверхности имеют просветляющее покрытие, оптимизированное для диапазона 0.8–2.5 мкм.

Ввиду того, что некоторые халькогениды, из которых изготавливается оптика, являются довольно хрупкими, соответствующие линзы помещаются в индивидуальные предохранительные оправы, которые, в свою очередь, устанавливаются в общей оправе коллиматора и камеры.

По нашим расчетам, вторичный спектр редуктора не превышает  $\pm 150$  мкм в диапазоне 0.8–2.5 мкм, а хроматизм положения не превышает 1 рх (около 20 мкм) на краю поля зрения (см. Рис. 2). Аберрации по полю не превышают размеров двух пикселей светоприемника (примерно 40 мкм). Кругок рассеяния для рабочего спектрального диапазона по полю светоприемника ( $\pm 9.47$  мм,  $\pm 2'3$ ) вписывается в одну угловую секунду (около 75 мкм).

Для уменьшения длины прибора в параллельном пучке редуктора светосилы устанавливаются ломающие диагональные зеркала. Основной особенностью прибора, отличающего его от аналогов, является возможность выбора рабочего спектрального диапазона посредством изменения угла падения светового пучка на дифракционную решетку. Для этого изменяется угол наклона диагональных зеркал синхронно со смещением дифракционной решетки (при помощи синусного механизма).

Параметры линз редуктора светосилы приведены в Таблице 1. Оптика рассчитана на рабочую



**Рис. 2.** Расчетные точечные диаграммы редуктора светосилы (слева). Размер кружка на точечной диаграмме — 1'' (75 мкм). Координаты полей для кружков рассеяния приведены в пространстве светоприемника (в мм). Длина волны — в микрометрах. Энергия в круге (справа) и координаты полей — в миллиметрах.

температуру  $-40^{\circ}\text{C}$ . Моделирование поведения редуктора светосилы при небольших отклонениях температуры от расчетной показало, что в диапазоне  $-40^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  характеристики изображения достаточно стабильны, изменяется лишь общий фокус системы (что компенсируется перемещением светоприемника).

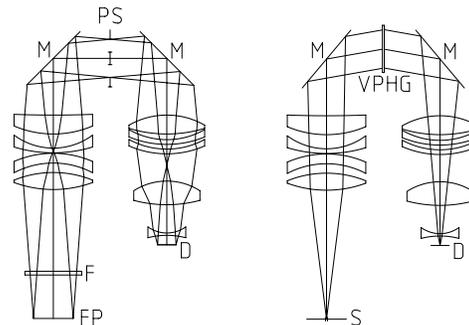
### 2.1. Фотометрический режим

В этом режиме (см. Рис. 3) диагональные зеркала,  $M$ , устанавливаются под углом  $45^{\circ}$  к световому пучку, а между ними вводится охлаждаемая маска зрачка,  $PS$ . Масштаб в плоскости светоприемника,  $D$ , для телескопа БТА составляет  $0.255''/\text{px}$ , поле зрения —  $4.3' \times 4.3'$ . Основные интерференционные фильтры,  $F$  ( $I, J, H$  и  $K$ , а также на отдельные молекулярные полосы), расположены в расходящемся пучке перед коллиматором. Фокусировка изображения осуществляется перемещением светоприемника,  $D$ .

Выходной зрачок охлаждается до температуры порядка  $150\text{ K}$  в целях уменьшения тепловых шумов. Турели с фильтрами (расположены в расходящемся пучке) и щелями (в фокальной плоскости прибора) имеют температуру “подвала” криостата, не охлаждаясь специально. Диагональные зеркала покрываются серебром, защищенным кварцем, имеющим коэффициент отражения не менее  $98\%$  в диапазоне  $0.8\text{--}2.5\text{ мкм}$ .

Для расчета проникающей способности прибора в различных участках спектра нам необходимо иметь представление о пропускании системы “прибор—телескоп”, распределении энергии в спектре объекта с учетом атмосферного поглощения, угловом размере турбулентного диска звезды и характеристиках светоприемника.

Пропускание оптики системы “прибор—телескоп” будем условно считать равным  $0.5$ .



**Рис. 3.** Схема ИК-редуктора в фотометрическом (слева) и спектральном (справа) режимах. Обозначения:  $M$  — диагональные зеркала,  $FP$  — фокальная плоскость телескопа,  $F$  — фильтр,  $PS$  — маска выходного зрачка,  $D$  — светоприемник,  $S$  — щель,  $VPHG$  — дифракционная решетка.

Внеатмосферное распределение энергии в спектре Веги — звезды  $0^{\text{m}}$  класса  $A0V$  — для различных фотометрических полос приведено в Таблице 2.

Поток излучения в спектральной полосе  $\Phi = \Phi_{\lambda} \Delta\lambda$ , где  $\Phi_{\lambda}$  — спектральная плотность потока,  $\Delta\lambda$  — ширина полосы. Умножая поток излучения на эффективную площадь зеркала в данном спектральном диапазоне. Разделив мощность на среднюю энергию фотона (которую будем считать равной энергии фотона центральной длины волны полосы пропускания фильтра,  $h\nu$ ) и умножив на пропускание оптического тракта,  $\eta_p$ , получим количество фотонов, приходящих от звезды к светоприемнику:

$$N_{\gamma} = \frac{\Phi S}{h\nu} \eta_p.$$

Изображение объекта с угловым размером  $\alpha = 1''$  в главном фокусе БТА будет иметь линейный размер  $L = F\alpha = 116\text{ мкм}$ , где  $F$  — фокусное расстояние телескопа. Если оптика

**Таблица 1.** Параметры редуктора светосилы. No. — обозначение условной поверхности или номер линзы,  $R_1$ ,  $R_2$  — радиусы кривизны поверхностей линзы,  $H$  — толщина линзы,  $X$  — расстояние между соседними поверхностями,  $D$  — световой диаметр линзы,  $K$  — коэффициент теплового расширения. Все величины заданы при температуре  $-40^\circ\text{C}$

No.	$R_1$ , мм	$R_2$ , мм	$H$ , мм	$X$ , мм	$D$ , мм	$K$ , $10^{-6} \text{K}^{-1}$	Материал/комментарии
FP	—	—	—	136.46	32	—	фокальная плоскость
1	119.88	-110.84	18.00	10.00	83	18.9	CaF <sub>2</sub>
2	-89.22	-103.61	10.34	0.50	83	7.1	ZnSe
3	143.21	69.60	5.00	14.93	83	0.5	SiO <sub>2</sub>
4	106.10	1104.77	20.00	120.00	83	18.4	BaF <sub>2</sub>
PS	—	—	—	120.00	40	—	выходной зрачок
5	80.23	-137.16	20.00	6.00	80	18.4	BaF <sub>2</sub>
6	-80.37	-105.66	5.00	5.00	80	0.5	SiO <sub>2</sub>
7	-83.63	-99.53	5.00	28.83	80	7.1	ZnSe
8	64.73	-135.61	25.00	29.92	70	18.4	BaF <sub>2</sub>
9	-34.30	80.14	2.50	10.00	40	0.5	SiO <sub>2</sub>
D	—	—	—	—	19	—	светоприемник

**Таблица 2.** Потоки излучения звезды 0<sup>m</sup> класса A0 V в ИК-диапазоне в окнах прозрачности земной атмосферы, яркость ночного неба [10]

Фильтр	$I$	$J$	$H$	$K$
Центральная длина волны фильтра $\lambda_0$ , мкм	0.88	1.25	1.62	2.20
Полоса пропускания $\lambda_{\text{FWHM}}$ , мкм	0.22	0.30	0.20	0.60
Спектральная плотность потока от Веги, $10^3$ Ян	2.55	1.57	1.02	0.64
Спектральная плотность потока от Веги, $10^9$ фотон/( $\text{м}^2 \text{с мкм}$ )	43.73	18.96	9.50	4.39
Яркость неба, m	20.00	16.60	14.40	12.00
Яркость неба (континуум), $10^{-3}$ Ян/arcsec <sup>2</sup>	0.05	1.50	3.00	15.00
Яркость неба (континуум), $10^3$ фотон/( $\text{м}^2 \text{с arcsec}^2 \text{ мкм}$ )	0.86	18.11	27.95	102.90

прибора не изменяет относительное отверстие светового пучка, попадающего на светоприемник, для матрицы HAWAII-I с площадью пикселя  $S_{\text{pix}} = x^2 = 18.5 \times 18.5 \text{ мкм}^2$  этот объект осветит 31 пиксель матрицы. С редукцией светосилы в  $K$  раз размер изображения уменьшится в  $K$  раз ( $116/K \text{ мкм/arcsec}$ ), а его площадь в пикселях — в  $K^2$  раз. Для  $K = 1.6$  одной угловой секунде на небе будет соответствовать 3.9 пикселей на светоприемнике. Среднюю квантовую эффективность матрицы HAWAII-I будем считать равной  $Q = 0.5$ . Очевидно, что количество электронов, накапливаемых за секунду одним пикселем светоприемника,

будет равно:

$$N_e = \frac{Q \times N_\gamma K^2 S_{\text{pix}}}{\pi(L/2)^2} = \frac{4K^2 Q S_{\text{pix}} N_\gamma}{\pi F^2 \alpha^2}.$$

Фон неба вносит дополнительный вклад в уменьшение отношения сигнал/шум. Пусть  $s$  — яркость неба (в квантах на  $\text{м}^2$  встерадиане за секунду),  $N_{\text{CCD}}$  — общий шум светоприемника (электронов за секунду). Собранное телескопом излучение от звезды (пропорциональное  $\Phi S$ ) формирует каждую секунду  $N_\star$  электронов в квантовой яме отдельного пикселя. Аналогично формируются

**Таблица 3.** Оценка проникающей способности прибора в фотометрическом режиме

Полоса	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>
Размер пикселя, arcsec	0.254			
Количество фотонов от Веги в секунду, $N_{\gamma 0}$ , $10^9$	125.08	73.93	24.71	34.25
Количество электронов от Веги на пиксель в секунду, $N_e$ , $10^9$	5.15	3.05	1.02	1.41
Кол-во электронов от неба на пиксель в секунду, $N_{sky}$ , $10^3$	0.05	0.70	1.77	22.36
Шум светоприемника за время экспозиции $T_{exp} = 100$ с, $e^-$	20.0			
Оценка проникающей способности ( $S/N = 5$ ), m	22.85	20.90	19.21	18.19
Экспозиция для $N_* - N_b = 1000$ , с	268.57	74.99	47.27	13.35
Проникающая способность ( $T_{exp} = 100$ с и $N_* - N_b = 1000$ ), m	21.78	21.21	20.02	20.37

электроны из-за воздействия фонового излучения неба (поток от неба  $\Phi_{sky} = s\beta^2$ , где  $\beta$  — угловые размеры выбранной площадки на небе),  $N_{sky}$ . К ним же добавляются тепловые электроны,  $D$ . В результате получаем:  $N = N_* + N_{sky} + N_{CCD}$ .

Для пуассоновской статистики отношение сигнал/шум системы будет составлять  $B = N_*/\sqrt{N}$ , откуда получим требуемый поток от звезды для регистрации ее с заданным уровнем  $S/N$ :

$$N_*^2 - B^2N - B^2(N_{sky} + N_{CCD}) = 0,$$

откуда

$$N_* = \frac{B^2}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4(N_{sky} + N_{CCD})}{B^2}} \right).$$

Оценить  $N_{sky}$  в фотометрической полосе можно по формуле

$$N_{sky} = N_0 \times 10^{-0.4m_{sky}},$$

где  $m_{sky}$  — поверхностная яркость неба (в звездных величинах на квадратную секунду), а  $N_0$  — количество фотоэлектронов на пиксель от протяженного источника с поверхностной яркостью  $0^m/\text{arcsec}^2$ .

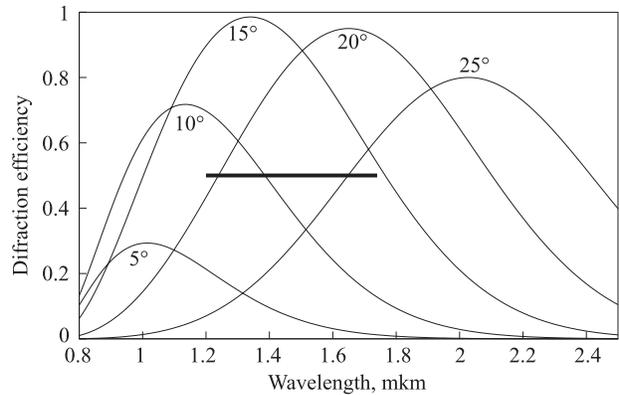
Темновой ток матрицы составляет, по данным производителя, менее  $0.1 e^-/с$ , шум считывания — менее  $10 e^-$  (величина шума считывания зависит от количества промежуточных неструктивных считываний сигнала за время экспозиции). Из выражения  $\Delta m = -2.5 \log(N_*/N_0)$  оценим проникающую способность прибора для фотометрии (см. Таблицу 3).

### 2.2. Спектральный режим

В этом режиме вместо охлаждаемой маски вводится VPHG (см. Рис. 3) таким образом, чтобы поворачиваемые зеркала обеспечивали углы падения на решетку, соответствующие условию Брэгга для заданной центральной длины волны. В фокальную плоскость при этом вводится набор щелей. На Рис. 4 показано, каким образом выбирается спектральный диапазон за счет изменения угла Брэгга при вращении диагональных зеркал.

Оценки параметров голографической фазовой решетки (VPHG) выполним при помощи уравнений из [9, 11].

Эффективность дифракции VPHG в плоскости, параллельной направлению периодической структуры решетки ( $P$ -плоскость) и перпендикулярной



**Рис. 4.** Зависимость эффективности дифракции от длины волны света. Жирной линией отмечен размер кадра.

Таблица 4. Оценка проникающей способности прибора в спектральном режиме

Полоса	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>
Количество электронов на пиксель в секунду, $N_e$ , $10^6$	6.15	2.67	1.34	0.62
Континуум				
Количество электронов от неба на пиксель в секунду, $N_{\text{sky}}$	0.05	1.05	1.62	5.95
Шум светоприемника за время экспозиции ( $T_{\text{exp}} = 1000$ с), $e^-$	110.0			
Оценка проникающей способности, $m$ ( $S/N = 5$ )	19.76	17.91	16.96	15.47
Экспозиция для $N_* - N_b = 1000$ , $10^3$ с	13.01	5.46	4.53	2.49
Проникающая способность ( $T_{\text{exp}} = 1000$ с и $N_* - N_b = 1000$ ), $m$	16.97	16.06	15.32	14.48
Линии OH				
Количество электронов от неба на пиксель в секунду, $N_{\text{sky}}$	0.08	1.48	8.43	66.48
Оценка проникающей способности ( $S/N = 5$ ), $m$	19.68	17.75	16.12	14.19
Экспозиция для $N_* - N_b = 1000$ , $10^3$ с	12.09	4.71	2.11	0.77

ей ( $S$ -плоскость) оценивается выражениями

$$\eta_s = \sin^2\left(\frac{\pi \Delta n_g d}{\lambda \cos \alpha_g}\right),$$

$$\eta_p = \sin^2\left(\frac{\pi \Delta n_g d}{\lambda \cos \alpha_g} \cos(\alpha_g + \beta_g)\right),$$

где  $d$  — толщина решетки;  $\Delta n_g$  — амплитуда модуляции показателя преломления  $n_g$  решетки (зачастую  $n_g(z) = n_g + \Delta n_g \cos f(z)$ );  $\alpha_g$  — угол падения света на плоскость однородного  $n_g$  решетки (внутри нее, отсчитывается от плоскости неоднородности);  $\beta_g$  — угол дифракции (внутри решетки). Если  $\alpha_g = \beta_g$  и выполняется условие Брэгга

$$m\nu_g \lambda = 2n_g \sin \alpha_g,$$

где  $\nu_g$  — частота модуляции показателя преломления решетки, то для простейшего случая, когда штрихи перпендикулярны плоскости решетки, а  $\alpha_g = \beta_g$  получим:

$$n_g \sin \alpha_g = n_{\text{air}} \sin \alpha, \quad \eta_s = \sin^2\left(\frac{\pi n_g \Delta n_g d}{\lambda \sqrt{n_g^2 - \sin^2 \alpha}}\right),$$

$$\eta_p = \sin^2\left(\frac{\pi n_g \Delta n_g d}{\lambda \sqrt{n_g^2 - \sin^2 \alpha}} \left(1 - \frac{2 \sin^2 \alpha}{n_g^2}\right)\right).$$

При этом длину волны, на которую приходится максимум дифракционной эффективности для слу-

чая  $\beta_g = \alpha_g$ , можно оценить из выражения

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2n_g \Delta n_g d}{(1 + 2n) \sqrt{n_g^2 - \sin^2 \alpha}}, \quad n = \overline{1, \infty}.$$

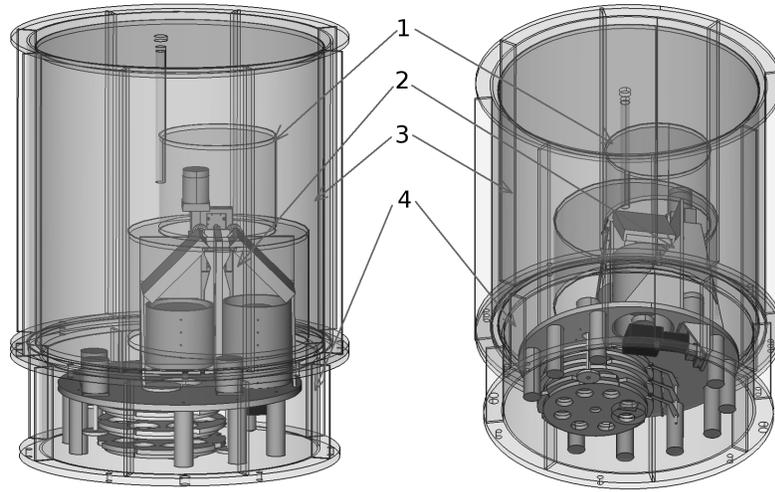
Кривую дисперсии решетки определим по формуле  $\alpha = \arcsin(m\nu_g \lambda / 2)$ , где  $m$  — порядок дифракции. Отсюда получаем для обратной линейной дисперсии:

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{2\Lambda \cos \alpha}{F_c} \left(1 - \left(\frac{\lambda}{2\Lambda}\right)^2\right),$$

где  $F_c$  — фокусное расстояние камеры редуктора светосилы.

Угловая ширина спектра  $\Delta\alpha = \alpha_{\text{red}} - \alpha_{\text{blue}}$ , где  $\alpha_{\text{blue}}$  и  $\alpha_{\text{red}}$  — “синяя” и “красная” границы спектра. Линейная ширина спектра будет определяться фокусным расстоянием камеры:  $l = F_c(\tan \alpha_{\text{red}} - \tan \alpha_{\text{blue}})$ . Для эффективного использования поверхности светоприемника необходимо выбрать фокусное расстояние камеры исходя из оптимального соотношения между спектральным разрешением прибора (т.е. элемент спектра должен занимать по крайней мере 2–3 пикселя) и полушириной дифракционной эффективности решетки.

Для построения спектрографа с разрешением  $R \sim 3000$  на длине волны  $\lambda \sim 1.65$  мкм средняя величина элемента разрешения прибора составит  $\delta\lambda = 1.65/3000 = 0.55$  нм. Для первого порядка дифракции средняя угловая ширина



**Рис. 5.** Общий вид криостата ИК спектрометра: 1 — азотная емкость, 2 — основной каркас, 3 — верхняя часть корпуса криостата, 4 — нижняя часть корпуса криостата.

элемента разрешения составит  $\delta\alpha = \nu_g \delta\lambda$ . Например, для решетки 600 штрихов на миллиметр ( $\nu_g = 6 \times 10^5 \text{ м}^{-1}$ ), эта величина будет равна  $\delta\alpha = 3.3 \times 10^{-4} \text{ рад} = 68''$ . “Размещая” один элемент разрешения на двух пикселях светоприемника,  $N_W = 2$  ( $w = 37 \text{ мкм}$ ), получим оценку для фокусного расстояния камеры:  $F = 11.2 \text{ мм}$ . При редукции светосилы в  $K = 1.6$  раз, угловая ширина щели будет составлять  $wK/F_{\text{тел}} = 0''.51$ .

Чтобы оценить проникающую способность спектрографа, вычислим средний поток в окнах прозрачности земной атмосферы на элемент разрешения спектрографа (умножим плотность потока на ширину элемента разрешения).

Высота спектра звезды с угловым диаметром турбулентного диска в  $1''$  будет составлять для БТА  $N_H = 116/18.5/1.6 = 3.9 \text{ рх}$ . При ширине щели в  $0''.5$  ею будет отброшено 40% площади изображения звезды, т.е. оценочно поток на элемент спектрального разрешения необходимо будет умножить на коэффициент 0.6 (если не учитывать гауссово распределение яркости по изображению турбулентного диска звезды). Определить долю площади изображения звезды диаметра  $D$ , проходящую сквозь щель шириной  $h$ , можно по формуле

$$\eta_{\text{slit}} = 1 - \frac{2}{\pi} \left( \arccos \frac{h}{D} - \frac{h}{D} \sqrt{1 - \frac{h^2}{D^2}} \right).$$

Итак, мощность, приходящаяся на один спектральный элемент вне прибора, будет распределена на  $N_{\text{pix}} \sim 8 \text{ рх}$ . Учитывая пропускание оптики ( $\eta_P \approx 0.5$ ), среднюю дифракционную эффективность решетки ( $\eta_G \approx 0.5$ ) и отсечение части изображения турбулентного диска звезды на щели

( $\eta_S \approx 0.6$ ), получим среднее количество фотоэлектронов на один пиксель светоприемника за секунду:

$$N_e = \frac{\Phi_\lambda \delta\lambda \times \lambda}{hc} \times \frac{SQ\eta_P\eta_G\eta_{\text{slit}}}{N_{\text{pix}}},$$

где  $\Phi_\lambda$  — спектральная плотность потока излучения от звезды;  $\lambda$  — длина волны середины рассматриваемого спектрального диапазона.

Аналогично оценкам для фотометрии сделаем оценку проникающей способности для спектроскопии при экспозиции в 1000 с. Количество фотоэлектронов, возникающих за счет излучения неба в континууме, оценим по формуле

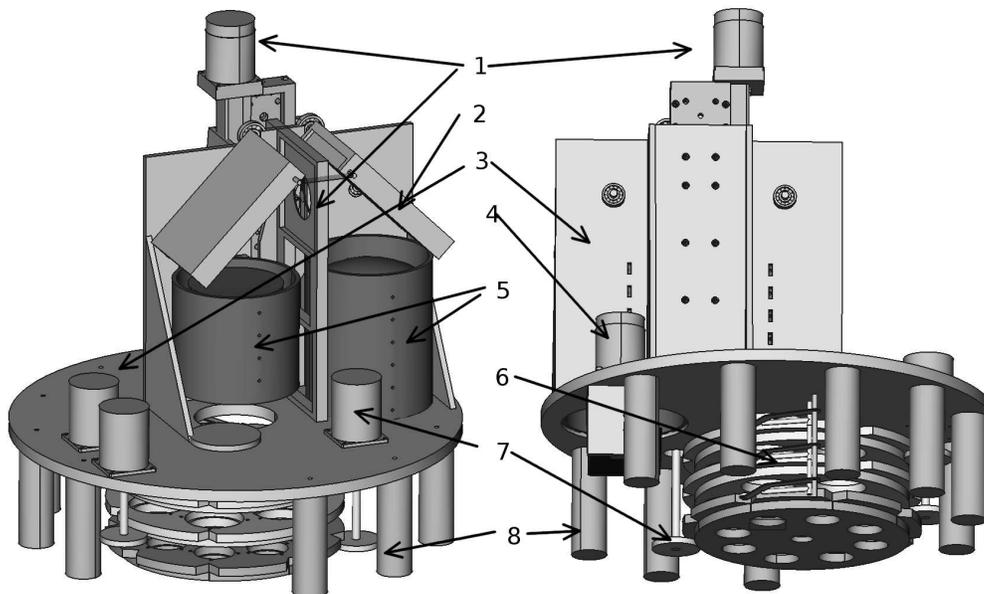
$$\begin{aligned} N_{e, \text{cont}} &= \frac{c}{\lambda^2} \times \frac{\Phi_{\lambda, \text{sky}} \lambda}{hc} \times \frac{\delta\lambda S \eta_P \eta_G Q \rho}{N_W} \\ &= \frac{\Phi_{\lambda, \text{sky}}}{h\lambda} \times \frac{\delta\lambda S \eta_P \eta_G Q \rho}{N_W}, \end{aligned}$$

где  $\rho$  — площадь пикселя в стерadiansах неба. Оценочные величины приведены в Таблице 4.

### 3. КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА

#### 3.1. Криостат

Весь прибор размещается в цилиндрическом криостате (см. Рис. 5) диаметром не более 550 мм и длиной не более 650 мм. Часть криостата занимает емкость с жидким азотом, выполненная в конструктиве “непроливайки”, предназначенной для эксплуатации в первичном фокусе БТА. Конструкция криостата разрабатывается в соответствии с принципами ранее созданных криостатов для БТА [12]. Оптическая схема содержит лишь две области, требующих глубокого охлаждения:



**Рис. 6.** Общий вид криостируемого ИК-спектрометра: 1 — подвижка с блоком щелей и маски зрачка, 2 — диагональные зеркала, 3 — каркас прибора, 4 — подвижка фокусировки, 5 — коллиматор и камера, 6 — блок турелей, 7 — приводы турелей, 8 — теплоизолирующие опоры.

светоприемник и блок выходного зрачка с дифракционными решетками. Высокая стабильность поддерживаемой температуры нужна лишь для светоприемника.

Условимся называть часть криостата, на которой расположен фланец с оптическим окном, нижней. Вакуумная камера состоит из двух асимметрично располагающихся цилиндрических емкостей: нижняя емкость находится в нижней разъемной части криостата, верхняя располагается внутри азотной емкости и выполнена в виде цилиндрического углубления в емкость.

Фланцы верхней и нижней частей криостата облегчают его сборку/разборку: снимая верхнюю крышку с азотной емкостью, мы получаем доступ ко всей внутренней компоновке криостата.

Корпус вакуумной камеры выполнен из листового титана. Для укрепления внешних стенок криостата и улучшения их несущей способности к внешним стенкам обеих частей криостата привариваются ребра жесткости, направленные вдоль вертикальной оси.

На обечайке нижней камеры располагаются электрические герморазъемы типа СНЦ для ввода-вывода сигналов управления и питания внутренних элементов, окна, облегчающие сборку-разборку всей конструкции, и трубка откачки, оснащенная предохранительным клапаном.

Перед “теплым” входным окном криостата на лицевом фланце расположен затвор. Все оптическое и электромеханическое оснащение размещается на сварном каркасе из нержавеющей стали,

крепящемся к нижнему фланцу прибора через теплоизолирующие прокладки (см. Рис. 6).

В фокальной плоскости телескопа размещена охлаждаемая турель щелей. За ней в расходящемся пучке находятся две турели светофильтров. Далее по ходу оптической оси располагается коллиматор, формирующий выходной зрачок прибора. За коллиматором располагаются два диагональных зеркала, разворачивающих световой пучок на  $180^\circ$ . В спектральном режиме между диагональными зеркалами вводится дифракционная решетка, в фотометрическом режиме между ними вводится охлаждаемая маска зрачка. Далее располагаются объектив и светоприемник.

Азотная емкость расположена в верхней части криостата и представляет собой цилиндр с асимметричным углублением. Обечайка и верхние крышки азотной емкости выполняются из нержавеющей стали. Нижнее кольцо емкости с теплоотводящими контактными площадками изготавливается из меди.

Крепление азотной емкости внутри корпуса криостата осуществляется ее сваркой с внутренней заливной трубкой (которая в свою очередь приваривается к внешней азотной трубке, которая также сваркой крепится к наружному фланцу криостата), кроме того, нижняя часть обечайки азотной емкости растягивается с помощью кевларовых нитей для обеспечения конструкции нужной жесткости.

Охлаждение основных элементов оптической схемы осуществляется посредством гибких медных хладопроводов, которые монтируются к медному



При движении кулачка эта точка перемещается по его поверхности так, что вектор  $\mathbf{O''M}$  переносится параллельно себе. Координаты точки М относительно  $O'$ :

$$\begin{cases} x_M = x_{O''} + R \cos \gamma; \\ y_M = y_{O''} - R \sin \gamma. \end{cases} \quad (A2)$$

Наклоня зеркало от  $0^\circ$  до угла  $\alpha$ , мы увеличиваем длину центрального луча, падающего на зеркало, на величину  $\delta l = -x' \tan \alpha$ . Относительно плоскости зеркала при  $\alpha = 0^\circ$  координата  $Y$  точки падения отраженного луча на дифракционную решетку равна  $y_{\text{ray}} = \delta l - w \cot 2\alpha$ .

С точностью до постоянного слагаемого, однозначно определяемого конфигурацией системы, вертикальное смещение кулачка оказывается связанным с координатами точки касания упорного подшипника и кулачка:

$$Y_0 = C + y_M + (w - x' - x_M) \cot \gamma. \quad (A3)$$

Таким образом, уравнения (A1), (A2) и (A3) позволяют найти зависимость величины смещения кулачка от угла падения света на зеркало. Обращение этой зависимости позволяет найти аналитическую связь между смещением кулачка и углом падения света на дифракционную решетку.

### 3.3. Каркас для монтирования элементов прибора

Все оптическое и электромеханическое оснащение размещается на монолитном каркасе из нержавеющей стали, который крепится к нижнему фланцу через термоизолирующие (керамические или стеклотекстолитовые) прокладки. На Рис. 6 изображен внешний вид каркаса со смонтированными на него элементами.

Каркас изготавливается посредством сваривания между собой элементов его конструкции, отпуска сварных швов в печи и дальнейшей шлифовки и расточки на координатно-расточном станке. Конструкция каркаса обеспечивает требуемую жесткость, вместе с тем облегчая процесс монтажа—демонтажа элементов.

Крепление узлов прибора к каркасу выполняется при помощи винтовых соединений. Закрепление электрических проводов выполняется путем пропускания их через перфорацию в стенках каркаса и/или при помощи хомутов. Хладопроводы крепятся к каркасу винтовыми соединениями или стяжками через теплоизолирующие прокладки.

### 3.4. Турели

Схема спектрометра содержит три турели: две турели для размещения оптических фильтров и одну — для размещения щелей.

Турели изготовлены из нержавеющей стали, приводятся во вращение шаговыми двигателями. Для контроля текущего положения турели используется двоичное кодирование позиций при помощи датчиков Холла.

Турель щелей содержит восемь сквозных отверстий диаметром 35 мм. Набор щелей состоит из круглых металлических рамок, на которые натянута фольга с вырезанной в ней щелью нужной ширины. Крепление рамок к поверхности турели осуществляется посредством прижимных пластин. Щели занимают семь позиций турели. Восьмая позиция остается свободной для обеспечения фотометрического режима работы.

Турели фильтров содержат шесть позиций диаметром 50 мм. Крепление фильтров осуществляется посредством металлических вставок и прижимных пластин.

Турели размещаются на общей оси, жестко закрепленной на основной пластине несущего каркаса. На этой же пластине закреплены шаговые двигатели, приводящие турели во вращение. Второй конец оси турелей фиксируется дополнительной пластиной. Каждая турель посажена на пару поджатых подшипников. Передача крутящего момента осуществляется посредством шестерней, посаженных на валы двигателей, второй конец каждой шестерни не закрепляется.

### 3.5. Оптические элементы

Коллиматор и камера размещены на вертикальной пластине каркаса. Внешние оправы коллиматора и камеры представляют собой цилиндрические конструкции диаметром 107 мм. Кристаллические линзы закреплены во внешней оправе при помощи вспомогательных предохранительных оправ, предотвращающих повреждение оптики из-за напряжений при изменении температуры (см. Рис. 9).

Предохранительные самоцентрирующиеся оправы за счет своей конструкции обеспечивают разгрузку напряжений, возникающих при тепловых деформациях оправ и материала линз, а также стабилизируют положение линзы относительно оптической оси. При изменении температуры оправы и линзы различия в размерах линзы и оправы компенсируются посредством перемещения линзы и подпружиненного стопорного кольца в направлении вдоль оптической оси прибора за счет скольжения линзы по фаскам оправы и стопорного кольца. Перемещение стопорного кольца

обеспечивается цилиндрическими направляющими. Предохранительные оправы обеспечивают возможность изменения температуры оптики со скоростью до  $15^{\circ}\text{C}$  в час (при рекомендуемой скорости в  $6^{\circ}\text{C}$  в час).

Внешние оправы оптики закрепляются на каркасе при помощи винтов. Для однозначности установки оправ на каркасе выполнены дугообразные ложементы. К внешним оправам подводятся гибкие хладопроводы для охлаждения оптики до рабочей температуры ( $-40^{\circ}\text{C}$ ).

### 3.6. Диагональные зеркала

Для укорачивания оптической схемы, а также возможности изменения угла падения светового пучка на дифракционную решетку при работе в спектральном режиме, в оптической схеме прибора присутствуют два поворачивающихся зеркала. При работе в фотометрическом режиме зеркала наклонены относительно светового пучка на  $45^{\circ}$ , в спектральном режиме они изменяют угол наклона от  $30^{\circ}$  до  $45^{\circ}$  (при этом синхронизация смещения дифракционной решетки и преобразование поступательного движения транслятора блока решеток и маски зрачка во вращательное движение зеркал обеспечивается синусным механизмом).

Зеркала представляют собой прямоугольные пластины из ситалла или другого материала с нанесением на отражающую поверхность защищенного кварцем серебряного покрытия. Габаритные размеры зеркал —  $120 \times 80$  мм, толщина — порядка 15 мм. Зеркала закрепляются в оправках из нержавеющей стали с помощью прижимных пластин и подпружиненных упоров. Оправы зеркал крепятся к вертикальной опоре каркаса спектрометра на полуосях, фиксируемых парой подтянутых подшипников.

Произведено моделирование синусного механизма. При оптимальном расположении оси вращения зеркала, оси опорного подшипника, угле наклона и габаритах толкателя можно добиться минимального отклонения положения выходного зрачка от центральной плоскости подвижки при изменении угла наклона зеркал. Согласно модели, отклонение светового пучка от центра дифракционной решетки во всем рабочем диапазоне углов падения не превышает 1.33 мм, смещение положения центра выходного зрачка относительно плоскости VPHG не превышает 2.62 мм. Зависимость угла падения света на дифракционную решетку от величины вертикального перемещения транслятора почти линейна при значении угла наклона кулачка синусного механизма  $26^{\circ}$ .

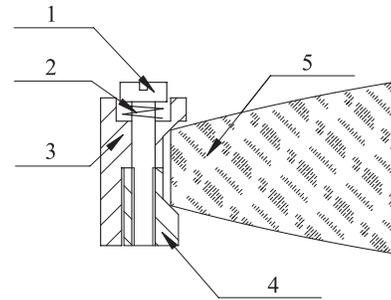


Рис. 9. Предохранительные оправы кристаллических линз: 1 — винт, 2 — пружина, 3 — неподвижная часть оправы, 4 — подвижная часть оправы, 5 — линза.

### 3.7. Системы управления и регистрации

*Система управления* позволяет перемещать элементы прибора для изменения его режимов работы, а также предоставляет сведения о положении этих элементов и их температуре. В тестовом режиме система управления должна быть способна работать автономно, сохраняя минимальную функциональность. В обычном режиме эксплуатации она подключается к управляющему компьютеру при помощи интерфейсов USB, RS-232 или RS-485. Электрическое питание системы управления обеспечивается либо отдельным блоком питания, либо блоком питания системы сбора.

Так как узлы криостата не требуют одновременной работы нескольких приводов, управление шаговыми двигателями коммутативно: одновременно может работать лишь один шаговый двигатель. Управление двигателями реализуется при помощи промышленных драйверов шаговых двигателей.

Положение элементов контролируется датчиками Холла и концевыми выключателями. Опорные положения турелей кодируются бинарно посредством соответствующего размещения магнитов на турелях (датчики Холла располагаются на неподвижной части) — такой способ уменьшает количество датчиков и, в свою очередь, количество линий связи и обрабатываемых сигналов.

*Система регистрации* обеспечивает с помощью охлаждаемого гибридного HgCdTe КМОП-мультиплексора НАВАИИ цифровую регистрацию изображения, формируемого оптической системой телескопа и спектральной/фотометрической аппаратурой. Управление системой регистрации осуществляется тем же персональным компьютером, к которому подключена система управления.

Система регистрации обеспечивает контроль режимов работы светоприемника, поддержание стабильной рабочей температуры, управление экспозицией, считывание и сохранение изображений в FITS-формате.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив, принимающий участие в разработке и изготовлении ИК-спектрометра, довольно обширен. Авторы статьи выражают свою благодарность всему этому коллективу:

- специалистам Лаборатории перспективных разработок САО РАН (пос. Нижний Архыз) под руководством С. В. Маркелова, разрабатывающих систему регистрации прибора;
- специалистам ООО “Опто-Технологический Сервис” (г. Санкт-Петербург) под руководством Б. Н. Оструна, изготавливающих оптику коллиматора и камеры;
- специалистам ИПФ РАН и НП “ОКБ развития высоких технологий” (г. Нижний Новгород) под руководством В. Ф. Вдовина и Ю. Я. Бродского, прорабатывающих эскизный проект криостата и механики прибора.

Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. E. Persson, R. Barkhouser, C. Birk, et al., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conf. Ser. **7014**, 95 (2008).
2. C. D. Mackay, R. G. McMahon, M. G. Beckett, et al., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conf. Ser. **4008**, 1317 (2000).
3. M. G. Beckett, C. D. Mackay, R. G. McMahon, et al., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conf. Ser. **3354**, 431 (1998).
4. M. G. Beckett, C. D. Mackay, R. G. McMahon, et al., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conf. Ser. **2871**, 1152 (1997).
5. K. Motohara, F. Iwamuro, T. Maihara, et al., Publ. Astronom. Soc. Japan **54**, 315 (2002).
6. S.-i. Okumura, E. Nishihara, E. Watanabe, et al., Publ. Astronom. Soc. Japan **52**, 931 (2000).
7. *Scientific Detectors for Astronomy 2005*, Ed. by J. E. Beletic, J. W. Beletic, and P. Amico (Springer, Berlin, 2006), p. 771.
8. CIRSI measured properties, <http://www.ast.cam.ac.uk/~optics/cirsi/documents/properties.html>
9. S. C. Barden, J. A. Arns, W. S. Colburn, and J. B. Williams, Publ. Astronom. Soc. Pacific **112**, 809 (2000).
10. C. R. Benn and S. L. Ellison, New Astronomy Reviews **42**, 503 (1998).
11. I. K. Baldry, J. Bland-Hawthorn, and J. G. Robertson, Publ. Astronom. Soc. Pacific **116**, 403 (2004).
12. А. Н. Борисенко, В. Ф. Вдовин, А. И. Елисеев и др., Петербургский журнал электроники **28** (3), 39 (2001).

## IR Spectrometer Project for the BTA Telescope

V. L. Afanasiev, E. V. Emelianov, V. A. Murzin, V. F. Vdovin

Keywords: *instrumentation: spectrographs*