

УДК 520.1.8

Интерферометр для фурье-спектроскопии высокого разрешения

Л. Б. Маслеев

Предложены варианты схемы интерферометра для фурье-спектроскопии, обеспечивающей высокое спектральное разрешение путем увеличения кратности разности хода интерферирующих лучей. Схема обладает малыми габаритами, допускающими размещение всей конструкции внутри криостата. Приводится сравнение схем интерферометров по пропусканию и интенсивности теплового излучения фона оптического тракта. Предлагается использование схемы для астрономических фурье-спектрометров.

INTERFEROMETER FOR HIGH RESOLUTION FOURIER — TRANSFORM SPECTROSCOPY, by Masleev L. B.— Versions of Fourier spectroscopy interferometry system are suggested. The system provides for a high spectroscopy resolution by increasing the multiple of path difference of interference beams. It has small sizes that enables the whole structure to be placed within Dewar flask. Comparison is made of the interferometer system according to the transmission and intensity of thermal radiation of the optical passage background. This system is suggested to be used for astronomical Fourier-transform spectrometers.

Исследование спектров методом фурье-спектроскопии находит все большее применение в астрономии. Фурье-спектрометры для астрономического применения по сравнению с лабораторными вариантами этих приборов должны обладать рядом конструктивных особенностей: размещаться на телескопах, работать в произвольных пространственных положениях, иметь минимальные габариты.

Хорошо известно одно из достоинств фурье-спектрометра: его разрешающая сила определяется максимальной разностью хода интерферирующих лучей и может достигать величины $\sim 10^6$ [5]. Разрешающая сила R , максимальная разность хода Δ_{\max} и длина волны излучения λ связаны соотношением $\Delta_{\max} = R\lambda$ [2]. Для достижения $R \sim 10^6$ при $\lambda = 0,5$ мкм необходимо обеспечить в интерферометре с высокой точностью изменение разности хода интерферирующих лучей до $\sim 0,5$ м. Осуществление сканирования на такую величину при сохранении высокого качества интерференции в спектрометре является сложной технической задачей.

Используя конструктивные изменения интерферометра, можно добиться высокого разрешения не увеличением перемещения сканирующего элемента, а увеличением кратности разности хода интерферирующих лучей. При этом необходимая величина сканирования L уменьшается в k раз, где k — кратность разности хода интерферирующих лучей (отношение разности хода интерферирующих лучей к перемещению сканирующего элемента), $L = R \cdot \lambda / k$. В классической схеме интерферометра Майкельсона величина $k = 2$, известна схема, где $k = 4$ [3, 4]. В данной работе предлагается схема интерферометра, реализующая в принципе значительно большую разность хода интерферирующих лучей. Особенностью предлагаемой схемы являются также менее жесткие требования к угловым и линейным разъюстировкам оптических элементов.

Предлагаемая схема интерферометра для фурье-спектроскопии высокого разрешения является дальнейшим развитием схемы «двойной кошачий глаз» («ДКГ») [3] и сохраняет ее достоинства. Оптическая схема устройства представлена на рис. 1. Вариант выполнения интерферометра с более высокой кратностью разности хода показан на рис. 2.

Схема получена путем введения в «двойной кошачий глаз» четы-

рех плоских зеркал. При этом оба сферических зеркала объединены в одном элементе — ретрорефлекторе 1, который размещен на общей сканирующей платформе 3 вместе со светоделителем 2 (рис. 1). Входной пучок 5 коллимирован и падает на плоское зеркало 4 под углом, немного большим 45° (что соответствует малому углу падения на светоделитель). Ход лучей идентичен последнему в «ДКГ» с той лишь

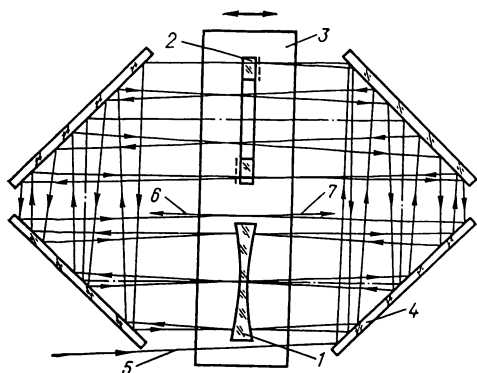


Рис. 1. Интерферометр с кратностью разности хода $k=8$

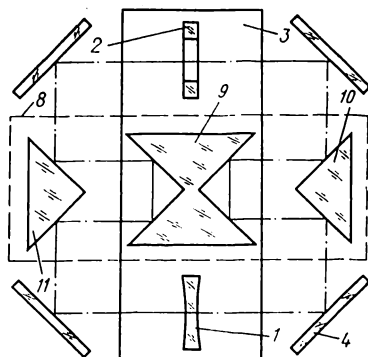


Рис. 2. Интерферометр с модулем для удвоения кратности разности хода, $k=16$

разницей, что ретрорефлектор не выполняет функцию коллиматора, а значит и выходные пучки 6 и 7 коллимированы.

Достоинства приведенной схемы интерферометра заключаются в следующем:

1. Кратность разности хода равна 8.

2. Фокусное расстояние ретрорефлектора f' по крайней мере в 3 раза больше продольного размера схемы. Тогда допустимое перемещение сканирующей платформы, ограниченное величиной $f'/5$ [3], фактически приближается к продольному габариту системы.

Эти два достоинства позволяют сделать вывод о целесообразности применения данной схемы в фурье-спектроскопии высокого разрешения.

Для получения более высокого разрешения возможно увеличение кратности разности хода введением в схему модулей 8 (рис. 2), состоящих из трех зеркальных блоков 9, 10 и 11. При этом кратность разности хода k определяется соотношением:

$$k = 2^{3+n}, \quad (1)$$

где n — количество модулей 8.

Применение большого количества зеркал несомненно снижает пропускание интерферометра, но при высоких коэффициентах отражения зеркальных покрытий пропускание становится малым лишь при больших k (таблица). Пропускание определено без учета светоделительной пластины.

Данные о пропускании интерферометра

Интерферометр	к	N	Пропускание		T, К
			$\rho=0,90$	$\rho=0,96$	
Схема Майкельсона	2	1	0.90	0.96	300
«ДКГ»	4	5	0.59	0.82	206
Схема на рис. 1	8	19	0.14	0.46	157
Схема на рис. 2	16	52	0.004	0.11	138

Примечание: N — количество отражений на зеркалах для одного интерферирующего луча; ρ — коэффициент отражения зеркального покрытия.

Особенность предлагаемой схемы интерферометра для фурье-спектроскопии состоит в том, что она позволяет достичь высокой разрешающей силы при минимальных габаритах и пространственном перемещении сканирующего элемента. Конструкция интерферометра позволяет разместить все его элементы на компактной оптической платформе в вакуумируемом объеме внутри криостата. Как показывает практика [1, 6], охлаждение оптики интерферометра повышает чувствительность фурье-спектрометра за счет уменьшения тепловых флуктуаций фона и приемника излучения.

Интенсивность теплового излучения фона оптического тракта интерферометра можно оценить в соответствии с законом Кирхгофа:

$$f_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \cdot B_{\lambda}(T) = (1 - a_{\lambda}) \cdot B_{\lambda}(T), \quad (2)$$

где ϵ_{λ} — эффективная излучательная способность, a_{λ} — пропускание интерферометра, $B_{\lambda}(T)$ — функция Планка для длины волны излучения λ при температуре T . Из приведенной формулы и данных таблицы видно, что с повышением кратности разности хода в интерферометре интенсивность фона стремится к чернотельному пределу при температуре T . Полная интенсивность фона для нейтрального пропускания составит

$$f = \frac{1 - a}{\pi} \sigma T^4 = (1 - a) \cdot 1.8 \cdot 10^{-5} \cdot T^4 \text{ эрг/(см} \cdot \text{с} \cdot \text{ср)}. \quad (3)$$

Исходя из приемлемых значений пропускания интерферометра, можно определить температуру охлаждения, уменьшающую уровень фоновых засветок фотоприемника до заданных значений. В шестой колонке таблицы 1 приведены значения температуры охлаждения оптики интерферометра, при которых уровень фона имеет то же значение, что и в интерферометре Майкельсона при $T=300$ К. Из приведенных данных следует, что интерферометр типа «двойной кошачий глаз» целесообразно охлаждать до температуры сухого льда. Интерферометры с высокой кратностью разности хода требуют охлаждения до температуры жидкого азота.

1. Бекман Д., Робсон И. Баллонный интерферометр с гелиевым охлаждением для исследования изотропного фона в субмиллиметровой области спектра.— В кн.: Инфракрасные методы в космических исследованиях. М.: Мир, 1977, с. 74—84.
2. Белл Р. Дж. Введение в фурье-спектроскопию.— М.: Мир, 1975.—380 с.
3. Ежовская Т. Б., Шипилов А. Ф. А. с. 780629 (СССР). Фурье-спектрометр.— Оубл. в Б. И., 1981, № 33.
4. Ежовская Т. Б., Шипилов А. Ф. Фурье-спектрометр с подвижным светоделителем.— Приборы и техника эксперимента, 1981, № 6, с. 166—167.
5. Мартин Д. Интерферометрическая спектрометрия в инфракрасной астрономии.— В кн.: Инфракрасные методы в космических исследованиях. М.: Мир, 1977, с. 295—310.
6. Шанэн Ж. Криостаты для инфракрасных экспериментов на баллонах.— В кн.: Инфракрасные методы в космических исследованиях. М.: Мир, 1977, с. 213—220.

Главная астрономическая обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию
16.07.1984