

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК, СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

В.С.Бурмасов, Б.А.Князев, Г.А.Любас, М.Г.Федотов

СТАТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР

НА БАЗЕ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА

С РЕГИСТРАЦИЕЙ ФОТОДИОДНОЙ ЛИНЕЙКОЙ

Препринт

Новосибирск

1992





СТАТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР НА БАЗЕ ПЕРСОНАЛЬНОГО  
КОМПЬЮТЕРА С РЕГИСТРАЦИЕЙ ФОТОДИОДНОЙ ЛИНЕЙКОЙ  
В.С.Бурмасов, Б.А.Князев, Г.А.Любас, М.Г.Федотов

АННОТАЦИЯ

Создан статический (без движущихся частей) фурье-спектрометр с регистрацией интерферограммы фотодиодной линейкой, содержащей 1024 элемента. Регистрация интерферограмм осуществляется с помощью аппаратуры в стандарте КАМАК и персонального компьютера. Численное восстановление спектра из интерферограммы осуществляется с помощью быстрого преобразования Фурье. Для снижения шума использован метод двукратной экспозиции со смещением одного из зеркал интерферометра. В качестве примера приведены интерферограммы излучения ртутной лампы, а также восстановленные по ним спектры в области от 300 до 1060 нм. Разрешающая сила прибора  $\lambda/\Delta\lambda$  составляла в экспериментах для видимой области около 300 и может быть повышена при использовании фотоприемника с большим числом элементов. Время регистрации интерферограммы может варьироваться от 80 мкс до - 1с (до - 10 с при подводе воды для охлаждения горячих спаев батареи Пельтье).

STATIC FOURIER SPECTROMETER BASED ON PERSONAL COMPUTER  
WITH DETECTING BY PHOTODIODE ARRAY

V.S. Burmasov, B.A. Knyazev, G.A. Lyubas, M.G. Fedotov

A static Fourier spectrometer without moving parts is developed. Interferogram patterns are detected by a linear photodiode array with 1024 elements and recorded by CAMAC and personal computer IBM PC/AT-286. The initial spectra are reconstructed numerically by means of fast Fourier transform. To decrease the noise level a double exposition method (one mirror of the interferometer is removed between the expositions) was used. As an example the interferograms of a mercury lamp emission in the 300 - 1060 nm wavelength region are presented. The resolving power for visible light is about 300, and can be increased through using an array with more number of elements. The exposition time can be varied from 80  $\mu$ s to about 1 s.

© Новосибирский государственный  
университет. 1992

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление спектра по интерферограмме впервые было выполнено более чем сто лет назад [1], тем не менее существенных успехов фурье-спектроскопии достигла лишь в последние 2 - 3 десятилетия. По многим параметрам, таким, например, как разрешающая сила и светосила (выигрыш Жакино [2]), она превзошла традиционную щелевую спектроскопию на основе диспергирующих элементов.

Широкую известность получили сканирующие фурье-спектрометры, применяемые, как правило, для измерений в инфракрасной области спектра, где наиболее полно реализуется выигрыш Фелжета [2]. Однако практически они не используются в видимом и ближнем ИК диапазонах, где преимущества фурье-спектрометра не компенсируют его недостатки: сложность и низкое временное разрешение.

Особый интерес в связи с этим представляет направление статической фурье-спектроскопии, интенсивно развиваемой в последнее время [3 - 5]. Основное достоинство спектрометров этого направления - отсутствие подвижных элементов в конструкции прибора, что может оказаться решающим фактором при создании более совершенного фурье-спектрометра.

Необходимо отметить, что термин "статистическая фурье-спектроскопия" не является в настоящее время установленным. Применяются также названия "голографическая спектроскопия" [6] и "фурье-преобразовательная спектроскопия" (Fourier transform spectroscopy) [4,5]. Данными терминами подчеркивается принципиальное отличие от сканирующей фурье-спектроскопии, заключающееся в том, что формируемая здесь интерферограмма представляет так называемую голограмму пространственно-некогерентного излучения [7]. Восстановление спектра с такой интерферограммы может осуществляться так же, как и восстановление голографического изображения.

Однако если регистрация интерферограммы осуществляется фотоэлектрически, а спектр восстанавливается с помощью обратного фурье-преобразования, то такой прибор естественнее



назвать статическим фурье-спектрометром [3]. В последнее время в связи с появлением позиционно-чувствительных детекторов и развитием персональных компьютеров интерес к схеме статического фурье-спектрометра значительно возрос.

В данной работе описан статический фурье-спектрометр на основе интерферометра Саньяка с регистрацией интерферограммы фотодиодной линейкой (линейной решеткой фотодиодов - РФД). Обработка интерферограммы и восстановление по ней спектра осуществляется с помощью персонального компьютера IBM PC/AT-286.

### 1. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Схема прибора приведена на рис. 1. Оптическая часть спектрометра состоит из входного и выходного (1,2) объективов, диафрагмы (3), светоделителя (4), двух зеркал (5,6). Светоделитель и зеркала образуют интерферометр Саньяка с обратно-круговым ходом лучей. Зеркало (5) можно перемещать в направлении нормали к нему. Перемещение зеркала необходимо для изменения разности хода интерферирующих лучей, или, что то же самое, спектральной разрешающей способности спектрометра  $\delta\sigma$  ( $\sigma = [\text{см}^{-1}]$ ). Зеркала интерферометра изготовлены из стекла с алюминиевым напылением.

Наибольшая видность интерференционной картины в интерферометре Саньяка достигается при коэффициенте пропускания светоделителя, равном 50%. Существенным также является постоянство пропускания в исследуемом спектральном диапазоне. На рис.2 представлен график зависимости коэффициента пропускания применяемого - светоделителя (светоделительный кубик) от длины волны излучения, рабочая поверхность которого напылена аллюминием. Видно, что коэффициент пропускания близок к 50% в желто-зеленой области и заметно отличается от 50% на краях спектрального диапазона.

Формирование интерферограммы в фокальной плоскости линзы (2) происходит следующим образом. Изображение

исследуемого источника проецируется входным объективом в переднюю фокальную плоскость выходной линзы<sup>1</sup>. В интерферометре образуется два мнимых изображения источника (рис.3), расстояние  $a$  между которыми пропорционально смещению  $L$  зеркала (5). Сферические волны, излучаемые точками мнимых протяженных источников, преобразуются объективом (2) в плоские (пространственное фурье-преобразование). Плоские волны от соответственных точек источника интерферируют, образуя в случае монохроматического излучения интерференционное поле с эквидистантными полосами. Считая, что спектральная плотность излучения  $B(\sigma)$  обоих источников одинаковая, а источники точечные, из рис.3 получим распределение интенсивности  $I(x)$  в интерферограмме для отдельной монохроматической компоненты  $B(\sigma)$  [8]

$$I(x) = B(\sigma)(1 + \cos(2\pi \cdot \sigma \cdot x \cdot a/f)). \quad (1)$$

Интегрируя по спектру  $B(\sigma)$ , получаем для произвольного спектра

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma)(1 + \cos(2\pi \cdot \sigma \cdot x \cdot a/f)) d\sigma, \quad (2)$$

где  $\sigma = 1/\lambda$ , ( $\lambda$  - длина волны излучения),  $x$  - координата вдоль направления перпендикулярного интерференционным полосам,  $a = \sqrt{2} \cdot L$  - расстояние между мнимыми источниками,  $L$  - смещение подвижного зеркала (5) относительно своего положения, при котором разность хода между интерферирующими лучами равна нулю,  $f$  - фокусное расстояние выходного объектива. Из выражения (2) видно, что интенсивность  $I(x)$  представляет собой фурье-преобразование от спектральной плотности излучения  $B(\sigma)$ .

1

<sup>1</sup>Заметим, что принципиальным является наличие в схеме лишь выходной линзы, которая осуществляет преобразование фурье в пространстве поперечных волновых чисел, тогда как входной объектив нужен лишь для уменьшения размеров спектрометра (уменьшения фокусного расстояния выходной линзы).



## 2. СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Спектральное разрешение прибора  $\delta\sigma$  обратно пропорционально максимальной разности хода интерферирующих лучей  $\delta l$  [9]

$$\delta\sigma = 1 / \delta l, \quad (3)$$

что дает (см. рис.3)

$$\delta\sigma = 1/a \cdot L = 1/(a \cdot d \cdot N), \quad (4)$$

где  $L$  — длина линейки,  $a$  и  $N$  — соответственно шаг и число фотодиодов (1024). В результате теоретическая разрешающая сила прибора будет равна [4]

$$R = \sigma_{\max} / \delta\sigma = N/2 = 512. \quad (5)$$

## 3. РЕГИСТРАЦИЯ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ

Интерферограмма регистрировалась с помощью линейки фотодиодов типа ЛФЭ 1024-25/2. Аналоговый сигнал с блока управления линейки поступает в АЦП, откуда цифровой массив данных через крейт контроллер КАМАК КО607 и последовательно-параллельный интерфейс ППИ-4 [9] передается в управляющую ЭВМ (IBM PC/AT), где производится последующая программная обработка сигнала.

Линейка фотодиодов содержит 1024 чувствительных элемента высотой 150 мкм и шагом размещения 25 мкм. Пороговая чувствительность элемента — порядка  $2 \cdot 10^{-16}$  Дж, энергия насыщения —  $6 \cdot 10^{-12}$  Дж. Область спектральной чувствительности линейки (по уровню 0,9) находится в пределах 0,3 — 1,06 мкм с максимумом в районе 0,7 — 0,9 мкм. Монохроматическая чувствительность фотоприемника —  $10^9$  А/Дж.

Для уменьшения темнового тока и увеличения максимального времени накопления изображений фотоприемник помещен в герметичный термостат с охлаждающей батареей элементов Пельтье и оптическим окном из лейкосапфира. Рабочая температура термостата  $-5$  °С (естественное охлаждение) или  $-35$  °С (отвод тепла проточной водой).

Стабилизация температуры осуществляется блоком управления линейкой. Кроме этого, блок формирует интервал времени накопления и четыре режима работы линейки, а также

предусиление, аналоговую обработку сигнала и синхронизацию АЦП. Темп опроса линейки 200 кГц.

Применялся 10-разрядный АЦП (АЦП-101S) [11] с диапазоном входных сигналов от 0,08 до 10,24 В. Объем внутренней памяти АЦП — 4096 слов, минимальное время преобразования — 1 мкс.

Вся аппаратура выполнена в стандарте КАМАК.

## 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Функциональная программа спектрометра написана на языке ФОРТРАН-77 (MS.v.5.0) и содержит подпрограммы управления линейкой и АЦП, написанные на АССЕМБЛЕРЕ. Восстановление спектра по интерферограмме осуществлялось с помощью подпрограммы быстрого преобразования Фурье, написанной Р.Синглтоном (R.Singleton, Stanford, 1968 г.) В целом программа позволяет выполнение следующих основных операций.

1. Управление режимами работы электронных блоков (блок линейки, АЦП, контроллер).
2. Считывание и запоминание интерферограммы.
3. Предварительная обработка массива данных (сглаживание, вычитание темного фона и т.п.).
4. Восстановление спектра по интерферограмме при помощи быстрого преобразования Фурье.
5. Нормировка спектра, учитывающая спектральную зависимость чувствительности линейки и коэффициента отражение светоделителя.
6. Отображение графической и функциональной информации на на экране дисплея.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки работоспособности и тестирования прибора выполнен ряд измерений различных спектров. Ниже для примера приводятся результаты измерения линейчатого спектра излучения ртутной лампы ДРШ-250.

На рис.4 показана интерферограмма зеленой линии ртути,



выделенной интерференционным фильтром ( $\Delta\sigma = 170 \text{ см}^{-1}$ ), полученная при спектральном разрешении  $\delta\sigma \approx 100 \text{ см}^{-1}$  (соответствующее смещение подвижного зеркала  $L \approx 1,2 \text{ мм}$ ). На рис.5. представлен спектр, восстановленный по этой интерферограмме. Значительный уровень шума в низкочастотной области возникает здесь из-за постоянной составляющей в интерферограмме, а также вследствие ее слабой низкочастотной флуктуации (см. рис.4).

Шум можно существенно снизить методом вычитания, применяемым в работе [5]. Суть его заключается в следующем. Регистрируется интерферограмма при некотором начальном значении смещения зеркала  $L$  и запоминается в памяти ЭВМ. Затем в память ЭВМ считывается еще одна интерферограмма при другом, не сильно отличающемся от предыдущего значении,  $L$ . После этого программным образом определяется разность этих массивов.

Пример интерферограммы, полученной таким методом, показан на рис.6. Разность положений зеркала  $\Delta L$  при этом составляла 10 мкм. Разрешение здесь такое же, как и в предыдущем случае,  $\delta\sigma \approx 100 \text{ см}^{-1}$ . Видно, что постоянная составляющая на разностной интерферограмме полностью отсутствует. Восстановленный по этой интерферограмме спектр показан на рис.7. Шумы здесь на порядок ниже, чем на рис.5, и обусловлены, вероятно, шумами регистрирующей системы.

Кроме того, применение разностного метода позволяет исключить операцию удаления темного фона.

Обзорный спектр ртутной лампы восстановленный по методу разностной интерферограммы показан на рис.8. Здесь приведен формальный спектральный диапазон от 70 до 35000  $\text{см}^{-1}$ , определяемый выбранным спектральным разрешением ( $\delta\sigma \approx 70 \text{ см}^{-1}$ ) и числом точек в спектре. Реальный же спектральный диапазон прибора определяется в основном чувствительностью фотодиодной линейки, что проявляется в распределении относительной интенсивности в приведенном спектре.

Таким образом, тестовые эксперименты показали удовлетворительную работоспособность спектрометра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают, что статический фурье-спектрометр удовлетворительно работает в видимом и ближнем ИК диапазонах, даже в случае низкой разрешающей силы. Тем не менее данное сообщение следует рассматривать скорее как указание на направление исследований по созданию конкурентоспособного прибора данного типа. При этом следует решить следующие проблемы: (i) существенно повысить спектральное разрешение; (ii) определить условия повышения контрастности интерферограммы от протяженного источника и связанное с этим допустимое значение предельной светосилы; (iii) расширить спектральный интервал; (iiii) сделать прибор более компактным.

Решение практически всех указанных проблем зависит от возможностей позиционно-чувствительных детекторов. Так, например, легко повысить разрешение спектрометра путем простого увеличения числа элементов позиционно-чувствительного детектора, однако при этом необходимо иметь в виду, что компактность прибора обратно пропорциональна общей длине детектора.

Таким образом, проблема конкурентоспособности статического фурье-спектрометра перемещается из области прикладной оптики в область интегральной микроволновой электроники. Надеемся, что данное сообщение явится дополнительным стимулом при решении этой проблемы.

Необходимо отметить роль Л.Н.Вячеславова (ИЯФ СО РАН), обратившего внимание авторов на работы по статической фурье-спектроскопии и инициировавшего настоящую работу. Кроме того, мы признательны Л.В.Анкудинову (ИЯФ СО РАН) за выполнение основных механических работ, А.Н.Путьмакову (ИЯФ СО РАН) за предоставленные контроллер КО607 и интерфейс ППИ-4, А.Н.Кузнецову (ИЯФ СО РАН) за участие в разработке и настройку блока ЛФ., коллективу лаборатории физической оптики НГУ, где в основном была выполнена работа, за помощь и содействие в работе.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Michelson A.A. //Phil.Mag. 1891. 31. P. 388.
2. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. - М.: Изд-во МГУ, 1986.
3. Гиль С.В., Егорова Л.В., Лещева И.Е., Строганова А.Ю. //ОМП. 1988. Вып.1. С.10-14; Егорова Л.В., Лещева И.Е., Попов Б.М., Строганова А.Ю. //ОМП. 1989. Вып.4. С.27,28.
4. Okamoto T., Kawata S., Minami S. //Appl.Opt. 1984. V.23. P.269-275.
5. Sweedler J.V., Denton M.V. //Appl.Spectroscopy. 1989. V.43. P.1378-1384.
6. Caulfield H.J. Spectroscopy. //Handbook of Optical Holography (H.J. Caulfield ed.). New York: Academic Press, 1979.
7. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.: Мир, 1973.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1970.
9. Белл Р.Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. - М.: Мир, 1975.
10. Путьмаков А.Н. Последовательно-параллельный интерфейс и контроллеры крейта КАМАК. Новосибирск; 1992. - (Препр./СО РАН. Ин-т ядерной физики; (в печати)).
11. Батраков А.М. Козак В.Р. Регистраторы формы импульсных сигналов серии S. АЦП-101S. Новосибирск; 1985. - (Препр./СО РАН. Ин-т ядерной физики; 85-91).

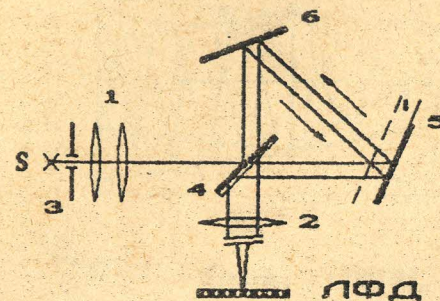


Рис.1. Статический Фурье-спектрометр. S — источник, 1,2 — входной и выходной объективы, 3 — диафрагма, 4 — светоделитель, 5,6 — зеркала, ЛФД — линейка фотодиодов.

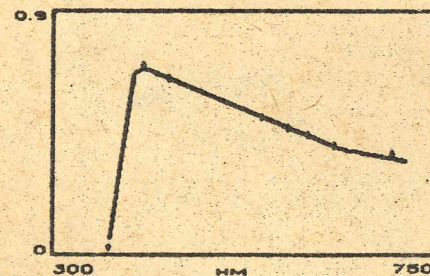


Рис.2. Зависимость коэффициента пропускания светоделителя от длины волны.



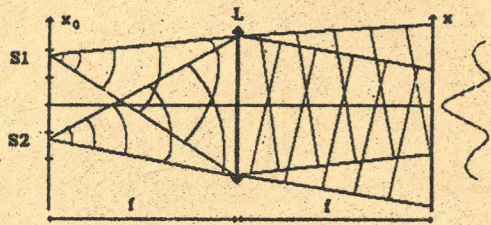


Рис. 3. Эквивалентная оптическая схема статического фурье-спектрометра. S1, S2 — протяженные источники, L — линза, f — ее фокусное расстояние,  $x_0, x$  — оси координат.

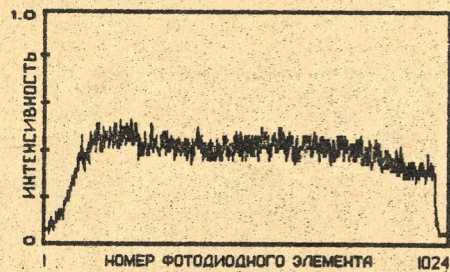


Рис. 4. Интерферограмма зеленой линии ртутной лампы (546 нм).

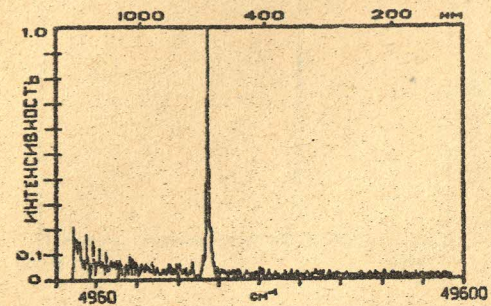


Рис. 5. Спектр восстановленный по интерферограмме на рис. 4.

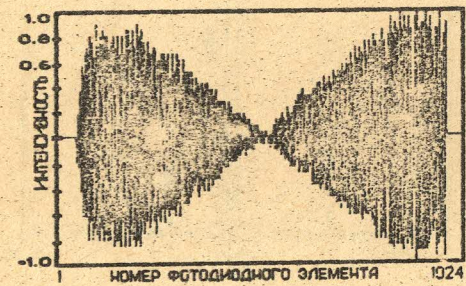


Рис. 6. Разностная интерферограмма зеленой линии ртутной лампы.



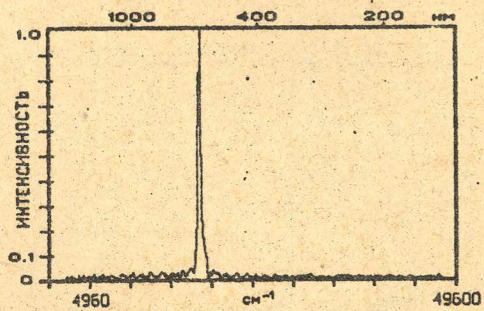


Рис.7. Спектр, восстановленный по интерферограмме на рис.6.

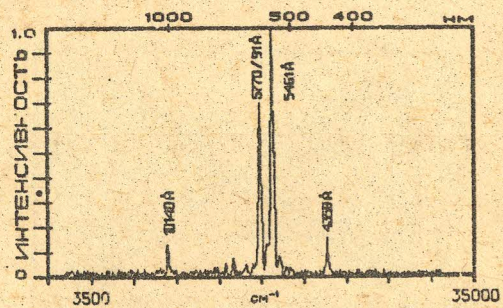


Рис.8. Полный спектр излучения ртутной лампы ДРШ-250.