

изменения конструкции электронного блока контроллер. Новая модификация блока делается на основе стандартных выпускаемых серийно блоках питания лазера, стабилизации температуры, АЦП, ЦАП. Модификация контроллера упрощает запуск прибора для серийного производства и позволит улучшить ряд технических характеристик, наиболее существенно — уменьшение времени обработки и передачи данных до 1 с;

изменение программной оболочки. Программа делается на основе стандартной программы Lab View под Windows. Цели — более совершенная и удобная программа с возможностью оперативного внесения изменений по мере развития прибора.

MEDICAL GAS ANALYSER ON LASERS AND PHOTODETECTORS FOR NEAR IR-RANGE

*A. D. Britov, A. I. Nadezhdinskii, A. G. Berezin, A. S. Kononov,
N. A. Suleimanov, O. V. Ershov, V. G. Kutnyak*
The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

An uncooled variant of a high-sensitive laser spectroscopic gas analyser is developed. Analytic lines based on combination pound frequencies are used for gas detection. Photodetectors and laser diodes for near 1,7 μm IR-range were used. Application of this device in medicine (making early diagnosis of internal organs diseases) is the most perspective one.

УДК 681.785

НОВЫЕ СХЕМЫ СПЕКТРОМЕТРОВ

В. Л. Бакуменко, А. Н. Свиридов

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение "Орион"», Москва, Россия

Обсуждаются схемы двумерных спектрометров, использующие абсорбцию света, явление нарушения полного внутреннего отражения и механизмы управления спектральной чувствительностью фотоприемников. Подобно тому, как это производится в интерференционных спектрометрах, спектр анализируемого излучения в рассматриваемых приборах получается в результате обработки сигнала на их выходе средствами вычислительной техники.

Наиболее распространенными средствами спектрального анализа электромагнитного излучения оптического диапазона являются дисперсионные и дифракционные спектрометры. Их работа основана на разложении спектра вдоль одной пространственной координаты, в силу чего для анализа может быть использована только малая часть светового пучка, выделяемого узкой щелью, располагающейся на входе приборов. Принципиальный недостаток спектрометров такого класса (их называют "одномерными" [1]) очевиден: большие потери света и, следовательно, малая чувствительность. В этом отношении безусловным преимуществом обладают "двухмерные" спектрометры, т. е. такие, в которых для анализа используется весь световой пучок, попадающий на вход прибора. К двумерным спектрометрам относятся Фурье-спектрометры, получившие

большое распространение в последние десятилетия (не в последнюю очередь, благодаря развитию вычислительной техники). Цель настоящей работы — обратить внимание на некоторые новые возможные варианты схем двухмерных спектрометров, которые, насколько нам известно, в литературе еще не обсуждались.

Основой Фурье-спектрометра служит интерферометр (например, интерферометр Майкельсона). Световой поток со спектральным составом $f(\lambda)$, поданный на вход интерферометра, на его выходе имеет интенсивность

$$F(p) \sim \int_0^{\infty} f(\lambda) \cos\left(\frac{2\pi p}{\lambda}\right) d\lambda, \quad (1)$$

где p — разность хода лучей в плечах интерферометра. Регистрируемый фотоприемником сигнал на выходе Фурье-спектрометра

$$I(p) \sim \int_0^{\infty} i(\lambda) \cos\left(\frac{2\pi p}{\lambda}\right) d\lambda, \quad (2)$$

где $i(\lambda) = f(\lambda)s(\lambda)$; (3)

$s(\lambda)$ — спектральная чувствительность фотоприемника.

Формально математически формулы (1) и (2) определяют коэффициенты Фурье-преобразований, соответственно, функций $f(\lambda)$ и $i(\lambda)$ [2]. Спектральное распределение интенсивности анализируемого излучения $f(\lambda)$ находится по $I(p)$, измеряемым в достаточно широком интервале изменений p , путем обратного Фурье-преобразования:

$$f(\lambda) \sim \frac{\int_0^{p\infty} I(p) \cos\left(\frac{2\pi p}{\lambda}\right) dp}{s(\lambda)}, \quad (4)$$

которое выполняется в спектрометре средствами вычислительной техники. Современные Фурье-спектрометры имеют очень высокие характеристики по светосиле и разрешающей способности. Однако сложность их оптико-механического устройства (требование высокой точности исполнения и узлов конструкции и настройки) делает эти приборы дорогими и непростыми в использовании. С этим можно мириться, когда речь идет о применении их в практике научных лабораторий, но эти недостатки становятся существенными, если иметь в виду задачи экологического мониторинга и использования в контрольно-измерительных системах, где важны тиражирование устройств и простота их эксплуатации. Поиск новых принципов и схем построения светосильных и недорогих спектральных приборов таким образом еще остается актуальным.

Прежде чем перейти к обсуждению предлагаемых нами новых схем спектрометров, нам кажется необходимым изложить общую концепцию, которая положена в их основу. Формально, обозначая

$$s(\lambda) \cos\left(\frac{2\pi p}{\lambda}\right) = T(p, \lambda), \quad (5)$$

формулу (2) можно переписать в виде:

$$I(p) \sim \int_0^{\infty} T(p, \lambda) f(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

В случае произвольной (но заданной) функции $T(p, \lambda)$ формула (6) представляет собой интегральное уравнение Фредгольма первого рода относительно $f(X)$.

При этом ядро уравнения $T(p, \lambda)$ можно рассматривать как оператор, преобразующий функцию $f(\lambda)$ в $I(p)$ и зависящий от параметра p . Уравнение Фредгольма первого рода имеет точное решение для интегралов Фурье (т. е. когда $T(p, \lambda)$ имеет вид типа (5)) и некоторых тривиальных случаев. Например, если

$$T(p, \lambda) = \delta(\lambda_p - \lambda),$$

где λ_p — однозначная функция параметра p , то $I(p) \sim f(\lambda_p)$.

Этот случай в интересующем нас аспекте соответствует спектральному анализу в дисперсионных приборах (при этом p соответствует углу отклонения пучка, а λ_p выражается через уравнение угловой дисперсии призмы спектрометра). К этому же случаю сводится и работа дифракционных спектральных приборов, в которых однозначность зависимости λ_p от p достигается использованием светофильтров для выделения интерференционных порядков. В общем случае решение уравнений Фредгольма первого рода относится в математике к классу некорректно поставленных задач, практическое решение которых стало возможным сравнительно недавно благодаря развитию вычислительной техники и разработке соответствующих алгоритмов. Обзор методов решения некорректно поставленных задач и примеры их применения к некоторым физическим приложениям можно найти, например, в [4]. Из сказанного следует, во-первых, что существующие способы спектрального анализа оптического излучения (дисперсионные, дифракционные и интерференционные) соответствуют точным решениям уравнений (6), во-вторых, конкретный вид оператора $T(p, \lambda)$, преобразующего $f(\lambda)$, не ограничивает сейчас принципиальных и технических возможностей решения этих уравнений (по крайней мере, численного) и, таким образом, возможно использование для целей спектрального анализа более широкого круга физических явлений. Рассмотрим далее некоторые варианты.

Вариант абсорбционной спектрометрии

При прохождении светового пучка, имеющего спектральное распределение интенсивности $f(\lambda)$, путь p в среде с показателем поглощения $\alpha(\lambda)$, его интенсивность меняется как

$$F(p) \sim \int_0^{\infty} f(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)p) d\lambda.$$

При этом сигнал фотоприемника, регистрирующего прошедший через среду свет, описывается как

$$I(p) \sim \int_0^{\infty} f(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)p) s(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

где $s(\lambda)$, как и раньше — спектральная чувствительность фотоприемника.

В (7) оператором, преобразующим спектр $f(\lambda)$, является

$$T(p, \lambda) = \exp(-\alpha(\lambda)p) s(\lambda). \quad (8)$$

Рис. 1 иллюстрирует одну из возможных схем абсорбционного спектрометра. Активным элементом схемы является пара оптических клиньев 2, изготовленных из материала, спектральная характеристика показателя поглощения которого определяет рабочую спектральную область прибора. Перемещение клиньев одного относительно другого позволяет плавно изменять p , путь пучка света в поглощающей среде. Фотоприемник 4 регистрирует прошедший через клинья

свет, и его сигнал поступает в блок регистрации и обработки, который выполняет вычислительные операции, необходимые для восстановления спектрального состава анализируемого излучения.

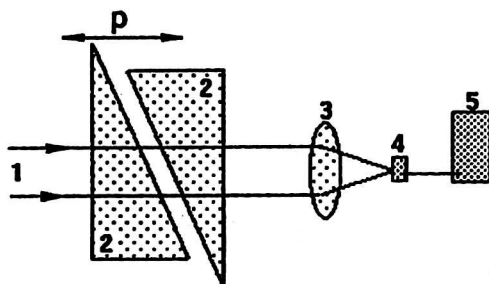


Рис. 1. Принципиальная схема абсорбционного спектрометра:

1 — анализируемый световой поток; 2 — оптические клинья из материала с известной спектральной характеристикой поглощения; 3 — линза; 4 — фотоприемник; 5 — блок регистрации и обработки сигнала фотоприемника

Вариант с использованием явления нарушения полного внутреннего отражения

При падении светового пучка на границу между двумя средами под углом ψ происходит его полное отражение при условии, что свет падает со стороны более оптически плотной среды, и $\psi \geq \psi_{\text{пво}}$, где $\psi_{\text{пво}} = \arcsin(n_2/n_1)$ — угол полного внутреннего отражения (n_1 и n_2 — показатели преломления более и менее оптически плотных сред, соответственно). В структуре (более плотная среда)/(менее плотная среда)/(более плотная среда), такой, например, какая показана на рис. 2, полное внутреннее отражение происходит только тех спектральных компонент светового пучка, для которых выполняется условие $\lambda \ll p$ (p — расстояние между границами раздела сред). Компоненты, для которых справедливо обратное соотношение между длиной волны и зазором p , проходят во вторую плотную среду. В общем случае пропускание двух призм описывается для неполяризованного света формулой [5]:

$$T_c(p, \lambda) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + \frac{(n^2 - 1)^2 (n^2 \sin^2 \psi - \cos^2 \psi)^2}{16n^2 \cos^2 \psi (n^2 \sin^2 \psi - 1)}} \left(e^{-2\pi \frac{p}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \psi - 1}} - e^{2\pi \frac{p}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \psi - 1}} \right)^2 + \frac{1}{1 + \frac{(n^2 - 1)^2}{16n^2 \cos^2 \psi (n^2 \sin^2 \psi - 1)}} \left(e^{-2\pi \frac{p}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \psi - 1}} - e^{2\pi \frac{p}{\lambda} \sqrt{n^2 \sin^2 \psi - 1}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

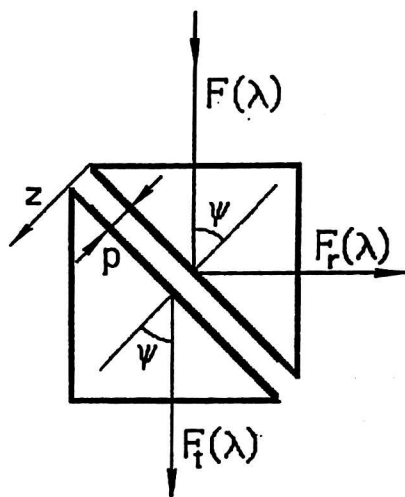


Рис. 2. Нарушение полного внутреннего отражения при сближении двух призм: $F(\lambda)$ — падающий пучок света, $F_r(\lambda)$ — отраженный и $F_t(\lambda)$ — пучок света, прошедший через вторую призму; Ψ — угол падения, равный или больший угла полного внутреннего отражения, ρ — расстояние между призмами

На рис. 3 показан пример зависимости пропускания от длины волны, приведенной к ширине воздушного зазора между призмами, изготовленными из материала с показателем преломления $n = 4$, при угле падения света $\Psi = 15$ град. Сигнал с фотоприемника, регистрирующего прошедший через обе призмы свет, при этом следует формуле:

$$I(\rho) = \int_0^{\infty} s(\lambda) T_e(\rho, \lambda) F(\lambda) d\lambda. \quad (10)$$

$T_e(\rho, \lambda)$

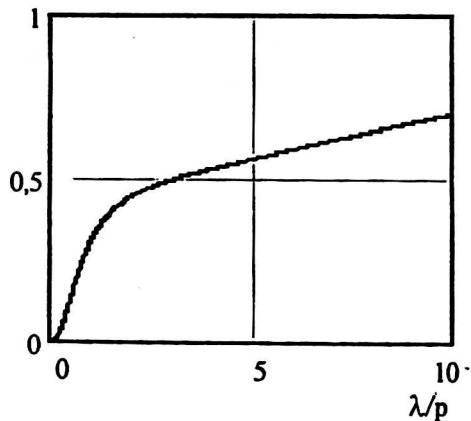


Рис. 3. Зависимость пропускания неполяризованного света при нарушении полного внутреннего отражения от приведенной длины волны

В этой схеме преобразующая спектр функция соответствует

$$T(\rho, \lambda) = s(\lambda) T_e(\rho, \lambda). \quad (11)$$

В спектрометре, использующем нарушение полного внутреннего отражения (рис. 4), регистрируется сигнал с фотоприемника при изменяющемся расстоянии ρ между призмами и затем производится численный расчет спектрального состава анализируемого излучения. Для спектрального анализа также может быть использована схема, в которой регистрируется свет, отраженный при нарушении условий полного внутреннего отражения.

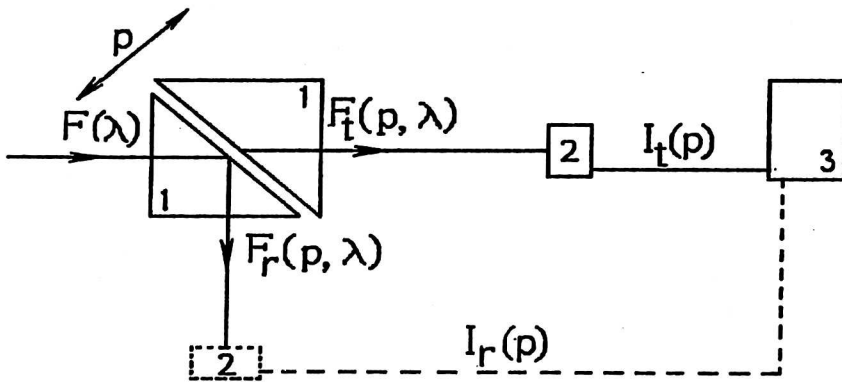


Рис. 4. Схема спектрометра, использующего нарушение полного внутреннего отражения: 1 — призмы полного внутреннего отражения; 2 — фотоприемник; 3 — блок регистрации и обработки (пунктиром показан вариант схемы с регистрацией отраженного пучка света)

Вариант с фотоприемником как активным элементом спектрометра

Некоторые фотоприемники (например, полупроводниковые фотодиоды и фоторезисторы) могут служить одновременно и анализаторами, и регистраторами света, меняя спектральную характеристику с изменением размера их активной области вдоль распространения света. В фотодиодах это может достигаться управлением толщиной области собирания носителей заряда, рождаемых при поглощении света, путем приложения изменяемого внешнего напряжения смещения; в линейке фоторезисторов с продольной геометрией — путем последовательного считывания сигнала с элементов, располагающихся на разном расстоянии от грани, через которую свет проходит в фотоприемник. Эти случаи уже обсуждались одним из авторов ранее [6]. В определенной степени их можно отнести к разновидности абсорбционного варианта. Еще один тип фотоприемника, допускающий контролируемое управление спектральной характеристикой чувствительности — фотоприемник на основе гетероструктуры металл / полупроводник / металл с внутриэмиссионным механизмом работы. В статье [7] приведены характеристики такого прибора на основе структуры Pt/Si/ErSi_{1,7}. Изменением внешнего напряжения смещения на фотоприемнике менее чем на 1 В можно сдвигать "красную" границу его спектральной чувствительности с 1,4 до 5 мкм. На рис. 5 показана взятая из работы [7] спектральная характеристика фототока этого фотоприемника.

Для спектрометров такого типа

$$T(p, \lambda) = s(p, \lambda), \tag{12}$$

где p — управляющее напряжение.

Схема спектрометра с фотоприемником в качестве активного элемента особенно проста и не содержит никаких движущихся узлов (рис. 6).

Во всех вариантах спектрометр содержит активный элемент, преобразующий анализируемое излучение по известному закону $T(p, \lambda)$, и блок обработки (компьютерный блок), восстанавливающий спектр излучения по сигналу фото-

приемника и заданному $T(p, \lambda)$ путем численного решения уравнения типа (6). $T(p, \lambda)$ выражается через те или иные физические характеристики (спектральные характеристики показателей поглощения и преломления, чувствительности фотоприемника и т. п.), аналитическое описание которых в реальных случаях — неудовлетворительно и которые, если известны, то — в табличном виде. Кроме того, практически $T(p, \lambda)$ проще и надежнее определить экспериментально, подавая на спектрометр монохроматическое излучение с разными длинами волн и регистрируя соответствующий сигнал фотоприемника при разных значениях параметра p . Поэтому в (6) удобнее перейти от интегральной формы к суммированию. Тогда восстановление спектра анализируемого излучения сводится к решению относительно f_λ системы алгебраических линейных уравнений:

$$I_p = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_N} T_{p,\lambda} f_\lambda \quad \text{при } p = p_1, p_2, p_3, \dots, p_N. \quad (6')$$

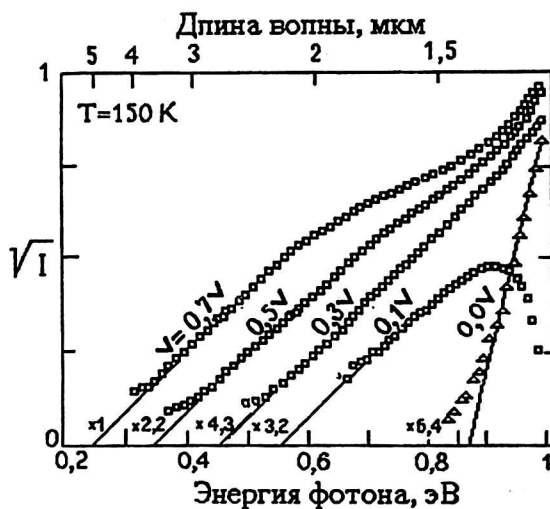


Рис. 5. Спектральная характеристика фототока I фотоприемника на основе гетероструктуры Pt/Si/ErSi_{1,7}. [7] (на графике указаны напряжения смещения)

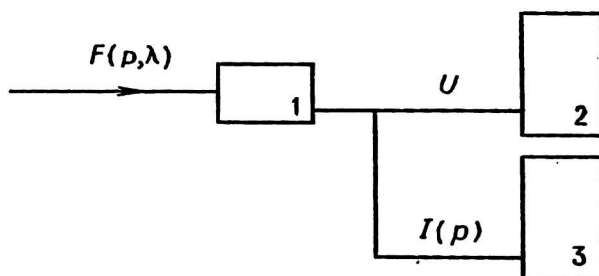


Рис. 6. Схема спектрометра с фотоприемником как активным элементом: 1 — фотоприемник; 2 — блок смещения; 3 — блок регистрации и обработки

Калибровка прибора состоит в определении коэффициентов $T_{p\lambda}$.

Л и т е р а т у р а

1. Малышев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию. — М.: Наука, 1979. — 480 с.
2. Харкевич А. А. Спектры и анализ. — М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1962. — 236 с.
3. Светосильные спектральные приборы: Кн./Под ред. К. И. Тарасова.— М.: Наука, 1988. — 420 с.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1974. — 224 с.
5. Harrick N. J., Carlson A. I. Internal reflection spectroscopy: validity of effective thickness equations// Applied Optics, 1971, № 10(1). P. 19—23.
6. Бакуменко В. Л. Полупроводниковые фотоприемники как анализаторы спектрального состава излучения//Науч.-техн. сб. Вопросы оборонной техники, 1996. Сер. 11. Вып. 3(150), 4(151). С. 26—28.
7. Pahun L., Campidelli Y., Arnaud d'Avitaya F., Bodoz P. A. Infrared response of Pt/Si/ErSi_{1,7} heterostructure: Tuneble internal photoemission sensor// Appl. Phys. Lett., 1992, № 60 (10). P. 1166—1168.

THE NEW SCHEMES OF SPECTROMETERS

V. L. Bakumenko, A. N. Sviridov

The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

The schemes of spectrometers, using absorption of light, phenomenon of infringement of complete internal reflection and mechanisms of management by spectral sensitivity of photodetectors, are discussed. Just as it is made in interferencial spectrometers, the spectrum of analysed radiation in considered devices turns out in result of processing of a signal on their output by means of computer technology.