

УДК 543.42

УВЕЛИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫХ СПЕКТРОГРАММ

Зейликович И. С., Пулькин С. А., Ануфрик С. С., Кукушкин В. Г.

Рассматриваются методы апостериорной обработки спектрограмм, позволяющие более чем на три порядка повысить чувствительность измерений Nfl . Спектрограмма представляет собой транспарант с периодическим амплитудным пропусканием. Предложено два метода увеличения чувствительности измерений: за счет использования высших порядков дифракции и за счет многократной перестемки исходной спектрограммы. Для регистрации спектрограмм используется лазер на красителе с резонатором Майкельсона, в одно из плеч которого помещается кювета с парами натрия. За счет аномальной дисперсии вблизи линии поглощения происходит сбегание линий генерации, что может быть обнаружено при апостериорной обработке. Предложенные методы позволяют получать интерференционные «крюки» и надежно регистрировать $Nfl \sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Знание точных значений сил осцилляторов необходимо для многих областей теоретической и экспериментальной физики, таких как теоретическая спектроскопия, атомная спектроскопия, физика плазмы, астрофизика и др. известные методы измерения сил осцилляторов (метод «крюков» Рождественского, метод сбегания интерференционных полос Фриша) являются очень точными, но обладают малой чувствительностью. Так, нижний предел для традиционных интерферометрических методов составляет для $(Nfl)_{\min} \sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$. В последние годы появились работы, в которых для получения интерференционной картины используются лазеры [1]. В работе [2] предложен внутрирезонаторный метод определения Nfl по сбеганию полос генерации к линии поглощения. За счет конкуренции мод происходит сужение линий генерации с ростом времени генерации. Это может быть использовано для увеличения точности измерений Nfl .

В настоящей работе рассматривается новый метод апостериорной обработки спектрограмм, позволяющий на три порядка повысить чувствительность измерений Nfl .

Для регистрации спектрограмм используется лазер на красителе со связанным резонатором Майкельсона и поглощающей кюветой с парами натрия в одном из плеч. Распределение интенсивности интегрального спектра излучения в приемной плоскости спектрографа определится выражением

$$I(x) = A \left\{ \cos^2 \left[\frac{\pi x}{P_0} + \frac{2\pi}{\lambda} [n(\lambda) - n_n] l_n \right] \right\}^{\left(\frac{\mu c T_{\text{ген}}}{2L} + 1 \right)}, \quad (1)$$

где x — текущая линейная координата спектральных линий вдоль дисперсии спектрографа, P_0 — период спектральных полос пустого резонатора в приемной плоскости спектрографа, λ — длина волны генерации, $n(\lambda)$ — дисперсионный показатель преломления среды в кювете, $\mu c T_{\text{ген}} / 2L$ число двойных проходов излучения в резонаторе (μ — коэффициент заполнения резонатора активной средой, $T_{\text{ген}}$ — время генерации, L — длина резонатора), l_n — длина кюветы с исследуемой средой, A — постоянный коэффициент. Первый член в скобках описывает периодическую структуру спектральных линий пустого резонатора в приемной плоскости спектрографа, второй учитывает изменение разности хода в ветвях интерферометра Майкельсона, обусловленной дисперсией показателя преломления $n(\lambda)$ вблизи линий поглощения исследуемой среды.

Для достаточно малого времени генерации $T_{\text{ген}} \ll 2L/\mu c$ распределение интенсивности в спектральных линиях определится выражением

$$I(x) = (A/2) \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p_0} + \frac{4\pi}{\lambda} [n(\lambda) - n_B] l_n \right] \right\}. \quad (2)$$

Если распределение интенсивности, описываемое выражением (2) зарегистрировано на фотопленку на линейном участке амплитудно-экспозиционной кривой фотоматериала, то амплитудное пропускание полученной спектрограммы $\tau_c(x) \sim I(x)$ и, следовательно,

$$\tau_c(x) \sim 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p_0} + \frac{4\pi [n(\lambda) - n_B] l_n}{\lambda} \right]. \quad (3)$$

Выражением (3) преобразуем к виду

$$\tau_c(x) \sim 1 + \cos [k_0 \alpha_0 x + \Delta \varphi(x)],$$

где $\alpha_0 = \lambda_0/p_0$, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, $\Delta \varphi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} 2 [n(\lambda) - n_B] l_n$, λ_0 — некоторая постоянная.

Амплитудное пропускание, описываемое выражением (3), совпадает по виду с амплитудным пропусканием голограммы некоторого теоретического фазового объекта, у которого вдоль оси x показатель преломления $n(x)$ меняется в соответствии с законом дисперсии $n(\lambda)$. Естественно, в эксперименте такого объекта создать невозможно. Однако проведенная аналогия оказывается полезной, поскольку позволяет применить методы, известные в голографической интерферометрии фазовых объектов для обработки спектрограмм. В этом случае в выражении (3) d_0 можно отождествить с углом голографирования, λ_0 считать длиной волны источника при регистрации голограммы, $\Delta \varphi(x)$ — изменение фазы, вносимое фазовым объектом в плоскую объектную волну.

При освещении спектрограммы плоской монохроматической волной с нее дифрагируют под углами $\pm \alpha_0$ две волны

$$\exp ik_0 [\alpha_0 x + \Delta \varphi(x)] \text{ и } \exp -ik_0 [\alpha_0 x + \Delta \varphi(x)]$$

с комплексно сопряженными фазами. Если каким-либо образом направить эти волны по одному направлению, то они образуют интерференционную картину с двукратно увеличенной чувствительностью.

Вследствие конкуренции мод в резонаторе используемого для записи спектрограмм лазера на красителе распределение интенсивности в спектральных полосах задается выражением (1).

Если спектрограмма зарегистрирована на линейном участке амплитудно-экспозиционной кривой фотоматериала, то амплитудное пропускание полученной спектрограммы $\tau_c \sim I(x)$

$$\tau_c \sim \{1 + \cos [k_0 \alpha_0 x + \Delta \varphi(x)]\}^k, \quad k = \mu c T_{\text{ген}} / 2L + 1. \quad (4)$$

Разложим выражение (4) в ряд по степеням $\cos \left[\frac{4\pi x}{p_0} + \Delta \varphi(x) \right]$

$$\begin{aligned} \tau_c \sim & 1 + a_1 \cos [k_0 \alpha_0 x + \Delta \varphi(x)] + a_2 \cos^2 [k_0 \alpha_0 x + \Delta \varphi(x)] + \dots \\ & \dots + a_n \cos^n [k_0 \alpha_0 x + \Delta \varphi(x)] + \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

где $a_1, a_2, \dots, a_n$ — постоянные коэффициенты. Выражение (5) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} \tau_c \sim & c_0 + c_1 \cos [k_0 \alpha_0 x + \Delta \varphi(x)] + c_2 \cos [2k_0 \alpha_0 x + 2\Delta \varphi(x)] + \dots \\ & \dots + c_n \cos [nk_0 \alpha_0 x + n\Delta \varphi(x)] + \dots, \end{aligned} \quad (6)$$

где $c_0, c_1, \dots, c_n$ — постоянные коэффициенты.

Амплитудное пропускание спектрограммы, описываемое выражением (6), совпадает по виду с амплитудным пропусканием нелинейно зарегистрированной голограммы фазового объекта, описанного выше. Таким образом, к полученной спектрограмме можно применить голографический метод повышения чувст-

вительности, основанный на увеличении фазового сдвига в высших порядках дифракции света на голограммах (спектрограммах) [3, 4]. Суть метода состоит в том, что при освещении спектрограммы плоской монохроматической волной в $\pm n$ порядка дифракции распространяются две волны

$$\exp i [nk_0 x_0 + n\Delta\varphi(x)] \text{ и } \exp -i [nk_0 x_0 + n\Delta\varphi(x)].$$

Если эти волны направить по одному направлению, получится интерференционная картина с $2n$ -кратным увеличением чувствительности.

В эксперименте для записи спектрограммы использовался лазер на красителе ЛЖИ-402 с ламповой накачкой. В этом лазере глухое зеркало заменялось связанным резонатором Майкельсона, в одно из плеч которого устанавливались поглощающая кювета с парами натрия. Излучение лазера с помощью цилиндрической линзы проецировалось в плоскость входной щели спектрографа (щель

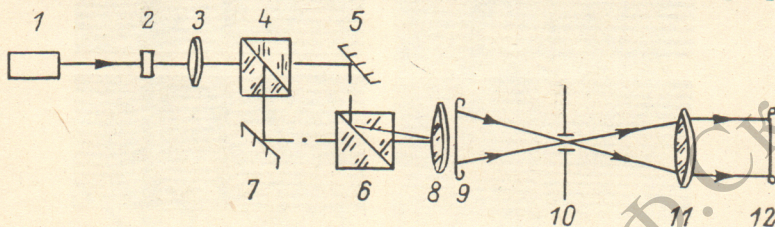


Рис. 1. Оптическая схема апостериорной обработки спектрограмм при использовании высших порядков дифракции.

полностью открыта). Спектрограмма регистрировалась в выходной плоскости спектрографа ДФС-13. Введением разности хода между плечами внутрирезонаторного интерферометра Майкельсона добивались частоты спектральных полос 5 ± 8 мкм/мм.

Оптическая схема установки для обработки спектрограмм приведена на рис. 1. Спектрограмма 9 освещается двумя плоскими волнами, распространяющимися под определенным углом друг к другу. Угол между пучками подбирается таким, чтобы в плоскость точечного фильтра 10 сходились $\pm n$ порядки дифракции света. В плоскости 12, оптически сопряженной объективом 11 с плоскостью спектрограммы 9, образуется интерференционная картина. Направление и ширина интерференционных полос регулируются разворотом светоделительного кубика 6. Для получения «крюков» Рождественского направление полос устанавливается под углом к линии поглощения исследуемой среды, и перемещением зеркала 5 вводится необходимая разность хода. Если сводится нулевой порядок дифракции одного пучка с 1-м порядком дифракции другого пучка, то получается интерферограмма без увеличения чувствительности. При сведении $\pm n$ порядка дифракции другого пучка получается интерферограмма с $2n$ -кратным увеличением чувствительности.

На рис. 2 приведены фотографии интерферограмм, полученных при использовании внутрирезонаторной спектрограммы паров натрия. Вблизи линий поглощения $\lambda = 5890$ и $5896 \text{ \AA}$ при настройке интерференционных полос перпендикулярно линиям поглощения. Отчетливо видны кривые, вычерчивающие в определенном масштабе зависимость $(n(\lambda) - n_0)$ от λ , т. е. кривую дисперсии. Интерферограммы, приведенные на рис. 2, получены: *b* — при интерференции ± 1 -го и ± 1 -го порядков дифракции; *c* — при интерференции нулевого и 1-го порядков дифракции; *d*, *e* — при интерференции ± 1 -х порядков дифракции; *f* — при интерференции ± 2 -х порядков дифракции; *a* — исходная спектрограмма. Изгиб полос на интерферограммах *e* и *f* соответственно в 2 и 4 раза больше, чем на интерферограмме *c*. При определенном угле наклона интерференционных полос к линии поглощения образуются «крюки» Рождественского с увеличением чувствительности (рис. 2, *d*).

Для получения большего коэффициента увеличения чувствительности целесообразно применить способ, предложенный в работе [5] для обработки голограмм. Суть его заключается в последовательной перезаписи спектрограмм

(или голограмм) при использовании ± 1 -х порядков дифракции спектрограммы. После N -кратного числа актов перезаписи спектрограмм ± 1 -е порядки дифракции полученной спектрограммы направляют по одному пути, и они образуют интерференционную картину с коэффициентом увеличения чувствительности 2^{N+1} .

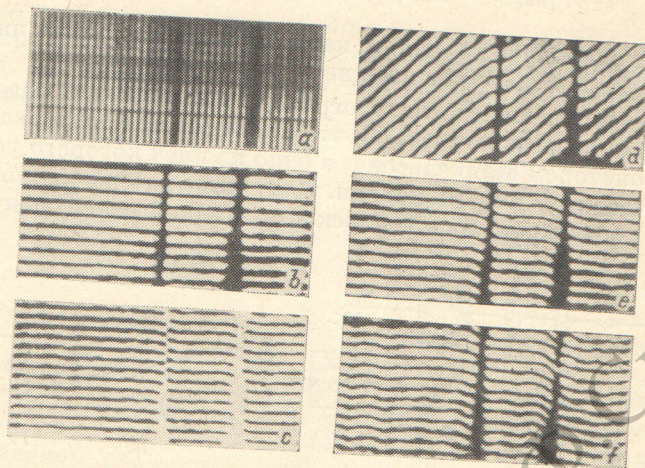


Рис. 2. Фотографии интерференционных картин, полученных при апостериорной обработке спектрограмм паров натрия с использованием высших порядков дифракции.

Этот апостериорный метод получения интерференционных картин увеличенной чувствительности был применен для обработки внутрирезонаторной спектрограммы паров натрия, методика получения которой описана выше. Первые два акта пересъемки спектрограмм осуществлялись по схеме, приведенной в работе [5]. Спектрограмма освещалась плоской волной света от гелий-неонового лазера. Вплотную к спектрограмме размещался фокусиру-

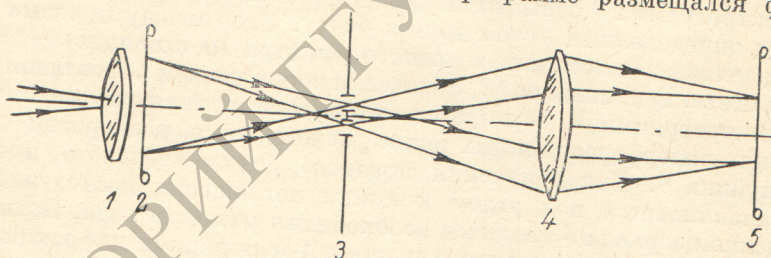


Рис. 3. Оптическая схема пересъемки спектрограмм.

ющий объектив. В фокальной плоскости этого объектива размещался экран с двумя точечными отверстиями, пропускающими ± 1 -е порядки дифракции света на спектрограмме. За диафрагмой размещался второй объектив, оптически сопрягающий плоскость исходной спектрограммы с плоскостью вторичной спектрограммы. После двух пересъемок описанная схема была изменена, поскольку угол дифракции существенно увеличился, и ± 1 -е порядки дифракции виньетируются вторым объективом. Спектрограмма уже освещалась двумя плоскими пучками, распространяющимися под определенным углом друг к другу (рис. 3). Угол между освещающими спектрограмму пучками выбирался таким, чтобы ± 1 -й порядок дифракции одного пучка проходил через одно отверстие экрана 3 (рис. 3), а ± 1 -й порядок дифракции другого пучка — через другое отверстие экрана. В плоскости фотопленки 5 пучки интерферируют и образуют новую спектрограмму с увеличенной чувствительностью. При обработке спектрограммы паров натрия с $(Nfl) \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ было проведено 7 последовательных пересъемок исходной спектрограммы. С последней спектрограммы совмещением ± 1 -х порядков дифракции были получены интерференционные «крюки» с коэффициентом увеличения чувствительности $512\times$. С учетом двукратного увеличения

чувствительности, обусловленной интерферометром Майкельсона, был получен коэффициент $1024\times$.

На рис. 4 приведены интерференционные «крюки», полученные при апостериорной обработке спектрограммы паров натрия. *a* соответствует $4\times$ увеличению чувствительности. *b* — $32\times$, *c* — $64\times$, *d* — $128\times$, *e* — $1024\times$.

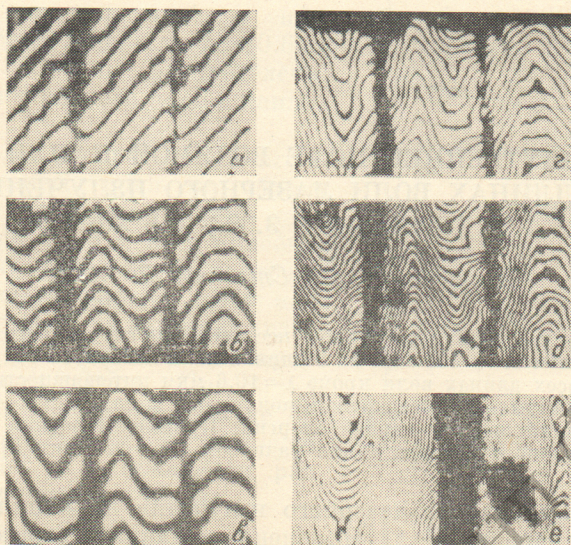


Рис. 4. Фотографии интерференционных картин, полученных с помощью метода пересъемки спектрограмм паров натрия.

Как видно из фотографии (рис. 4), с ростом коэффициента увеличения чувствительности возрастают искажения интерференционных полос. Эти искажения связаны с зернистостью, и, следовательно, разрешающей способностью фотоматериалов, используемых для регистрации исходной и вторичных спектрограмм. Именно этот фактор ограничивает коэффициент увеличения чувствительности.

Следует отметить, что метод апостериорной обработки спектрограмм при использовании высших порядков дифракции позволяет быстро обработать спектрограмму и получить первичную информацию, однако обладает гораздо меньшими возможностями увеличения чувствительности, чем метод последовательной пересъемки спектрограмм.

В заключение выражаем признательность А. П. Володенкову и Л. С. Гайде за помощь при проведении экспериментов.

Литература

- [1] Duvall A. B., McIntosh J. Phys. D., 1980, v. 13, p. 1617.
- [2] Кукучкин В. Г., Пулькин С. А. III Всесоюз. конф. «Лазеры на основе сложных органических соединений и их применение». Ужгород, 1980.
- [3] Brungdahl O., Lohmann A. JOSA, 1968, v. 58, p. 141.
- [4] Мустафин К. С., Селезнев В. А., Штырков Е. И. А. с. № 272602. Оpubл. в Б. И., 1970, № 19.
- [5] Зейликович И. С. Опт. и спектр., 1980, т. 49, в. 2, с. 396.

Поступило в Редакцию 11 мая 1982 г.

чувствительности, обусловленной интерферометром Майкельсона, был получен коэффициент 1024×.

На рис. 4 приведены интерференционные «крюки», полученные при апостериорной обработке спектрограмм паров натрия. а соответствует 4× увеличению чувствительности. б — 32×, в — 64×, г — 128×, д — 256×, е — 1024×.

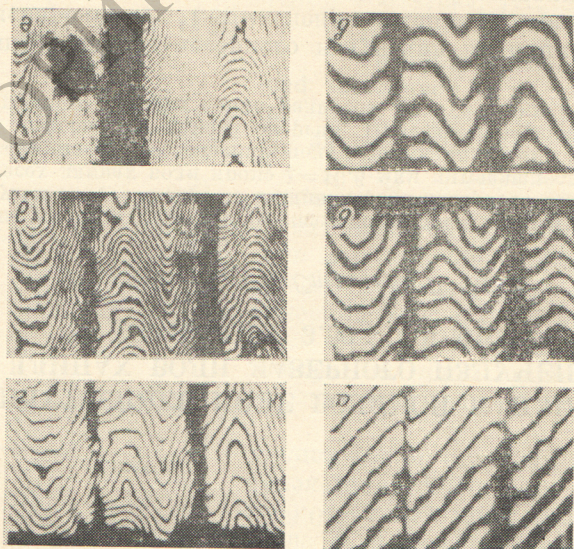


Рис. 4. Фотографии интерференционных картин, полученных с помощью метода пересъемки спектрограмм паров натрия.

Как видно из фотোগрафии (рис. 4), с ростом коэффициента увеличения чувствительности возрастают искажения интерференционных полос. Эти искажения связаны с зернистостью, и, следовательно, разрешающей способностью фотоматериалов, используемых для регистрации исходной и вторичных спектрограмм. Именно этот фактор ограничивает коэффициент увеличения чувствительности. Следует отметить, что метод апостериорной обработки спектрограмм при использовании высших порядков дифракции позволяет быстро обработать спектрограмму и получить первичную информацию, однако обладает гораздо меньшими возможностями увеличения чувствительности, чем метод последовательной пересъемки спектрограмм.

В заключение выражаем признательность А. П. Володженкову и Л. С. Тайде за помощь при проведении экспериментов.

Интерпретация

- [1] Дувацкая А. В., Мелитский В. Т., Пулякин С. А. III Всесоюз. конф. «Лазеры на основе сложных органических соединений и их применение», Ужгород, 1980.
- [2] Пулякин В. Т., Пулякин С. А. JOSA, 1968, v. 58, p. 141.
- [3] Мустафин Н. С., Селезнев В. А., Штырков Е. И. А. с. № 272602. Опубл. в Б. И., 1970, № 19.
- [5] Зейликович И. С. Опт. и спектр., 1980, т. 49, в. 2, с. 396.

Получено в Редакцию 11 мая 1982 г.