

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ВЕЩЕСТВА МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ОПОРНОЙ ВОЛНОЙ

А.В. Крайский

УДК 535.853.4

Измерена скорость изменения показателя преломления раствора с несинхронизированной по объему колебательной химической реакцией. Оценена возможность измерения производной показателя преломления по температуре и скорости изменения толщины слоя.

Определение производной показателя преломления предлагается проводить по измерению скорости изменения показателя преломления в схеме голографической записи модулированного лазерного излучения с нестационарной опорной волной [1-4]. В качестве сигнальной волны использовалось излучение гелий-неонового лазера (длина волны 632,8 нм), прошедшее через изучаемое вещество, и приобретшее вследствие изменения показателя преломления некоторую модуляцию. Поле лазерного излучения на выходе из кюветы с веществом можно в этом случае представить в виде

$$E = \epsilon_L(t) \epsilon(t), \quad (1)$$

где $\epsilon_L(t)$ — излучение лазера на входе в кювету, $\epsilon(t)$ — модулирующая функция. В том случае, когда в веществе показатель преломления меняется во времени, а поглощение не меняется, модулирующую функцию в (1) можно представить в виде

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \exp [i2\pi l n(t)/\lambda], \quad (2)$$

где λ — длина волны излучения, l — толщина слоя, $n(t)$ — показатель преломления среды.

Если нет изменения показателя преломления, то в спектре [3, 4] имеется одна линия, соответствующая нулевой частоте модуляции. При использовании критерия Рэлея разрешаемый спектральный интервал равен $1/T_p$, где T_p —

время регистрации. Если же поведение $n(t)$ таково, что за время регистрации необходимо учитывать только линейный член в разложении по степеням t , то спектр $\mathcal{E}(t)$ будет иметь вид монохроматической компоненты с частотой

$$\nu = (-l/\lambda) dn/dt. \quad (3)$$

Следовательно, измеряя смещение частоты, можно определить скорость изменения показателя преломления. Исходя из точности δ в определении смещения частоты, можно определить ту минимальную скорость, которую можно зарегистрировать

$$|dn/dt|_{\min} = \lambda\delta/l = \lambda a/lT_p, \quad (4)$$

где $a = \delta/\Delta\nu_R$, $\Delta\nu_R$ — разрешаемый по Рэлею спектральный интервал (очевидно, что a меньше единицы и определяется характеристиками аппаратуры). Из (4) видно, что можно зарегистрировать процесс, в котором изменение показателя преломления за время регистрации составляет

$$|\Delta n|_{\min} = \lambda a/l. \quad (5)$$

Если изменение показателя преломления вызвано изменением какого-либо параметра P во времени, то из (3) следует связь между частотным сдвигом, производной показателя преломления по изменяемому параметру и скоростью изменения параметра

$$|\partial n/\partial P| = -(\nu\lambda/l) (\partial P/\partial t)^{-1}. \quad (6)$$

При этом из (5) следует требование на минимальное изменение параметра ΔP , необходимое для регистрации данного $\partial n/\partial P$:

$$|\Delta P|_{\min} |\partial n/\partial P| \geq \lambda a/l. \quad (7)$$

Измерение скорости изменения показателя преломления проводилось в растворе, в котором колебательная химическая реакция (реакция Белоусова — Жаботинского) проходила без синхронизации колебаний по объему. Использовался известный состав [5], содержащий серную кислоту с молярной концентрацией 1,5М, лимонную кислоту — 0,27М, бромат калия — около 0,06М и около 0,001М сернокислого марганца. Рабочая длина кюветы — 50 мм. При реакции происходил переход ионов марганца из 2-х валентного состояния в 3-х валентное и обратно. Если проводилась синхронизация перемешиванием, то наблюдались периодические колебания оптических характеристик с периодом 222 с, что было видно как по слабому изменению пропускания кюветы, так и по спектру, получаемому с голограммы [4].

Без перемешивания раствор выглядел оптически однородным. Через некоторое время после запуска реакции в спектре наблюдалась одна узкая смещенная линия. Величина смещения составляла $1,7 \cdot 10^{-3}$ Гц и практически не менялась в течение 50 мин. Время экспозиции составляло 6 мин и 12 мин в различных экспериментах. Скорость изменения показателя преломления вычислялась по смещению частоты и составляла $dn/dt = -2,1 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$. За время регистрации 12 мин показатель преломления изменялся на величину $\Delta n = -1,5 \cdot 10^{-5}$. Величина a составляла 0,18, что при данной длине дает для минимально измеримого изменения показателя преломления $|\Delta n|_{\min} = 2,3 \cdot 10^{-6}$, а для минимальной скорости изменения показателя преломления $\sim 3 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$.

Исходя из этих величин можно оценить чувствительность установки к определению первой производной показателя преломления сред по каким-либо параметрам. Например, из (7) следует, что при толщине слоя 1 мм на подобной установке при диапазоне изменения температуры $\Delta T = 0,3 \text{ К}$ минимальное значение dn/dT , которое можно определить, составляет $4 \times 10^{-4} \text{ К}^{-1}$, в то время как для танталата лития $dn/dT = 7 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ (при $600 \text{ }^\circ\text{C}$), для танталата бария $-2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ (при $120 \text{ }^\circ\text{C}$) /6/. Для наблюдения смещения важно полное изменение температуры. Поэтому при скорости нагрева $0,05 \text{ К/с}$ достаточно экспозиции 6 с, а при скорости 10^{-4} К/с — 50 мин. При увеличении толщины слоя можно либо уменьшать требуемую величину изменения температуры ΔT , либо измерять меньшие значения производной (т.е. повышать чувствительность).

В выражении (2) существенным является изменение оптической длины пути света в веществе, которое может происходить вследствие различных причин. Например, из-за изменения толщин оптически более плотного вещества и менее плотного (при росте кристалла из раствора и т.п.). Другим примером может служить случай отражения света от границы раздела двух сред, которая перемещается. Во всех случаях в спектре излучения после его прохождения через вещество (в первом случае) или отражения (во втором) будут наблюдаться частотные сдвиги, по которым можно измерять величины, являющиеся причиной этих сдвигов.

Оценим чувствительность установки к измерению этих величин. Пусть в случае прохождения света изменение показателя преломления составляет Δn . Случай отражения можно свести к предыдущему, положив $\Delta n = -2n$, где n — показатель преломления среды, в которой происходит отражение света. Переменной величиной будет $l(t)$, где l — геометрическая толщина одного из веществ в случае прохождения или координата границы в случае

отражения. Тогда эти два случая будут одинаково описываться выражениями (3) – (5), в которых надо заменить l на Δn , Δn на Δl и dn/dt на d/dt .

В этом случае при изменении показателя преломления на 0,1 минимально измеряемое изменение толщины слоя будет составлять $1,1 \cdot 10^{-4}$ см, а минимальная измеримая скорость изменения толщины слоя при времени регистрации 12 мин – $1,6 \cdot 10^{-7}$ см/с. В случае же отражения эти величины составят $5,7 \cdot 10^{-6}$ см и $0,8 \cdot 10^{-8}$ см/с. Отметим, что предельное время регистрации установки было на порядок больше.

Этим же способом независимо от первой производной показателя преломления или скорости изменения толщины слоя можно определять и вторые производные показателя преломления или скорости изменения толщины слоя.

Поступила в редакцию 8 июля 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубов В.А., Крайский А.В., Кузнецова Т.И. Материалы III Всесоюзной школы по голографии, Л., Изд. ЛИЯФ, 1972, с. 277.
2. Зубов В.А. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 17 (1972).
3. Боркова В.Н., Зубов В.А., Крайский А.В. Труды ФИАН, 131, 68 (1982).
4. Боркова В.Н., Зубов В.А., Крайский А.В. Препринт ФИАН № 165, М., 1985.
5. Жаботинский А.М. Концентрационные автоколебания, М., Наука, 1974.
6. Акустические кристаллы. Под ред. Шаскольской М.П., М., Наука, 1982.