

УДК 621.373 : 535

## АПОСТЕРИОРНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЙ ЯЧЕЙКОЙ

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

На основе апостериорного метода обработки спектрограмм исследовано поведение показателя преломления атомов неона, находящихся во внутрирезонаторной поглощающей ячейке лазера на красителях. Показано, что спектральная концентрация излучения лазера на красителях (явление «захвата») обусловлена нелинейным ходом показателя преломления вблизи линии поглощения и нелинейной самофокусировкой излучения. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теорией нелинейной восприимчивости, даваемой обобщенной двухуровневой схемой.

Изучению явления спектральной концентрации излучения лазера на красителях вблизи линии поглощения атомов среды, помещенной в резонатор лазера на красителях (явление «захвата»), посвящено несколько работ [1-3]. Тем не менее до настоящего времени нет достаточных экспериментальных данных, способных объяснить природу и механизм данного явления. В работе [4] разработан апостериорный метод обработки голограмм с увеличением чувствительности интерференционных измерений, который позволяет получать ход дисперсионной кривой действительной части показателя преломления. В данной работе с помощью апостериорного метода обработки спектрограмм исследуется поведение показателя преломления атомов неона, находящихся во внутрирезонаторной поглощающей ячейке лазера на красителях.

Ход дисперсионной кривой показателя преломления получается при апостериорной обработке внутрирезонаторных спектрограмм. Для регистрации таких спектрограмм используется лазер на красителе ЛЖИ-402, глухое зеркало которого заменяется интерферометром Майкельсона. Поглощающая кювета длиной 20 см с неоном помещается в одно из плеч интерферометра [5]. Изучение лазера направляется в спектрограф ДФС-13 с обратной линейной дисперсией 4 Å/мм. Распределение интенсивности в выходной плоскости спектрографа для пустого резонатора представляет собой практически эквидистантные спектральные линии. При возбуждении атомов неона в спектре генерации лазера с коротковолновой стороны от линии поглощения ( $\lambda=5945$  Å) наблюдается уменьшение межмодового расстояния — «сбегание» мод резонатора Майкельсона к линии поглощения неона, а с длинноволновой стороны — «разбегание» мод. Без учета конкуренции мод в резонаторе используемого лазера на красителе распределение интенсивности интегрального спектра излучения в выходной плоскости спектрографа можно представить следующей функцией:

$$I(x) = A \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi x}{p_0} + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L(\lambda) \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $A$  — постоянный коэффициент,  $x$  — текущая линейная координата спектральных линий вдоль дисперсии спектрографа,  $p_0$  — период спектральных полос пустого резонатора,  $\Delta L(\lambda) = 2 [n(\lambda) - n_B] l_n$  — разность хода между плечами связанного резонатора Майкельсона, обусловленная разностью показателей преломления  $n(\lambda)$  среды в кювете длиной  $l_n$  и воздуха  $n_B$ .

Если распределение интенсивности, описываемое выражением (1), зарегистрировано на фотопленке на линейном участке амплитудно-экспозиционной

кривой, то амплитудное пропускание полученной спектрограммы будет пропорционально  $I(x)$ . При освещении такой спектрограммы плоской монохроматической волной с длиной волны  $\lambda_0$  с нее дифрагируют под углами  $\pm(\lambda_0/p_0)$  две волны с комплексно-сопряженными фазами. Если направить эти волны по одному направлению, то они образуют интерференционную картину с двукратно увеличенной чувствительностью. Для получения большего коэффициента увеличения чувствительности применяется метод последовательной пересъемки спектрограмм, предложенный в работе [4] для обработки голограмм. Суть метода заключается в последовательной перезаписи спектрограмм при использовании  $\pm$ -первых порядков дифракции исходной спектрограммы. После  $n$ -кратного числа актов перезаписи  $\pm$ -первые порядки дифракции полученной спектрограммы направляют по одному пути и совмещают, они образуют интерференционную картину с коэффициентом увеличения чувствительности  $2^{n+1}$ .

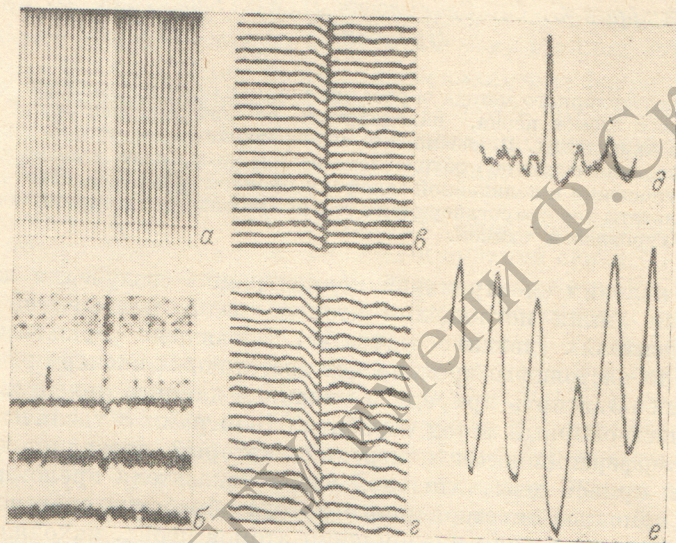


Рис. 1. Фотографии интерференционных картин, полученных при апостериорной обработке спектрограммы.

Этот апостериорный метод получения интерференционных картин увеличенной чувствительности был применен для обработки внутрирезонаторной спектрограммы неона вблизи линии поглощения ( $\lambda=5945 \text{ \AA}$ ), на которой наблюдалась спектральная концентрация излучения.

На рис. 1, а приведена фотография исходной спектрограммы, на которой отчетливо видна область концентрации излучения. На рис. 1, б приведена фотография интерференционной картины, полученной при освещении исходной спектрограммы двумя пучками, распространяющимися под такими углами друг к другу, что обеспечивается интерференция нулевого и первого порядков дифракции. Интерференционные полосы дают в определенном масштабе зависимость  $[n(\lambda) - n_V]$  от длины волны  $\lambda$ . Половина поля одного из освещающих пучков перекрывалась, что обеспечивало получение интерференционной картины в нижней половине поля и распределение интенсивности вблизи линии поглощения (концентрации излучения) в верхней половине поля.

На рис. 1, в, г приведены фотографии интерференционных картин, полученных после одной и двух последовательных пересъемок исходной спектрограммы. Соответственно коэффициенты увеличения пересъемок исходной спектрограммы. Соответственно коэффициенты увеличения чувствительности приведенных спектрограмм составляют  $8\times$  и  $16\times$ .

На рис. 1, д приведена фотография фотометрирования концентрации излучения лазера вблизи линии поглощения неона, полученная при фильтрации нулевого порядка дифракции исходной спектрограммы. На рис. 1, е приведена фотография фотометрирования исходной спектрограммы.

Положение вертикальной линии на этом рисунке указывает положение линии поглощения неона ( $\lambda=5945 \text{ \AA}$ ). Расстояния между спектральными максимумами интенсивности, соответствующих центрам мод резонатора Майкельсона, равно  $1.2 \text{ \AA}$ . Пик интенсивности на рис. 1,  $\delta$  соответствует положению центра первого провала, расположенного слева от линии поглощения на рис. 1,  $\epsilon$ . Рис. 1,  $\delta$ — $\epsilon$  позволяют сделать следующие выводы: 1) возрастание интенсивности происходит в коротковолновой области от линии поглощения, причем максимум интенсивности смещен на величину  $\sim 0.2 \text{ \AA}$  от линии поглощения; 2) форма интерференционных полос вблизи линии поглощения показывает, что изменение показателя преломления  $[n(\lambda) - n_{\text{в}}]$  существенно отличается от обычного, описываемого формулой для однородно уширенного контура поглощения, и имеет несимметричный характер. Отметим, что на «захваченных»

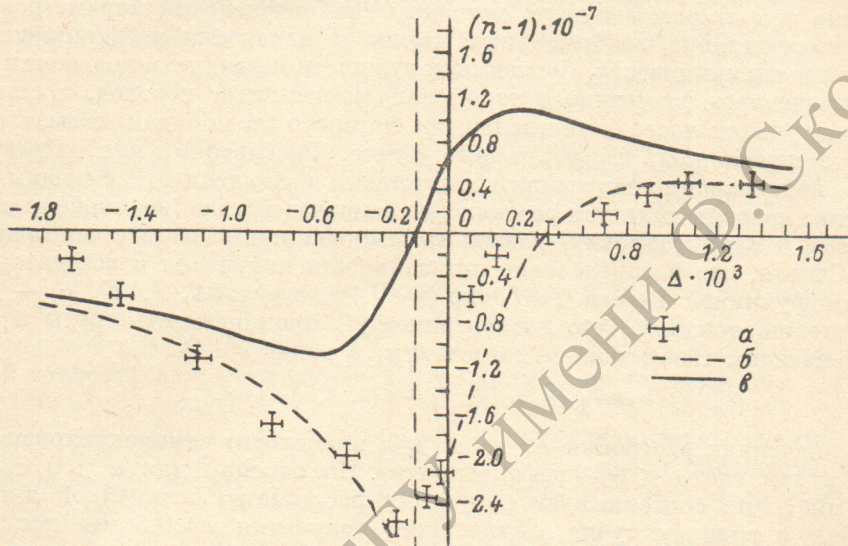


Рис. 2. Графики, показывающие ход дисперсии вблизи линии поглощения атомов неона.  $a$  — экспериментальные точки;  $b$  — теоретический график, соответствующий нелинейному изменению  $[n(\lambda) - 1]$  при  $K = -0.2$ ;  $c$  — теоретический график, соответствующий обычному ходу  $[n(\lambda) - 1]$  при  $K = 0$ .

линиях неона наблюдается обычный ход показателя преломления, соответствующий однородно уширенному контуру. Рис. 1,  $\epsilon$ ,  $\delta$  показывают, что минимум показателя преломления на захваченной линии смещен на  $0.2 \text{ \AA}$  относительно линии поглощения в коротковолновую область спектра. На рис. 2 приведены экспериментальные значения  $[n(\lambda) - 1]$ , полученные при обработке интерферограммы рис. 1,  $\delta$ . Вертикальная штриховая линия соответствует центру не смещенной вследствие эффекта Штарка линии поглощения. За нуль принято положение смещенной линии поглощения. Полученные экспериментальные результаты могут быть описаны теоретически на основе обобщенной модели резонансной двухуровневой среды [6]. Интенсивность излучения в резонаторе значительно превышает интенсивность насыщения, что приводит к существенному изменению населенностей возбужденных состояний вещества, к сдвигу уровней в результате динамического эффекта Штарка. Для анализа процесса генерации используем модель обобщенной двухуровневой системы. Процесс генерации в лазере на красителе с поглощающей кюветой можно считать стационарным. В этом случае действительную часть восприимчивости поглощающего вещества при однофотонном резонансе можно представить в виде

$$\chi = 2NfA \frac{IK\delta + \Delta}{1 + \Delta^2 + I/I_{\text{н}}} ; \quad (2)$$

где  $\Delta = \delta - IK$ ,  $N$  — концентрация возбужденных атомов в поглощающей кювете,  $f$  — сила осциллятора изучаемого перехода,  $A = 2.24 \cdot 10^{-14}$ ,  $\delta = (\omega_0 - \omega) T$ ,

$T=10^{-8}$  с — обратная полуширина линии,  $\omega_0$  — частота линии поглощения,  $I=E^2$  — интенсивность излучения,  $I_n=E_n^2$  — насыщающая интенсивность поля,  $\vartheta=2\tau/T$  ( $\tau$  — время жизни атома неона в возбужденном состоянии),  $K=$   
 $=\hbar^{-1}(\chi^{22}-\chi^{11})T$  — параметр «переполаризуемости» исследуемого перехода ( $\chi^{jj}$  — линейная поляризуемость атома в возбужденном и основном состояниях).

В нашем конкретном случае  $N \sim 5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>,  $\vartheta=3$ ,  $f=0.09$ ,  $I_n \sim 3 \cdot 10^{-3}$  СГСЭ ( $P \sim 1$  Вт/см<sup>2</sup>),  $I \sim 0.73 \cdot 10^3$  СГСЭ ( $P \sim 0.3 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>). Тогда при  $K=-0.2$  кривая восприимчивости (рис. 2, штриховая линия) практически совпадает для данных параметров с экспериментальными точками. На этом же рисунке для сравнения дана кривая поведения восприимчивости при  $K=0$  (сплошная линия), т. е. без учета перераспределения населенностей между уровнями 1 и 2 и без учета высокочастотного эффекта Штарка. Очевидно, что хорошее совпадение экспериментальной и теоретической кривых восприимчивости дает основание использовать данную методику для определения параметров переходов: концентрации возбужденных атомов и измерения коэффициентов нелинейной восприимчивости. Физическая сущность методики заключается в том, что «захваченное» излучение с узкой линией насыщает переход, а сплошной спектр излучения лазера, интенсивность которого на порядок меньше «захваченного», играет роль зондирующего пучка. Рассмотрим, как формируется в лазере концентрация излучения вблизи линии поглощения. Решающим фактором в этом явлении является резонансное самовоздействие (нелинейная самофокусировка и дефокусировка) лазерного излучения в кювете с поглощающим газом. Считая, что распределение интенсивности излучения в резонаторе описывается функцией Гаусса  $I=I_0 \exp(-r^2/\omega^2)$ , где  $\omega(\Delta, I, K, \vartheta)$  — радиус пучка, можно показать, что диэлектрическую проницаемость среды в кювете с поглощающим газом можно представить в виде

$$\varepsilon = \varepsilon_0(\Delta, \vartheta, K, I) - \alpha(\Delta, \vartheta, K, I)r^2. \quad (3)$$

На тех значениях расстройки  $\Delta$ , где  $\alpha > 0$ , происходит самофокусировка излучения, а там где  $\alpha < 0$  — дефокусировка. По оценкам для  $\alpha > 0$   $\alpha_{\max} \approx 2 \times 10^{-4}$  см<sup>-2</sup>, что соответствует фокусному расстоянию нелинейной линзы  $f \approx \approx +2.5$  м и радиусу пучка захваченного излучения  $w \approx 0.5$  мм при радиусе кюветы 1.25 мм. Для  $\alpha < 0$  фокусное расстояние линзы имеет значение порядка (—) 2 м. В области фокусировки добротность резонатора резко возрастает, и происходит «захват» излучения, а в области дефокусировки добротность резонатора падает, и происходит уменьшение интенсивности излучения.

В заключение выражаем признательность Л. Гайде и А. Володенкову за помощь в экспериментальной работе.

#### Литература

- [1] Shank C. V., Klein M. B. — Appl. Phys. Lett., 1973, v. 23, p. 156.
- [2] Белокозь М. В., Рубинов А. Н., Адамушко А. В. — ЖПС, 1978, т. 29, с. 409.
- [3] Meyer J. H. — Opt. Commun., 1976, v. 19, p. 343.
- [4] Зейликович И. С. — Опт. и спектр., 1980, т. 49, в. 2, с. 396.
- [5] Кукучкин В. Г., Пулькин С. А. Тез. III Всес. конф. «Лазеры на основе сложных органических соединений и их применение». Ужгород, 1980.
- [6] Бутылкин В. С., Каплан А. Е., Хронополо Ю. Г. — ЖЭТФ, 1970, т. 59, с. 921.

Поступило в Редакцию 31 августа 1982 г.