

Л и т е р а т у р а

- [1] Жидомиров Г.М., Лебедев Я.С., Добряков С.Н. и др. Интерпретация сложных спектров ЭПР. М.: Наука, 1975. 215 с.
- [2] S c h w e i g e r A. - J. Magn. Reson., 1983, v. 51, N 3, p. 286-300.
- [3] Алексеев Б.Ф., Гайфуллин М.Б., Сизова Е.А., Тихонов А.Б. - ФТТ, 1987, т. 29, № 7, с. 2169-2171.
- [4] Алексеев Б.Ф., Гайфуллин М.Б., Тер-Мартиросян Л.Т. - Изв. вузов, Физика, 1987, т. 30, № 12, с. 95-97.
- [5] Тесленко В.В. - ФТП, 1983, т. 17, № 3, с. 526-528.

Ленинградский электротехнический
институт им. В.И. Ульянова
(Ленина)

Поступило в Редакцию
27 января 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 10

26 мая 1988 г.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ЗАПОМИНАНИЕ ПОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ФОТОВЫЖИГАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРОВАЛОВ

К.К. Ребане, А.А. Гороховский,
Я.В. Кикас, Е.И. Малкин,
В.В. Пальм

Продемонстрирован метод визуализации и запоминания распределения механических напряжений (РМН) с помощью фотовыжигания стабильных спектральных провалов (ФСП) [1]. Провалы в неоднородно уширенных спектрах образуются под действием монохроматического излучения вследствие фотопревращений (часто необратимых) молекул примеси или матрицы и имеют время жизни, достигающее многих часов и суток. Их ширина обусловлена, в основном, шириной бесфонной линии и при гелиевых температурах может быть весьма малой, вплоть до 10^{-4} нм [2]. Это обуславливает высокую чувствительность провалов к разным физическим воздействиям, в том числе и механическому напряжению [3].

Общая схема регистрации РМН, предложенная в [4] и экспериментально реализуемая в настоящей работе, следующая.

Образец из материала, в котором возможно ФСП, охлаждают до требуемой температуры и подвергают воздействию внешних сил. В напряженном состоянии образец облучают монохроматическим излучением на длине волны λ в неоднородной чисто-электронной полосе

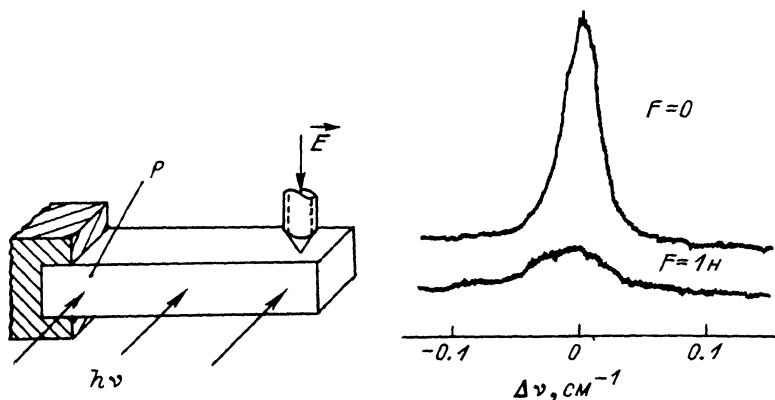


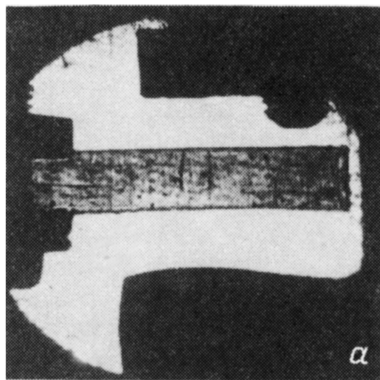
Рис. 1. а - схема крепления и загрузки объекта в виде консольной балки, плечо загрузки 9 мм. Направление распространения лазерного излучения указано стрелками; б - контуры провала в спектре пропускания в точке объекта Р до приложения нагрузки и при нагрузке $F = 1Н$ (расчетное напряжение $\sigma = 1.5 Н/мм^2$).

поглощения примеси. Это приводит к образованию спектрального провала, параметры которого (частота, ширина) с большой точностью одинаковы во всех точках образца. При снятии нагрузки частоты примесных переходов возвращаются к значениям, соответствующим ненапряженному состоянию, т.е. испытывают пьезоспектроскопические сдвиги [5], зависящие от состояния напряжений под нагрузкой и разные для разных пространственных точек образца. В результате в образце образуется и может существовать продолжительное время пространственнеоднородное распределение оптических характеристик на длине волны λ , чем и фиксируется существовавшее во время облучения РМН. Может быть применена и схема, в которой облучение образца осуществляется до его загрузки - запоминания в таком случае не происходит, но метод может быть применен для высокочувствительной и быстрой визуализации РМН.

Для демонстрации возможностей метода исследовались два объекта, моделирующие деформацию изгиба консольной балки (А) и растяжение тонкой пленки (Б).

В случае А образец изготовлялся из полистирола с примесью молекул H_2 -октаэтилпорфина ($\approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в виде прямоугольного параллелепипеда размерами 2.4 x 5 x 12.5 мм, закреплялся с одного конца (рис. 1а) и помещался в оптический криостат при $T = 1.5 \text{ К}$. Провал выжигался при помощи одночастотного лазера на красителе в максимуме неоднородно уширенной чисто электронной полосы поглощения $S_1 \leftarrow S_0$ перехода примеси при $\lambda = 618.5 \text{ нм}$ ($\nu = 16168 \text{ см}^{-1}$). Для получения однородного поля освещения использовался телескоп. Изображение объекта в прошедшем лазер-

Рис. 2. Фотографии объекта в проходящем лазерном свете после выжигания (интенсивность 20 мкВт/см^2 , время 5 мин, изменение оптической плотности от $\mathcal{D} = 2$ до $\mathcal{D} = 1.3$) до приложения нагрузки (а) и после приложения нагрузки $F = 1.5 \text{ Н}$ (б). В случае (в) выжигание проводилось в нагруженном состоянии $F = 2 \text{ Н}$, регистрация — без нагрузки.



ном свете рассматривалось визуально и фотографировалось. На рис. 2, а, б представлены фотографии, характеризующие распределение напряжения в объекте до (а) и после (б) приложения внешней силы. Отчетливо проявляется характерная картина РМН — центральная полоса нулевой деформации с неизменившимся светопропусканием (более светлая) и потемневшие зоны растяжения и сжатия на периферии образца, причем степень потемнения уменьшается с увеличением расстояния от места крепления. Для демонстрации запоминания РМН выжигался провал в предварительно нагруженном образце.

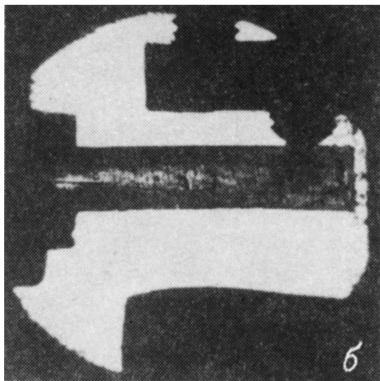
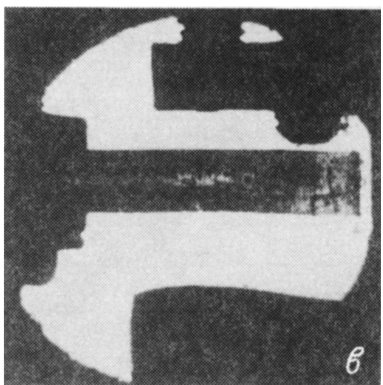


Рис. 2, в представляет фотографию образца на той же длине волны, но после снятия нагрузки. Видно, что картина, близкая рис. 2, б, теперь наблюдается в свободном от напряжений образце, т.е. РМН запоминалось в виде распределения оптической плотности.



Контур провала в ненагруженном и нагруженном объекте для точки вблизи места крепления консоли, где напряжения максимальны (точка Р на рис. 1, а), показан на рис. 1, б. В отсутствие нагрузки провал глубокий и его ширина составляет $\delta = 0.03 \text{ см}^{-1}$,

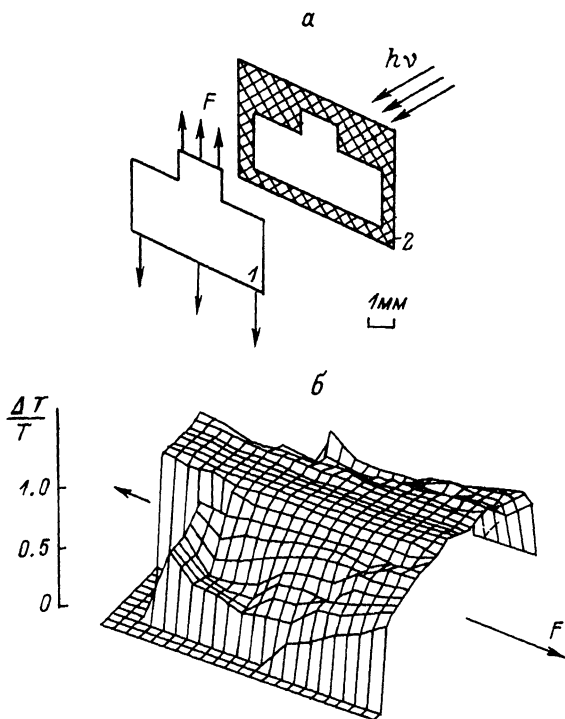


Рис. 3. а - схема эксперимента, демонстрирующая форму растягиваемой пленки (1) и направление растяжения. Во избежание насыщения ПЗС-детектора идущий мимо объекта свет (направление распространения света указано стрелками) экранировался маской (2); б - относительное изменение пропускания $\Delta T/T_0$, соответствующее полю возникающих напряжений.

при нагрузке $F = 1H$ глубина провала уменьшается, а его ширина возрастает до $\delta = 0.07 \text{ см}^{-1}$.

В случае Б (рис. 3) образец в виде пленки толщиной 0.2 мм из активированного хлорином полистирола был охлажден до 4.2 К и облучен гелий-неоновым лазером на длине волны $\lambda = 632.8 \text{ нм}$ ($\nu = 15803 \text{ см}^{-1}$) в чисто электронной $S_1 \leftarrow S_0$ полосе поглощения примеси. Затем образец подвергался растяжению согласно схеме на рис. 3,а ($F = 9H$). На рис. 3,б приведено относительное изменение пропускания образца $(T_0 - T_1)/T_0$ на длине волны λ , где T_0 - пропускание после облучения до растяжения и T_1 - пропускание при растяжении. Пространственное распределение прошедшего через образец света регистрировалось линейным ПЗС-детектором [6], сканируемым по высоте с помощью микрометрического транслятора. Максимальное изменение пропускания, соответствующее

максимальной деформации, наблюдается в области узкой шейки, хорошо виден также спад напряжения к краям пленки.

Чувствительность регистрации РМН с помощью ФСП составляет $10^4 \dots 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ (0.1–1 атм). В приведенных примерах исследовалось двумерное РМН в плоскости, перпендикулярной направлению зондирующего света. Используя люминесцентную методику регистрации провалов, можно осуществить послойную регистрацию трехмерных РМН, а также исследовать РМН в тонких покрытиях вплоть до мономолекулярных слоев.

Представляется, что предложенный метод может существенно дополнить известные способы исследования РМН с помощью фотоупругости [7].

Л и т е р а т у р а

- [1] R e b a n e L., G o r o k h o v s k i i A., K i k a s J. – Appl. Phys. B., 1982, v. 29, N 4, p. 235–250.
- [2] Р е б а н е К.К. Элементарная теория электронно-колебательных спектров примесных центров кристаллов, М.: Наука, 1968. 232 с.
- [3] R i c h t e r W., S c h u l t e G., H a a r e r D. – Opt. Commun., 1984, v. 51, N 6, p. 412–416.
- [4] Р е б а н е К.К. – Изв. АН ЭССР, Физ. – Матем., 1985, т. 34, № 4, с. 441–443.
- [5] Ф е о ф и л о в П.П., К а п л я н с к и й А.А. – УФН, 1962, т. 76, № 2, с. 201–238.
- [6] А й з е н г е н д л е р М., К и п п а с т о А., Д о л и н д о И., С и л ь д о с И. – Изв. АН ЭССР, Физ.–Матем., 1987, т. 36, № 1, с. 44–47.
- [7] А л е к с а н д р о в А.Я., А х м е т з я н о в М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.

Институт физики
АН ЭССР, Тарту

Поступило в Редакцию
8 февраля 1988 г.