

К. К. РЕБАНЕ

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОВЫЖИГАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРОВАЛОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

К. К. REBANE. SPEKTRITE FOTOSALKAMISE VOIMALUSTEST MENNAANILISTE PINGETE JAOTUSE UURIMISEL

K. K. REBANE. ON POSSIBLE APPLICATION OF PHOTOBURNING OF SPECTRAL HOLES TO STUDY MECHANICAL STRAINS

Фотовыжигание спектральных провалов (ФСП) (см. приоритетные публикации [1, 2]) показало себя эффективным методом исследования как примесных молекул и атомов в твердотельных матрицах, так и свойств самих матриц — моно- и поликристаллов, стекол, полимерных пленок. ФСП находит все более широкое использование в научных исследованиях, ведутся также многообещающие поиски принципиально новых практических применений: в голографии сверхбыстрых пространственно-временных событий, в создании узкополосных оптических фильтров и их специальной разновидности — спектральной памяти для вычислительных машин (см. обзоры [3, 4], а также [5]; об основах метода [6]).

ФСП особенно эффективно, когда бесфононные линии (БФЛ) в спектрах узки и обладают высокой пиковой интенсивностью, т. е. при температурах жидкого гелия (о теории спектров примесей в твердотельных матрицах см. [7]). Однако оно может быть полезно и при более высоких температурах, вплоть до комнатных. Для перспектив технологических приложений существенно, что число систем, активированных весьма различными примесями весьма различных матриц, обладающих при гелиевых температурах четкими БФЛ, велико. Сюда относятся как неорганические, так и органические химические вещества, тысячи примесных молекул в сотнях матриц.

Чрезвычайная узость БФЛ (10^{-3} — 10^{-4} см⁻¹ для разрешенных переходов и еще уже для запрещенных) делает их очень чувствительными зондами воздействия на примесный центр: даже весьма небольшое возмущение сдвигает частоту БФЛ на величину, превышающую ее спектральную ширину. Так, в [8] показано, что при 1,5 К частота БФЛ рубина (ширина линии 0,04 см⁻¹) сдвигается под влиянием внутренних напряжений на трехкратное значение ширины линии. В случае примесных молекул в органических матрицах соответствующие сдвиги видны уже при внешнем давлении в 0,1 ат и проявляются в уширении спектральных провалов (ширина провалов 0,01 см⁻¹ при 1,5 К [9]).

Требуется уточнение: сказанное о ширине БФЛ относится к абсолютно идентичным примесным центрам, в реальных твердотельных матрицах всегда имеются внутренние неоднородности структуры, приводящие к большому разбросу частот БФЛ — к неоднородному уширению. Последнее превышает однородную ширину БФЛ в 10^3 — 10^6 раз, превращая изящную БФЛ для обычных способов наблюдения спектров в унылую полосу шириной от 0,1 см⁻¹ в хороших монокристаллах до 1000 см⁻¹ в молекулярных стеклообразных матрицах. Для наблюдения упомянутых выше под влиянием напряжения сдвигов [8, 9] и были

применены подходящие лазерные методы (см. [3-6]), позволяющие освободиться от основной части неоднородного уширения.

Возможность «записи» и изучения поля напряжений с помощью ФСП заключается в следующем. Образец должен быть изготовлен из достаточно прозрачного для лазерного излучения вещества, спектр которого содержит неоднородно уширенные полосы, состоящие из достаточно узких однородных БФЛ.

Образец подвергается действию сил, вызывающих изучаемую ситуацию деформации и фиксируется в этом состоянии на некоторое время, необходимое для ФСП (от долей секунд до минут). Образец освещается узкой линией лазера в интервале частот примесного поглощения. Те примесные центры, БФЛ которых попадают в точный резонанс с возбуждающей частотой лазера, будут переводиться в возбужденное электронное состояние намного чаще, чем примеси вне резонанса (около $\Delta: \delta \approx 10^5 - 10^7$ раз, где δ — однородная ширина БФЛ и $\Delta \approx 10 - 1000 \text{ см}^{-1}$ — ширина фононного крыла в спектре поглощения примеси [7]). В конце концов резонансные примесные центры претерпевают химические или какие-нибудь другие изменения и перестают поглощать на частоте лазера. В полосе поглощения на всем протяжении освещаемого лазером участка образца образуется узкий и резкий провал в неоднородном спектре. После выжигания провала достаточной глубины образец освобождается от нагрузки, напряжения снимаются, и провалы в спектре поглощения сдвигаются к новым частотам, соответствующим ненагруженному состоянию. Эти сдвиги имеют различную величину в корреляции с величиной (и симметрией) снятого напряжения (а также в зависимости от типа центра в данной точке образца). Формируется и может быть сохранено на многие часы и дни неоднородное пространственно-частотное распределение частот спектральных провалов, отражающее существовавшее во время фотovyжигания распределение напряжений. Это распределение и следует изучать разработанными в ФСП методами лазерной спектроскопии.

Обращаясь к аналогии с фотографией, можно сказать, что тем самым картина напряжений с предельным разрешением, равным расстоянию между соседними фотопревращенными примесями (т. е. $10^{-2} - 10^{-4} \text{ см}$), запечатлена, проявлена и зафиксирована. Вся проблема в том, в какой мере и с какой точностью мы в состоянии эту фотографию изучить — промерить и интерпретировать. Необходимые для понимания ситуации основы в теории спектров примесей и теории ФСП имеются.

На основе общих соображений ФСП можно думать, что для очень точных измерений малых напряжений наиболее подходящим материалом может служить монокристаллическая матрица с однородными анизотропными примесными центрами. Большой выбор дешевых и легкодоступных материалов предоставляют стекла, активированные подходящими примесями.

Ясно, что ключевой проблемой является нахождение подходящего материала для образца, т. е. системы примесь + матрица. Подчеркнем, что для ФСП требования к фоточувствительности самые малые: при наличии хороших БФЛ их практически нет — спектрально узкий лазерный луч обеспечивает огромную дозу облучения для примесей, чьи БФЛ находятся в резонансе с частотой возбуждения, можно сказать, что превращение достигается применением грубой силы.

В реализации ФСП при комнатных температурах можно рассчитывать на БФЛ минимальной ширины 1 см^{-1} и, соответственно, на уверенное зондирование напряжений, вызывающих сдвиги БФЛ такого же порядка величины. Однако и здесь имеется простор для изящных усовершенствований, поскольку область новая, а физические ее основы надежные.

В принципе, образец можно после фотовыжигания разобрать на составные детали или расколоть на куски, лишь бы не вызвать этим слишком больших остаточных напряжений или диффузии частиц матрицы во время раскалывания. Если образец снова нагрузить таким же образом, как при выжигании, то должен восстановиться исходный провал. Это может служить проверкой отсутствия процессов диффузии, искажающих картину.

ФСР представляет перспективным дополнением к методу (интегральной) фотоупругости, а в ряде аспектов и более эффективным, чем этот традиционный и хорошо разработанный метод (см. [10]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гороховский А. А., Каарли Р. К., Ребане Л. А. Письма в ЖЭТФ, 20, вып. 7, 474—479 (1974).
2. Kharlamov, B. M., Personov, R. I., Bykovskaya, L. A. Opt. Commun., 12, № 1, 191—193 (1974).
3. Rebane, L. A., Gorokhovskii, A. A., Kikas, J. V. Appl. Phys., B29, № 2, 235—250 (1982).
4. Friedrich, J., Haarer, D. Angew. Chem., Internat. Ed., 23, 113 (1984).
5. Rebane, K. J. Luminescence, 31—32, 744 (1984).
6. Ребане К. К. Ж. прикл. спектроскопии, 37, вып. 6, 906—922 (1982).
7. Ребане К. К. Элементарная теория колебательной структуры спектров примесных центров кристаллов. М., «Наука», 1968.
8. Jessop, P. E., Szabo, A. Opt. Commun., 33, № 3, 301—302 (1980).
9. Richter, W., Schulte, G., Haarer, D. Opt. Commun., 51, № 6, 412—416 (1984); Offen, H. W. In: Organic Molecular Photophysics, 1, London, New York, 1973, 103.
10. Абен Х. К. Интегральная фотоупругость. Таллин, «Валгус», 1975.

Академия наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
28/VI 1985