

Лазерная фотодефлекционная спектроскопия пространственно-неоднородных сред

П. В. АСТАХОВ¹, Г. С. МИТЮРИЧ²

¹ Кафедра естественных наук,
Гомельское высшее командно-инженерное училище МЧС Республики Беларусь
Речицкое шоссе, 35А, 246000, Гомель, Беларусь
Fax: + 375–232–794013; email: astakhov@tut.by

² Кафедра оптики,
Гомельский государственный университет им. Ф.Скорины
ул. Советская, 104, 246019, Гомель, Беларусь
Fax: + 375–232–570684; email: mgs@gsu.unibel.by

Важным и перспективным направлением развития современных систем диагностики и неразрушающего контроля является разработка способов бесконтактной, дистанционной регистрации механических напряжений и дефектов, возникающих в объеме твердых тел. Для решения задач такого класса сложности используется целый ряд методик, среди которых необходимо выделить ультразвуковую спектроскопию, методы голографической интерферометрии, дифракционные методы. Значительное распространение в последнее время также получили фототермические методики исследования конденсированных сред [1]. Отличительными особенностями фототермических методов, применяемых для изучения твердотельных объектов, является их универсальность и относительная простота реализации измерений. Одним из представителей фототермических методов является метод фотодефлекционной спектроскопии [2], который успешно применяется и при изучении гиротропных сред [3].

В данной работе теоретически изучен процесс формирования фотодефлекционного отклика в образце, обладающем неоднородностями внутренней структуры. В качестве модели для проведения анализа была выбрана многослойная структура. Использование слоистой структуры как модели позволяет изучить возможности применения метода фотодефлекционной спектроскопии для регистрации протяженных внутренних трещин, возникающих с течением времени в объеме исследуемого вещества.

Для разрешения данной проблемы методом фотодефлекционной спектроскопии требуется решить систему уравнений теплопроводности, описывающих температурное распределение в изучаемой системе. Отметим, что для количественной оценки амплитуды фотодефлекционного сигнала, возникающего в сложном слоистом образце, обычно необходимо использование численных методов расчета. По этой причине для упрощения анализа рассмотрим возникновение фотодефлекционного отклика в двухслойной системе. Основные закономерности, полученные в результате такого анализа, в дальнейшем можно обобщить на случай более сложной системы. Таким образом, наличие в образце внутренних неоднородностей учитывается введением в систему уравнений теплопроводности дополнительных выражений, описывающих теплофизические процессы в каждом из слоев, а также дополнительных условий равенства тепловых потоков и температур на границах раздела слоев.

Рассмотрим распространение плоской электромагнитной волны с напряженностью электрического поля \mathbf{E}_1 , амплитудно модулированной с частотой ω , через двухслойный

изотропно-гиротропный поглощающий образец. Выберем систему координат таким образом, что излучение распространяется вдоль оси Oz . Обозначим границы первого слоя $z = 0$ и $z = d_1$, границы второго слоя - $z = d_1$ и $z = d_2$ соответственно. Выражения для диссипации световой энергии $Q(\mathbf{r}, t)$ в каждом из слоев было получено в [4]. Для случая анизотропной среды расчет величины объемной диссипации световой энергии для последующего определения амплитудно-фазовых характеристик фотоакустического сигнала был проведен в работе [5]. Соотношения, полученные в [5], не накладывают дополнительных ограничений на величины параметров, характеризующих анизотропные свойства вещества, вращение плоскости поляризации светового излучения, линейный и циркулярный дихроизм. Данное обстоятельство позволяет использовать эти соотношения для изучения процессов термооптического преобразования энергии в анизотропной среде при произвольной комбинации указанных параметров.

Составляющая температуры $T(\mathbf{r}, t)$, обусловленная поглощением электромагнитного излучения средой, обладающей внутренними напряжениями, зависит от тепловых процессов, происходящих в каждом из слоев. Распределение температурных полей при данной постановке задачи можно получить, решив систему четырех уравнений теплопроводности:

$$\Delta T(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{\beta_j} \frac{\partial}{\partial t} T(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ -\frac{1}{k_1} Q_1(\mathbf{r}, t), & 0 < x < d_1, \\ -\frac{1}{k_2} Q_2(\mathbf{r}, t), & d_1 < x < d_2, \\ 0, & x > d_2, \end{cases} \quad (1)$$

где β_j — температуропроводность образца, j принимает значения 1 — для детекторной среды, 2 — для первого слоя, 3 — для второго слоя, 4 — для среды за образцом, k_j — теплопроводность образца, Q_j — диссипация энергии в j -ом слое.

Решение данной системы уравнений, проведенное аналогично работе [6], позволяет определить распределение температурного поля на границе $z = 0$ "исследуемый образец-детекторная среда".

Неоднородный нагрев поверхности исследуемой системы ведет к появлению температурного градиента показателя преломления dn/dT прозрачной среды, примыкающей к границе $z = 0$ исследуемого образца. Наличие градиента показателя преломления регистрируется пробным лазерным лучом малой мощности, величина отклонения которого характеризует особенности теплофизических параметров слоистого образца.

Для проведения на основании полученных теоретических результатов численного и графического анализа были использованы следующие основные параметры изучаемой среды: $\varepsilon_1'' = 5.6 \times 10^{-2}$, $\gamma_1'' = 10^{-5}$, $\varepsilon_2'' = 10^{-2}$, $\gamma_2'' = 10^{-5}$. Толщина каждого из слоев изменялась от 0.5×10^{-3} м до 5.0×10^{-3} м.

Согласно проведенным расчетам влияние дефектов и неоднородностей во внутренней структуре исследуемого материала проявляется в определенном изменении величины фотодефлекционного отклика по сравнению с откликом однородного образца, во внутренней структуре которого отсутствуют локальные дефекты. Данный эффект объясняется влиянием характеристик внутренней структуры вещества на процессы перераспределения тепловой энергии в объеме исследуемого образца. Изменение объемной концентрации тепла, вызванное наличием неоднородностей внутренней структуры, приводит к возникновению дополнительного теплового потока через границу раздела "исследуемый образец - детекторная среда". Вышеуказанное изменение теплового потока вносит дополнительный вклад в амплитуду фотодефлекционного сигнала.

Интересные с теоретической точки зрения зависимости возникают при рассмотрении геометрического положения неоднородности в образце. При использовании модели

многослойной среды данный случай описывается путем варьирования толщины различных слоев. Если локальная неоднородность находится на расстоянии, меньшем длины термической диффузии в материале, то регистрируемая величина фотодефлекционного сигнала возрастает по сравнению со случаем цельного образца (рис. 1). При расположении дефекта глубже, на расстоянии, превышающем длину термической диффузии, величина фотодефлекционного отклика незначительно уменьшается. С увеличением глубины образования трещины различия между цельным образцом и образцом, обладающим внутренними дефектами, практически стираются. Таким образом, использование метода фотодефлекционной спектроскопии наиболее эффективно для детектирования тонких подповерхностных слоев материала.

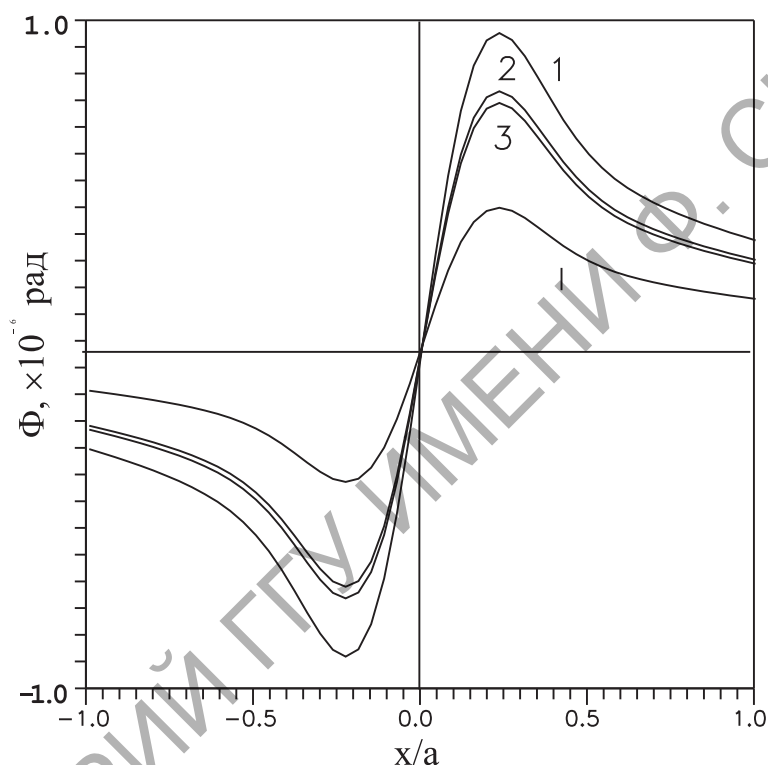


Рис. 1: Зависимость амплитуды фотодефлекционного сигнала от нормированной пространственной координаты (1 – $d_1 = 0.5 \times 10^{-3}$ м, 2 – $d_1 = 1.0 \times 10^{-3}$ м, 3 – $d_1 = 1.2 \times 10^{-3}$ м, 4 – $d_1 = 4.5 \times 10^{-3}$ м)

Из проведенного численного и графического анализа полученных результатов видно, что существует реальная возможность использования метода фотодефлекционной спектроскопии для детектирования и визуализации дефектов и локальных неоднородностей внутренней структуры вещества. Для проведения исследований такого рода необходимо сравнение фотодефлекционных спектров, полученных для цельных эталонных образцов со спектрами, регистрируемыми на реальных объектах. Различия в величине фотодефлекционного сигнала при прочих равных условиях, по всей видимости, будут обусловлены именно неоднородностями во внутренней структуре вещества.

Литература

- [1] В. П. Жаров, В. С. Летохов, *Лазерная оптикоакустическая спектроскопия*. М.: Наука, **320**, (1984).

- [2] A. C. Vocca, D. Fournier, J. Badoz, *Thermo-optical spectroscopy: Detection by the "mirage" effect*. Appl. Phys. Lett. **2**, vol.36, (1980), 130–132.
- [3] П. В. Астахов, Г. С. Митюрин, *Фотодефлекционный отклик гиротропно-изотропного образца в условиях туннельной электромагнитной интерференции*. Письма в ЖТФ. **15**, т.24, (1998), 85–90.
- [4] Б. В. Бокуть, А. Н. Сердюков, В. В. Шепелевич, *К феноменологической теории поглощающих оптически активных сред*. Оптика и Спектроскопия. **1**, т.37, (1974), 120–124.
- [5] Г. С. Митюрин, Е. Г. Стародубцев, *Особенности диссипации световой энергии в одноосных гиротропных кристаллах*. Оптика и Спектроскопия. **4**, т.77, (1994), 613–616.
- [6] Г. С. Митюрин, В. В. Свиридова, А. Н. Сердюков, *Фотоакустическая спектроскопия гиротропных слоистых образцов*. ЖПС. **4**, т.53, (1990), 611–617.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф.СКОРИНЫ