

УДК 539.3; 535.347

## КОНТАКТНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ ТЕРМОУПРУГОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В МОДУЛЯЦИОННОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ

Д. ф.-м. н. Б. К. Сердега, к. ф.-м. н. И. Е. Матяш, к. ф.-м. н. О. Н. Мищук, И. А. Минайлова

Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины  
Украина, г. Киев  
bserdega@isp.kiev.ua

*Методом модуляционной поляриметрии в эталонных образцах измерено пространственно-временное распределение термонапряжений, индуцированных контактным и радиационным нагревами. Решением обратной задачи нестационарной термоупругости получены функции температуры во времени и пространстве. Из анализа зависимостей термонапряжения получены характеристические параметры механизмов теплопередачи.*

*Ключевые слова: теплопроводность, термоупругость, анизотропия, двойное лучепреломление, модуляция поляризации.*

Поток тепла с поверхности твердого тела сопровождается неоднородным температурным полем, которое индуцирует внутренние механические напряжения (контактная термоупругость). Неоднородное поглощение электромагнитного излучения в твердом теле является причиной возникновения радиационной термоупругости. Диффузия вещества под действием градиента его состава обуславливает «замороженную» термоупругость. Все эти варианты одного и того же явления являются объектами методики измерения внутренних механических напряжений, основанной на модуляционной поляриметрии. С ее помощью решается обратная задача термоупругости — определение кинетики и динамики (во времени и пространстве) температуры по результатам измерений величины и знака механических напряжений. Иллюстрацией высокой чувствительности модуляционно-поляриметрического устройства является его способность регистрировать в образцах механические напряжения, возникающие под действием их собственного веса в гравитационном поле Земли. При таких условиях отпадает необходимость учета в теоретических уравнениях, описывающих явления термоупругости, температурной зависимости всех коэффициентов, характеризующих процессы теплопереноса. При этом существенно упрощается математический аппарат и достигается соответствие расчетов и экспериментальных данных.

Цель работы находится в рамках прямой задачи и предусматривает определение в пространстве и во времени величины и знака механических напряжений, происхождение которых обусловлено отмеченными физическими причинами, а их релаксация (прямая и обратная) происходит всеми тремя механизмами теплопередачи. Для достижения цели была параметрически и конструктивно адаптирована техника модуляции поляризации к регистрации динамики и кинетики термоупругости с учетом иерархии характеристического времени соответствующих процессов. Результаты исследования термоупругости непосредственным образом направлены на решение проблемы долговечности и надежности конструкций как в наземных условиях, так и в космическом пространстве (прочность металло-металлических и металло-стеклянных соединений).

Исследования проводились широко применяемым оптико-поляризационным методом регистрации упругих напряжений в твердом теле [1] на основе фотоупругого эффекта, модифицированным модуляцией поляризации. Суть модификации классической методики состоит в том, что оптико-поляризационная схема, состоящая из двух скрещенных линейных поляризаторов, дополнена модулятором поляризации электромагнитного излучения. Необходимость этого вызвана тем, что присутствующая по разным причинам в излучении неполяризованная компонента является помехой при измерении поляризационно-зависящих эффектов при небольших изменениях температуры, хотя исследование термоупругости именно в таких условиях представляет интерес в виду независимости констант, влияющих на эффект, от температуры. Избежать указанной проблемы можно благодаря свой-

ству неполяризованного излучения не подвергаться действию поляризационной модуляции. В случае использования модуляции поляризации неполяризованная компонента генерирует в фотодетекторе постоянный сигнал, отделяемый при измерении селективным усилителем от переменного, который связан исключительно с поляризованным излучением и может быть усилен на порядки. То есть, условие эксперимента, вызванное модификацией метода регистрации, с избытком компенсируется, прежде всего, расширенным на несколько порядков динамическим диапазоном измеряемых величин, а также высокой степенью достоверности в поляризационной природе их происхождения.

Таким образом, в работе проводилась регистрация состояния поляризации зондирующего излучения, степень изменения которого связана с возникшей вследствие термоупругости оптической анизотропией. По изложенным в [2] соображениям, зондирующее излучение в исходном состоянии должно быть линейно поляризованным. При этом азимут поля волны следует ориентировать так, чтобы две его компоненты, параллельные осям образца, были равны между собой ( $E_x = E_y$ ) на том основании, что относительно них ориентированы тепловым потоком деформации сжатия-растяжения. При такой геометрии опыта в излучении по мере его распространения сквозь образец образуется разность фаз между ортогональными линейными компонентами:  $\Delta = \varphi_x - \varphi_y = 2\pi(n_x - n_y)d/\lambda$ , где  $n_x, n_y$  — показатели преломления стекла вдоль осей оптической индикатрисы образца,  $d$  — его толщина в направлении распространения зондирующего луча,  $\lambda$  — длина волны зондирующего излучения. Наличие сдвига фаз, линейно зависящего от величины деформации в пределах закона Гука, приводит к преобразованию излучения в общем случае в эллиптически поляризованное, т. е. к возникновению в его составе циркулярной поляризации. Интенсивность циркулярно поляризованного излучения равна  $I_V = E_x E_y \sin \Delta \cdot \sin \omega t$ , где  $\omega$  — частота модуляции, и при малых величинах фазовой задержки (условие  $\Delta < 1$  выполняется в данном эксперименте) является линейной мерой внутреннего механического напряжения.

Эталонные образцы представляли собой бруски, вырезанные из кварцевого стекла, предназначенного для изготовления изделий оптики. Основанием для выбора материала служили сравнительно малое значение коэффициента теплопроводности материала и его оптическая и механическая однородность. Неоднородный градиент температуры создавался в образце двумя способами. В случае исследования контактной термоупругости образец торцом устанавливался на ситалловую подложку с никелевой пленкой-резистором на ее поверхности, игравшей роль источника тепла. При исследовании радиационной термоупругости источником излучения было черное тело, нагретое до  $40^\circ\text{C}$ . Излучающая поверхность черного тела и резистор имели площадь, несколько превышающую размер торцевой поверхности образца, что позволяло обеспечивать условие однородности радиационного и теплового потока в образце. При сканировании образца зондирующим лучом для определения координатной зависимости величины напряжения он закреплялся вместе с нагревателем или излучателем на одном и том же подвижном устройстве, что позволяло сохранять условия нагрева при их перемещении относительно зондирующего луча.

Измерялись величины оптической анизотропии, пересчитанные в механические напряжения, в зависимости от времени при фиксированных по координате  $y$  зондирующего луча, а также их распределения вдоль теплового потока в определенные моменты времени. Регистрация сигнала фотодетектора производилась lock-in-нанольтметром, в котором значение постоянной интегрирования устанавливалось исходя из определенной иерархии значений характеристического времени, соответствующих процессу формирования явления термоупругости. Фаза опорного сигнала синхронного усилителя регулировкой устанавливалась такой, что положительный знак разности фаз ортогональных компонент излучения соответствовал напряжению сжатия вдоль координаты  $y$ . Образец при измерениях находился в среде окружающего воздуха при атмосферном давлении и в условиях естественной конвекции.

Результат в виде координатной зависимости величины и знака напряжения  $\sigma(y)$ , полученный при пространственном сканировании образца, описывается соотношением  $\text{div}(\text{grad}T) \approx \sigma(y)$ . Это значит, что индуцированная неоднородным градиентом температуры деформация упругого твердого тела описывается уравнением Пуассона, которое в системе наших координат имеет вид [3]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\frac{\sigma(y)}{\eta}, \quad (1)$$

где  $1/\eta$  — коэффициент пропорциональности.

Учитывая, что  $\sigma(y)$  в правой его части является результатом измерения, можно двойным графическим интегрированием этой функции получить координатное распределение температуры при выполнении соответствующих граничных условий. Первое из них заключается в установлении величины постоянной составляющей температурной функции, которая определяется разницей значений температуры на концах образца и теряющейся при дифференцировании. Второе условие состоит в установлении связи абсолютных величин второй производной функции  $\Delta T(y)$  и функции  $\sigma(y)$ . Оба условия определяются дополнительными разовыми измерениями, играющими роль граничных условий при интегрировании дифференциальных уравнений.

Для интерпретации кинетических зависимостей термонапряжений использовалось то обстоятельство, что левые части уравнения (1) и уравнения, описывающего процесс теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

равны. С учетом этого обстоятельства, приравняв правые части уравнений, получим выражение

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k\sigma, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности. Из уравнения следует, что интегрированием функции  $\sigma(t)$  можно получить функцию  $\Delta T(t)$  при условии придания интегралу свойства определенного. Это условие выполняется подбором постоянной составляющей для экспериментальной функции такой величины, с учетом которой результат интегрирования приобретает вид монотонной функции, соответствующей реальной ситуации.

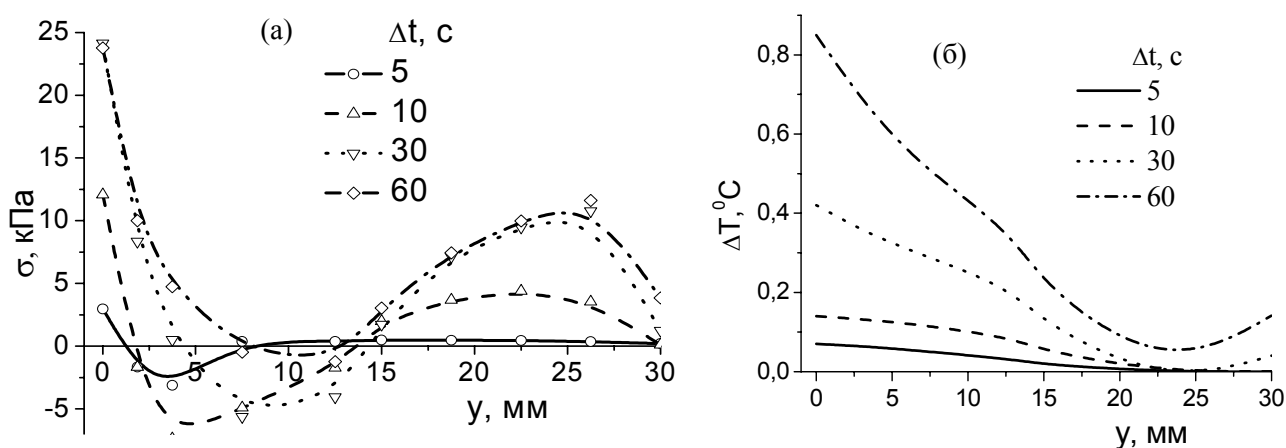


Рис. 1. Распределение механических напряжений вдоль координаты  $y$  в различные моменты времени  $\Delta t$  при непрерывном облучении образца со стороны поверхности  $y=0$  (а) и соответствующие распределения в образце температуры, превышающей комнатную (б)

Экспериментально полученные зависимости пространственного распределения механических напряжений, индуцированных радиационным нагревом, и результаты двойного графического интегрирования этих зависимостей, показаны на рис. 1. Из рисунка видно, что каждый из экстремумов на кривых рис. 1, а отражается соответствующей кривизной графиков рис. 1, б, как и должно быть в результате использованных операций интегрирования. Этим фактом радиационная термоупругость отличается от своего аналога, индуцированного контактным нагревом, при котором координатная функция температуры оказалась монотонной и имела вид однозначной экспоненты. Далее, на фоне температурной динамики радиационного происхождения в значительной степени проявилась кондуктивная компонента, являющаяся причиной замедленного изменения величины деформации и повышения температуры вдоль распространения теплового потока. О том, что тепловой поток имеет диффузионную природу, также свидетельствует движение вдоль оси  $y$  экстремумов отрицательного знака кривых на рис. 1, а, происхождение которых связано с точкой максимальной кривизны температурной функции. Кроме того, имеется внутренняя радиационная теплопередача, проявляющаяся в опережении теплопроводного

потока — у нижнего торца со временем возникает градиент температуры противоположного знака (повышенная температура края образца) за счет внутреннего отражения излучения от его полированной поверхности. Также интегрированием экспериментальных кинетических зависимостей механических напряжений (см. уравнение (3)) были получены временные распределения изменения температуры  $\Delta T(t)$  в фиксированных координатах образца. Характеристики  $\Delta T(y)$  и  $\Delta T(t)$  сравнивались с зависимостями, полученными при использовании полупроводникового микротермометра в тех же условиях. Получено качественное согласование всех пар кривых, а наблюдавшееся расхождение объясняется двумя причинами: во-первых, в уравнении (2) не учитывалась компонента, связанная с диссипацией тепловой энергии из-за конвективных и радиационных потерь, а во-вторых, микротермометр отображает поверхностную температуру, которая отличается от ее объемного значения.

Кинетика механического напряжения, регистрируемая при фиксированной координате, демонстрирует вне зависимости от механизма нагрева совместное проявление кондуктивной, радиационной и конвективной компонент теплопередачи, как в процессе нагрева, так и в процессе охлаждения. Анализ процесса радиационного нагрева показал, что его невозможно описать элементарными функциями, особенно на участке возрастания напряжения от нуля до первого экстремума. Видимо причиной тому является изменяющееся во времени соотношение интенсивностей всех трех механизмов теплопередачи. Иное дело обстоит с процессами контактного нагрева и последующего охлаждения. В данном случае характеристики механического напряжения обоих этих процессов совпадают с точностью до погрешности с применением операций инверсии и трансляции. Кинетика этих процессов свидетельствует, что они состоят из двух экспонент, отличающихся значениями характеристического времени. Есть основания предполагать, что в процессе с большим временем принимают параллельное участие две составляющие — кондуктивная и конвективная. Что же касается второго процесса (вторая экспонента с меньшим характеристическим временем), то его, судя по реакции сигнала на флуктуации воздушных потоков, можно связать с конвекцией как более скоростным теплоотводом. В таком случае не составляло труда вычислить из суммы обратных времен с учетом их противоположных знаков, определяющих параллельный процесс, параметр кондуктивной составляющей. Так же есть основания предполагать, что характеристическое время может содержать информацию об условиях опыта: форме образца, условиях теплоотвода и т. д.

Таким образом, анализ экспериментальных результатов показал, что в генерации и протекании явления термоупругости принимают участие в неопределенном соотношении интенсивностей все три составляющие теплопередачи при единственном внешнем физическом воздействии. Анализ релаксации величины напряжения позволил определить иерархию характеристических времен установления компонентов, участвующих в теплопередаче. А тот факт, что релаксационные характеристики напряжения с высокой степенью аппроксимируются экспоненциальными функциями, однозначно свидетельствует о пренебрежимой зависимости коэффициентов вещества (оптических, эластоупругих, теплопроводных) от температуры в используемом диапазоне.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Александров А.Я., Ахметдзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформированного тела.— Москва: Наука, 1973.
2. Никитенко Е.В., Сердега Б.К. Исследование свойств модулятора поляризации излучения в поляризационных оптических схемах. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.— 1998.— Вып.33.— С.102-108.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.5. — Москва: Мир, 1986.

**B. K. Serdega, I. E. Matyash, O. N. Mishchuk, I. A. Minailova**

#### **Contact and radiation thermoelasticity of solids in modulation polarimetry.**

The spatial-temporal distribution of thermal stresses induced by contact and radiant heating in the reference samples has been measured by modulation polarimetry method. The functions of temperature in time and space were obtained by solving the inverse problem of non-stationary thermoelasticity. Characteristic parameters of the heat transfer mechanisms were produced by analysis of thermal stresses dependency.

Key words: *thermal conductivity, thermoelasticity, anisotropy, birefringence, modulation polarization.*