

ДИНАМИКА СПЕКЛ-ПОЛЕЙ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

А. П. Ропот

Извлечь полезную информацию из оптического сигнала, имеющего шум (спеклы) можно с помощью различных методов обработки спекл-изображений [1,2]. Однако большинство методов требуют дорогостоящего специального оборудования. Поэтому поиск более простых подходов для диагностики качества материалов на основе анализа их спекл-изображений [напр.3] является актуальной задачей. В данной работе на базе указанных методов рассматривается возможность определения теплофизических характеристик материалов [4].

Среди множества способов определения термофизических свойств материалов особое место занимают оптические бесконтактные методы. Наиболее распространенными и «продвинутыми» среди них являются: «флеш-метод», метод импульсных динамических решёток; метод на основе фотоакустического эффекта и метод «эффект миража». Все они основаны на принципе возбуждения слабозатухающих акустических волн и нестационарных тепловых полей в материалах и различаются только методами «съема» информации. Так, например, во флеш-методе изменение температуры регистрируется термопарой на тыльной поверхности образца. В методе динамических решеток температуропроводность образца определяется посредством измерения времени релаксации дифракции на тепловой решётке. В фотоакустическом методе с помощью чувствительного микрофо-

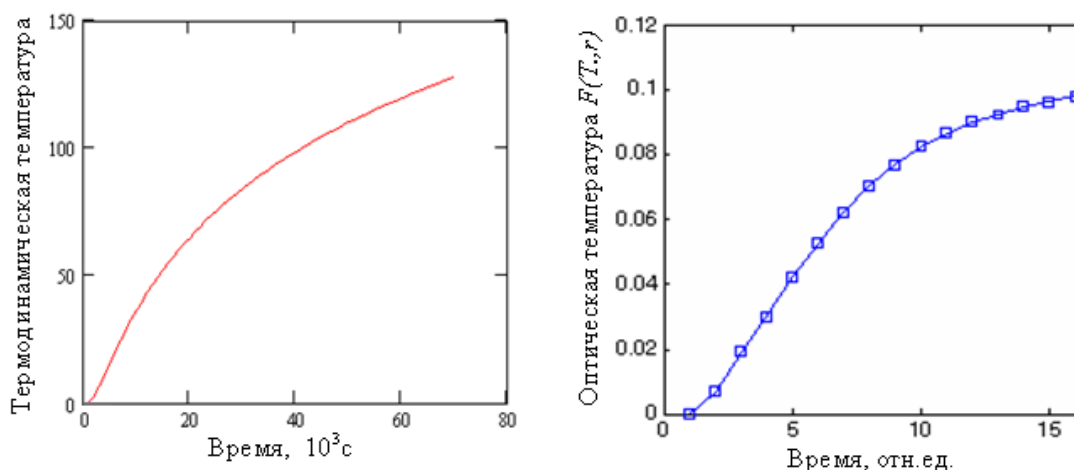


Рис. 1. Временная зависимость термодинамической температуры и ее оптического аналога

на в специальной камере регистрируется амплитуда и фаза акустической волны, созданной в газе, окружающем исследуемый образец. В мираж-методе исследуют зависимость отклонения зондирующего пучка, вызванного изменением показателя преломления на поверхности образца от расстояния между зондирующим пучком и областью нагревания.

Пространственно-временная модуляция, локализованная в амплитудно-фазовых профилях акустической или тепловой волны, переносится на поверхность материала, где «съем» информации может быть осуществлен и оптическим методом.

Пусть нестационарное тепловое поле на поверхности материала создается мощным лазерным импульсом. Процесс распространения этого поля вдоль поверхности образца описывается стандартным уравнением теплопроводности, решение которого имеет вид

$$T(x, t) = \frac{w}{c\rho} \int_0^t \frac{Q_1(t_1)}{\sqrt{4\pi k(t-t_1) + w^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4k(t-t_1) + w^2}\right) dt_1, \quad (1)$$

где T – термодинамическая температура, k – термодинамический потенциал, x и y – пространственные координаты, c и ρ – удельная теплоёмкость и плотность среды, Q – тепловое поле, созданное лазерным импульсом. Здесь предполагается, что тепловой источник однородный вдоль оси y и что его распределение вдоль x имеет вид гауссовой функции с полушириной w . Нестационарное тепловое поле оказывает воздействие на зондирующее излучение, которое и формирует динамику спекл-поля. Первая производная выражения (1) имеет максимум, при этом его положение зависит от величины коэффициента термической диффузии k , который в данном случае определяется формулой

$$k = \frac{2x^2 - w^2}{4t}, \quad (2)$$

где x – расстояние между областью нагрева и зондирования, t – промежуток времени от начала импульсного нагрева до момента достижения максимальной скорости изменения спекл-поля. В ходе эксперимента величиной w можно пренебречь.

Движение спекл-структуры будет описываться статистически. Для описания степени изменения спекл-картины была введена корреляционная функция:

$$\text{corr}(r, \tau) = \frac{\langle (I(r, 0) - \langle I(r, 0) \rangle) (I(r, \tau) - \langle I(r, \tau) \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (I(r, 0) - \langle I(r, 0) \rangle)^2 \rangle \langle (I(r, \tau) - \langle I(r, \tau) \rangle)^2 \rangle}}, \quad (3)$$

Величина $I(r, \tau)$ рассчитывается в фиксированные моменты времени, а усреднение проводится интегрированием по пространственной окрестности точки r . На основании экспериментальных результатов определяется момент достижения максимума скорости изменения спекл-поля путем нахождения экстремума производной по времени τ от корреляционной функции (3). Следующим шагом является экспериментальное доказательство того, что выбранный нами оптический отклик пропорционален изменению температуры.

Схема эксперимента обеспечивала реализацию одномерного случая, т.е. вдоль поверхности образца возбуждался нестационарный тепловой поток. Зондирование области теплового возмущения проводилось излучением He-Ne лазера, отражение которого формировало динамическое спекл-изображение поверхности образца. Последнее в свою очередь регистрировалось быстродействующей CCD-камерой.

Исследования проводились на двух образцах из одного металла с различным коэффициентом термической диффузии и теплопроводности. Была получена серия временных зависимостей корреляционных функций (3) на различных расстояниях z от теплового источника. Анализ указанных зависимостей показал, что в области близкой к источнику различие корреляционных функций для исследуемых образцов незначительное. Однако при удалении от источника теплового поля это различие возрастает, приобретая максимальное значение, а затем при дальнейшем увеличении z , снова уменьшается. Следовательно, существует оптимальная область z , где чувствительность метода будет максимальной.

Многочисленные экспериментальные измерения показали, что если ввести функцию

$$F(r, t) = 1 - \text{corr}(r, t), \quad (4)$$

то ее временное поведение аналогично поведению термодинамической температуры. Следовательно, можно предположить, что функцию (4) можно интерпретировать как оптический аналог термодинамической температуры металлического образца. Вышесказанное иллюстрируется рис. 1, где приведена зависимость термодинамической температуры, вычисленная из уравнения теплопроводности, и зависимость, полученная на основе экспериментальных данных, с помощью уравнения (4).

Основное сходство термодинамической температуры и её аналога в оптике $F(r, t)$ – наличие точки перегиба, т.е. точки максимума первой производной по времени. Как показали эксперименты, положение данной точки при удалении зондирующей области от источника теплового излучения смещается вправо по шкале времени. Данное утверждение иллюстрируется на рис. 2.

Измеряя положение максимума функции $dF(T, r)/dt$ и его смещение, и используя процедуру калибровки (масштабный коэффициент для экспе-

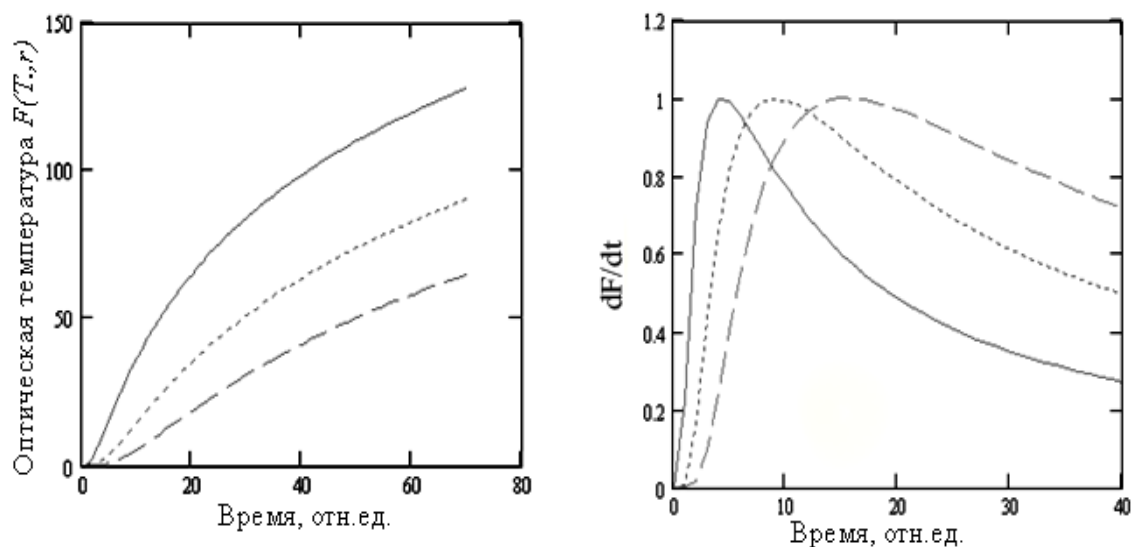


Рис. 2. Временное поведение оптического аналога температуры (а) и её производной (б) для трёх положений z .

риментальной установки), можно извлечь значение коэффициента коэффициента k .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проводимых экспериментов установлено, что временные и пространственные зависимости корреляционной функции $F(r, t) = 1 - \text{corr}(r, \tau)$ спекл-поля для металлов аналогичны соответствующим зависимостям для термодинамической температуры.

Анализируя динамику спекл-изображений поверхности образца, рассчитывают корреляционную функцию $\text{corr}(r, \tau)$, а измеряя положение максимума $d(\text{corr}(r, \tau))/dt$ и его смещение, определяют значение коэффициента термической диффузии k .

Литература

1. Франсон М. Оптика спеклов/ М. Франсон// Пер. с франц. под ред. Ю.И. Островского. М.: Мир, 1980.– 171с.
2. Рябухо В.П. Спекл- интерферометрия// Соровский образовательный журнал «Физика». 2002. Т. 7, №5. С. 1– 9.
3. Васильев Р. Ю., Ропот А. П. Исследование подповерхностных дефектов тонких покрытий// Конференция молодых учёных и специалистов "Современные проблемы физики". Минск, 2006.С. 199-202.
4. Хило Н. А., Ропот П. И., Казак Н. С., Белый В. Н., Мащенко А. Г., Оптический метод определения твёрдости металлов и сплавов// ЖПС, 2009.