



ОПТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ПЛЕНОК КАК ОСНОВА БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Д.Н. Хорунжий, В.В. Яцышен

Интерференционная лазерная термометрия

Инновационным направлением развития множества измерительных технологий является, без сомнения, разработка и внедрение эффективных бесконтактных методик. Термометрия является одной из приоритетных задач в этом направлении, поскольку, по различным оценкам, измерение температуры составляет до 50 % всех измерений, необходимых в ходе выполнения сложных технологических процессов.

Имеются эффективные методы бесконтактного измерения температуры, в частности, пирометрия по тепловому излучению хотя и является распространенным методом подобных измерений, тем не менее имеет одно существенное ограничение: ее эффективность как технологии пассивного измерения прямо зависит от температуры измеряемых объектов, и наилучшие результаты она демонстрирует для контроля высокотемпературных процессов.

Вместе с тем имеющаяся тенденция миниатюризации тесно связана с понижением температуры технологических процессов и, как следствие, с уменьшением эффективности данного метода.

Конечным результатом разрабатываемой технологии, описанной в статье, является использование тонкой диэлектрической пластинки в качестве температурного сенсора, входящего в состав активной лазерной измерительной установки. Данная методика бесконтактной термометрии является относительно новым, но уже сформировавшимся направлением среди дистанционных методов изме-

рения температуры. Ее основы описаны в достаточно большом количестве публикаций, в частности в книге А.Н. Магунова «Лазерная термометрия твердых тел»¹.

Доминирующая в настоящий момент технология подобного рода измерений предполагает использование оптической схемы, представленной на рисунке 1.

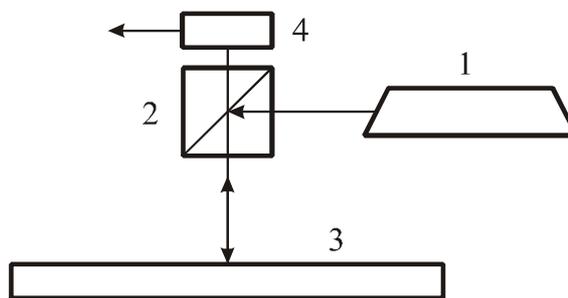


Рис. 1. Схема рефлектометрической измерительной системы:

1 – лазер; 2 – светоделительный кубик; 3 – датчик; 4 – фотоприемник

Как видно из приведенной схемы, основой метода является измерение интенсивности отраженного света, выполняемое при нормальном угле падения. Существенное влияние на измеряемую величину оказывает интерференция, возникающая в материале датчика. Под действием изменения температуры происходит изменение оптической толщины пластинки и, как следствие, изменение наблюдаемой величины отраженной интенсивности.

Интерпретация результатов позволяет по измеренной временной зависимости коэффициента отражения восстановить временную зависимость температуры датчика.

Двухпараметрическое измерение коэффициента отражения

К сожалению, методика интерференционной лазерной термометрии не свободна от ряда недостатков, главным из которых является то, что метод позволяет точно измерять лишь *изменение* температуры относительно известного в начальный момент времени значения. Другими словами, метод является дифференциальным. Это является прямым следствием того факта, что по единственному измерению коэффициента отражения в заданный момент времени невозможно сделать однозначного суждения об абсолютном значении температуры пластинки. И лишь измерение динамики данного параметра позволяет эффективно применять метод на практике.

Основная идея предлагаемой методики, позволяющей обойти это ограничение, состоит в том, чтобы увеличить количество одновременно измеряемых параметров.

Оригинальная идея данной схемы была предложена в работе G. Coppola, P. Ferrano, M. Iodice, S. De Nicola «Method of measuring the refractive index and the thickness of transparent plates with a lateral-shear, wavelength-scanning interferometer»² применительно к измерению коэффициента преломления пластинки, для чего авторами была предложена установка, представленная на рисунке 2.

Ключевым моментом является использование в установке лазера с распре-

деленной обратной связью, позволяющего производить перестройку рабочей частоты. В соответствии с данной методикой предлагается снимать зависимость коэффициента пропускания от двух параметров: длины волны и угла падения, что выполняется с помощью механического сканирования по углу падения, с использованием вращения образца на стенде, а также путем изменения длины волны излучения перестраиваемого лазера после каждого оборота платформы с образцом.

Это позволяет получить для материала пластинки двумерную зависимость, которая может быть сопоставлена с эталонной.

Для целей адаптации данной методики к задачам бесконтактной термометрии нами предлагается оптическая схема, представленная на рисунке 3.

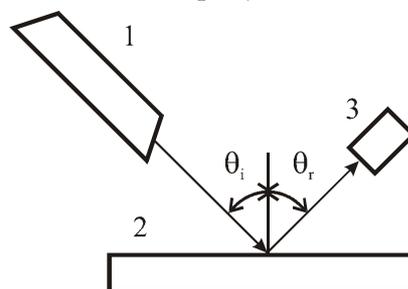


Рис. 3. Постановка эксперимента по снятию двумерной зависимости коэффициента отражения от угла и длины волны:

1 – лазер с распределенной обратной связью;
2 – датчик; 3 – фотоприемник

Основным ее отличием является измерение коэффициента отражения для раз-

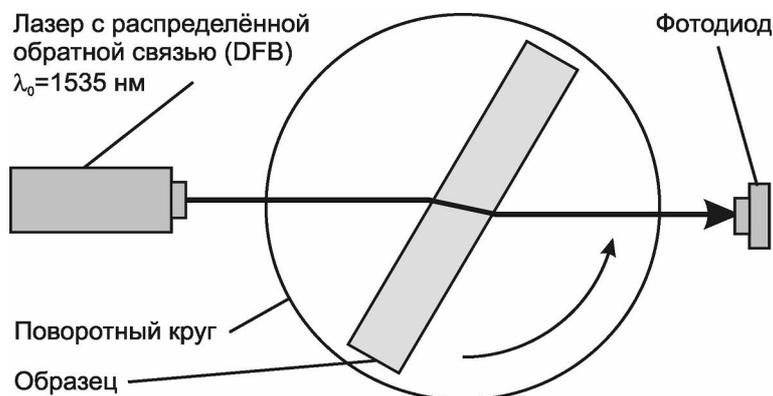


Рис. 2. Постановка эксперимента по снятию двумерной зависимости коэффициента отражения от угла и длины волны³

личных углов и длин волн. В данной схеме это достигается путем синхронного изменения углов падения и отражения. Все это также позволяет получить двумерную интерферограмму, которая может быть использована для диагностики температуры пластинки путем сопоставления теоретического и экспериментального графиков и вариации температурного параметра расчетного алгоритма.

Результаты численного расчета

Для численного моделирования двухпараметрической схемы измерения оптических параметров были использованы экспериментальные результаты работы G. Coppola, P. Ferrano, M. Iodice, S. De Nicola ⁴, которые были воспроизведены в ходе численного эксперимента.

Расчеты проводились с использованием специально написанного программного комплекса, использующего для вычисления оптических величин аппарат характеристических матриц, подробно описанный в работе Д.Н. Хоружия, В.В. Яцышена «Применение метода характеристических матриц при расчете оптических свойств диэлектрика с учетом температурных эффектов»⁵.

Основой данного аппарата является аппроксимация пластинки с помощью набора из нескольких тонких слоев, оптические характеристики которых в заданный момент времени постоянны.

При этом для описания прохождения электромагнитной волны через такой слой можно использовать матрицу слоя:

$$\begin{bmatrix} E_{(i-1)x} \\ H_{(i-1)y} \end{bmatrix} = M_i \cdot \begin{bmatrix} E_{ix} \\ H_{iy} \end{bmatrix},$$

которая устанавливает взаимосвязь между тангенциальными компонентами поля на входе и выходе (в данном случае для s-поляризации). Рассчитывая значения матриц каждого из слоев пластинки и используя свойство непрерывности тангенциальных компонент поля, можно получить общую матрицу системы:

$$M = \prod_{i=1}^N M_i = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix},$$

устанавливающую аналогичную взаимосвязь, только для падающей и прошедшей волн на входе и выходе всей системы. Матричные элементы такой матрицы могут быть использованы уже непосредственно для вычисления оптических коэффициентов, в частности амплитудных коэффициентов отражения и пропускания:

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} \times p_{N+1}) \times p_0 - (m_{21} + m_{22} \times p_{N+1})}{(m_{11} + m_{12} \times p_{N+1}) \times p_0 + (m_{21} + m_{22} \times p_{N+1})},$$

$$t = \frac{2 \times p_0}{(m_{11} + m_{12} \times p_{N+1}) \times p_0 + (m_{21} + m_{22} \times p_{N+1})}.$$

Поскольку в оригинальном эксперименте измерялся коэффициент пропускания *T*, то расчеты выполнялись также для него. Эмпирическая и рассчитанная зависимости приведены соответственно на рисунках 4 и 5.

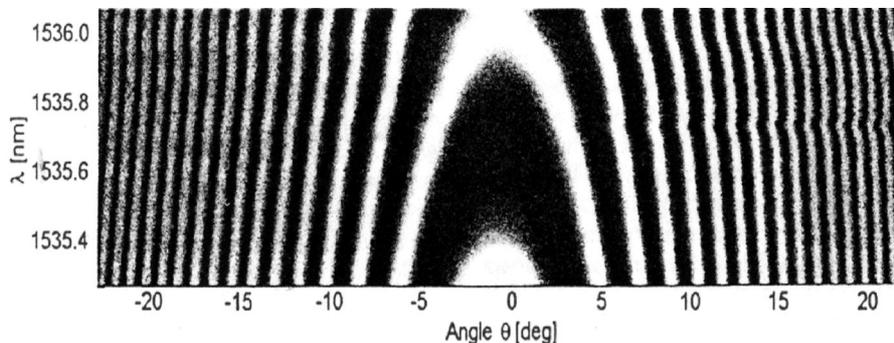


Рис. 4. Результаты эксперимента по снятию двумерной зависимости коэффициента пропускания от угла и длины волны ⁶

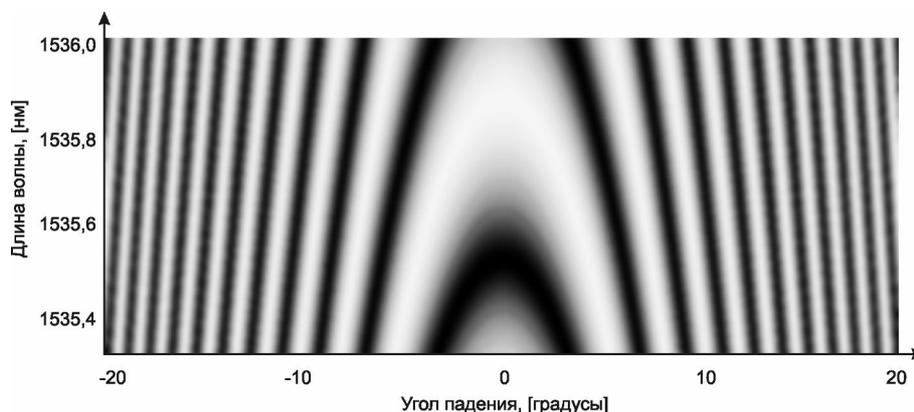


Рис. 5. Результаты численного расчета двумерной зависимости коэффициента пропускания от угла и длины волны

Сопоставляя двумерные интерферограммы с экспериментально проведенными измерениями, можно вычислять неизвестные параметры моделей, что находит применение на практике. К достоинствам данного метода можно отнести возможность определения абсолютного значения температуры.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Магунов А.Н. Лазерная термометрия твердых тел. М.: Физматлит, 2001. 224 с.

² Coppola G., Ferrano P., Iodice M., De Nicola S. Method of measuring the refractive index and the thickness of transparent plates with a lateral-shear, wavelength-scanning interferometer // *Applied Optics*. 2003. Vol. 42. № 19. 1 July. P. 3882–3887.

³ Ibid.

⁴ Ibid.

⁵ Хоружий Д.Н., Яцышен В.В. Применение метода характеристических матриц при расчете оптических свойств диэлектрика с учетом температурных эффектов // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2005. Т. 8. № 1. С. 22–25.

⁶ Coppola G., Ferrano P., Iodice M., De Nicola S. Op. cit.