

УДК 531.715

Д.А. Ермолаев, А.Ю. Махоньков, А.Я. Суранов

Использование дифракционного метода для измерения микроперемещений в линейной дилатометрии

В практике линейной дилатометрии для измерения микроперемещений обычно используется метод теневой проекции [1], заключающийся в регистрации координаты перепада свет-тень с помощью многоэлементного фотоприемника. В этом случае изменение положения перепада свет-тень линейно связано с изменением длины образца.

Недостатком данного метода является низкая чувствительность к перемещению и необходимость калибровки регистратора изображения. Указанные недостатки могут быть устранены при использовании методов измерения, основанных на волновых свойствах излучения. Из доступных для реализации волновых методов для решения задач дилатометрии целесообразно воспользоваться дифракционным методом.

При его использовании в состав измерительной схемы необходимо включить следующие элементы (рис. 1): источник когерентного излучения (лазер) 1; узкую щель 2, образованную подвижной полуплоскостью, жестко связанной с исследуемым образцом, и неподвижной полуплоскостью; устройство регистрации дифракционной картины на базе многоэлементного фотоприемника 3 и ЭВМ 4.

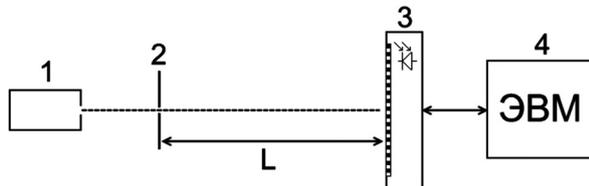


Рис. 1. Схема измерителя микроперемещений:
1 – лазер; 2 – узкая щель; 3 – многоэлементный фотоприемник; 4 – ЭВМ

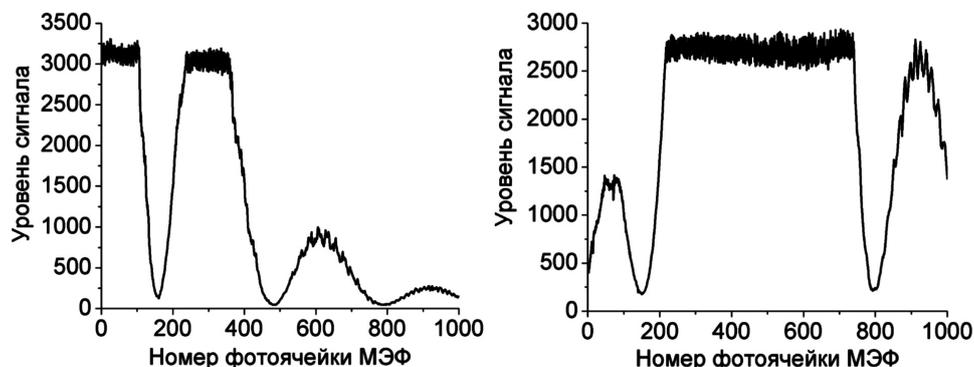


Рис. 2. Пример дифракционной картины на выходе с многоэлементного фотоприемника (МЭФ)

Изменение длины исследуемого образца равно изменению ширины щели. Из теории дифракции ширина щели может быть найдена по следующей формуле:

$$d \sin \phi_k = k \lambda, \quad (1)$$

где d – ширина щели; ϕ_k – угол, под которым будет наблюдаться k -й минимум (максимум) при дифракции света с длиной волны λ .

С другой стороны

$$\sin \phi_k = \frac{X_k}{L}, \quad (2)$$

где X_k – координата k -го минимума (максимума) относительно центра дифракционного распределения; L – расстояние от щели до многоэлементного фотоприемника.

Эта формула верна при условии $X_k \ll L$. Из формул (1) и (2) можно рассчитать значение ширины щели:

$$d = \frac{Lk\lambda}{X_k} \quad (3)$$

В большинстве случаев удобно измерять не координаты минимумов, а расстояния между ними. В этом случае под X_k следует понимать именно расстояние между i -м и $i+k$ -м минимумами.

На рисунке 2 показан пример дифракционной картины на выходе многоэлементного фотоприемника при расположении главного максимума дифракции на краю (слева) и в центре (справа). В обоих случаях наблюдается высокий уровень флуктуаций сигнала, обусловленный неоднородностью чувствительности многоэлементного фотоприемника и интерференцией излучения на входном стекле. В связи с этим целесообразно в качестве характерных точек дифракционного распределения выбрать минимумы. Для повышения точности оценки координат минимумов можно вос-

пользоваться методами локальной аппроксимации сигнала, в частности, наиболее простыми в реализации методами полиномиальной аппроксимации. При этом несимметричность распределения интенсивности в окрестности минимума делает необходимой применение кубической аппроксимации.

На этапе исследований возможности применения дифракционного метода для выполнения перечисленных операций обработки дифракционного распределения допустимо использовать программные пакеты, поддерживающие интерактивный режим работы, в частности пакет ORIGIN. При его использовании для измерения расстояния между минимумами необходимо указать границы области аппроксимации и найти точку минимума аппроксимирующего полинома. Как видно из рисунка 2, дифракционная картина может содержать два и более минимума. Использование в расчетах всех доступных минимумов позволяет значительно увеличить точность определения ширины щели. Для регистрации на многоэлементном фотоприемнике большого числа минимумов главный максимум дифракции необходимо располагать на краю либо использовать конструкцию из двух одинаковых многоэлементных фотоприемников с расположением главного максимума между ними.

Для оценки точности и линейности дифракционного метода был проведен ряд измерений ширины щели в двух диапазонах 50÷450 и 24÷25 мкм.

В первом диапазоне использовалась оптическая щель ЛОМО с шагом изменения ширины щели 1 мкм, показания которой принимались за действительные. Результаты измерений ширины щели в этом диапазоне приведены на рисунке 3.

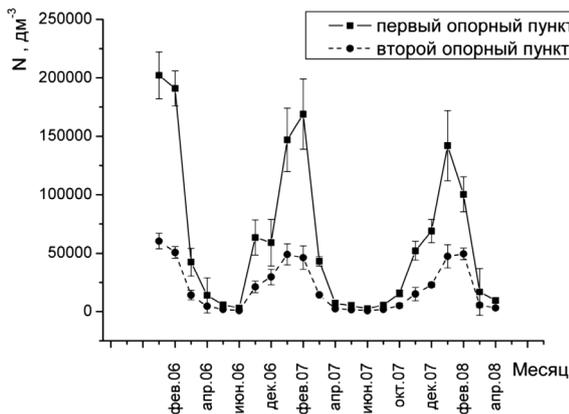


Рис. 3. Зависимость измеренной ширины от заданной в диапазоне 50÷450 мкм

График отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой приведен на рисунке 4. Максимальное относительное отклонение не превышает 0,6%.

Для изменения ширины щели во втором диапазоне применялся микроперемещатель, состоящий из четырех цилиндрических пьезоэлементов на основе керамики ЦТС-19 с общей длиной 64 мм. Для его

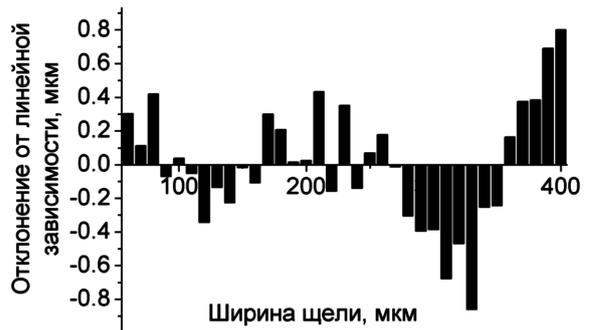


Рис. 4. Отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой

работы постоянное напряжение на обкладках пьезоэлементов изменялось в диапазоне 0÷1050 В с шагом 150 В. Напряжение контролировалось вольтметром В7-38 с точностью 1 В. Результаты измерения ширины щели в диапазоне 24÷25 мкм приведены на рисунке 5. Обнаруженная квадратичная зависимость изменения ширины щели от приложенного напряжения объясняется нелинейностью расширения пьезоэлементов. Отклонение экспериментальных значений от аппроксимирующей функции не превышает 0,07%.

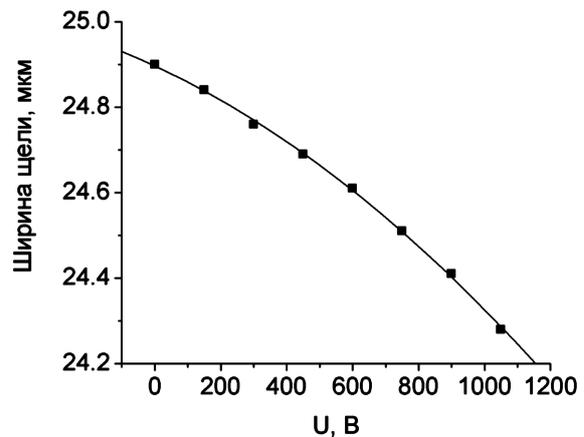


Рис. 5. Зависимость удлинения пьезоэлемента от подаваемого напряжения

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что дифракционный метод, положенный в основу работы устройства измерения перемещений на базе многоэлементного фотоприемника и ЭВМ, позволяет обеспечить высокую линейность и субмикронную точность в широком диапазоне перемещений. Для реализации данного метода необходимо разработать алгоритмы автоматизированного определения координат минимумов дифракционного распределения. Дополнительные резервы повышения точности связаны с коррекцией неоднородности чувствительности многоэлементного фотоприемника и с использованием пространственно-адаптивных методов регистрации одномерных изображений [2].

Библиографический список

1. Христофоров, Д.А. Дилатометр на базе многоэлементного фотоприемника для исследования термического расширения полимеров / Д.А. Христофоров, А.Б. Ключниченко // Физика, радиофизика – новое поколение в науке. – Барнаул, 1998. – Вып. 2.
2. Суранов, А.Я. Устройство фотометрирования изображений с выраженным максимумом пространственного распределения освещенности : патент РФ №2084842 / А.Я. Суранов // Б.И. – 1997. – №20.