

УДК 535.5.511

© В. В. Бобро, О. С. Дронь, Н. И. Комяк, А. И. Семененко

## ЭЛЛИПСОМЕТР, СОЧЕТАЮЩИЙ В СЕБЕ «НУЛЕВОЙ» И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ

Рассмотрены метрологические преимущества и особенности метрологической аттестации эллипсометра, сочетающего в себе «нулевой» и фотометрический подходы.

### ВВЕДЕНИЕ

Принципиальная схема эллипсометра допускает сочетание в одном приборе «нулевого» и фотометрического подходов. Однако на практике обычно используют один из этих подходов. Впервые указанное сочетание было реализовано в Институте аналитического приборостроения РАН (г. Санкт-Петербург). Базовый эллипсометр ЛЭФ 3М-1, выпускаемый ОАО «Феодосийский приборостроительный завод» и работающий по «нулевой» методике, был естественным образом (без конструктивных изменений) дополнен приставкой, позволяющей осуществить автоматизированный измерительный процесс Стокса-параметров по фотометрической схеме. Оптическая схема комбинированного прибора приведена на рисунке.

Схема ручного эллипсометра содержит источник света J — He-Ne лазер, поляризатор P, компенсатор C и анализатор A, установленные в лимбы с ручным приводом и шкалами отсчета, переключатель направления светового потока в виде поворотного зеркала Z и фотоприемник ФЭУ с усилителем и индикацией уровня сигнала (на схеме не показаны). Автоматизация измерений осуществляется за счет установки модулятора поляризации M и фотометрического блока ФД. Управление модулятором и цифровая обработка сигнала осуществляются посредством платы контроллера, устанавливаемой в IBM-совместимый компьютер (на схеме не показаны). Пакет программного обеспечения осуществляет все необходимые функции по управлению измерением и обработке данных (см. рекламный листок в этом номере журнала).

В режиме автоматических измерений (положение элементов в позиции 1) отраженное от образца S излучение модулируется модулятором M и пройдя анализатор попадает на фотоприемник ФД. Результатом измерения является полный вектор Стокса отраженного излучения [1].

В режиме ручного измерения (положение элементов в позиции 2) модулятор M выводится из оптического тракта, а сигнал попадает на фотоприемник ФЭУ. Таким образом, прибор работает

по стандартной схеме нуль-эллипсометра. Кроме очевидных преимуществ автоматизации измерений и более высокой точности по сравнению с зарубежными аналогами (см. рекламный листок). Стокс-эллипсометрия содержит больше информации об измеряемом объекте. Четыре параметра Стокса кроме чисто поляризационных параметров содержат также информацию о деполаризующих свойствах образца и об амплитудных коэффициентах отражения [1]. Модели реальной поверхности с учетом неоднородности и деполаризации более естественно и ясно формулируются в терминах Стокс-векторов и матриц Мюллера. Нуль-эллипсометрия в этом случае дает лишь некоторые эффективные значения  $\Psi$  и  $\Delta$ , которые трудно однозначно интерпретировать. Таким образом, можно сказать, что Стокс- и нуль-эллипсометрия измеряют несколько различные параметры исследуемых объектов. Совпадение значений  $\Psi$  и  $\Delta$ , вычисленных из результатов Стокс-измерений и измерений в режиме нуль-эллипсометрии, должно наблюдаться только для поверхности и пленок близких к идеально планарным с малой дисперсией в пределах измеряемого спектра и при строго параллельном пучке света

Комбинированная схема позволяет также оптимизировать измерения для каждого образца. Это достигается путем выбора оптимального состояния поляризации падающего излучения посредством установки соответствующих положений P и C.

В полуавтоматическом режиме возможно полное измерение анизотропии. Для этого проводятся четыре измерения при четырех комбинациях  $(P, C)_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), что дает возможность определить полную матрицу Мюллера исследуемой системы.

Принципиальной и важнейшей особенностью такого измерительного комплекса является возможность его метрологической саморегуляции. Физическая сущность метода эллипсометрии проявляется прежде всего через «нулевой» подход. Именно «нулевой» подход явным образом демонстрирует физику процессов, происходящих в приборе. Эллипсометр, действующий по «нулевой» схеме, очень чутко реагирует на все неблагоприятные факторы,

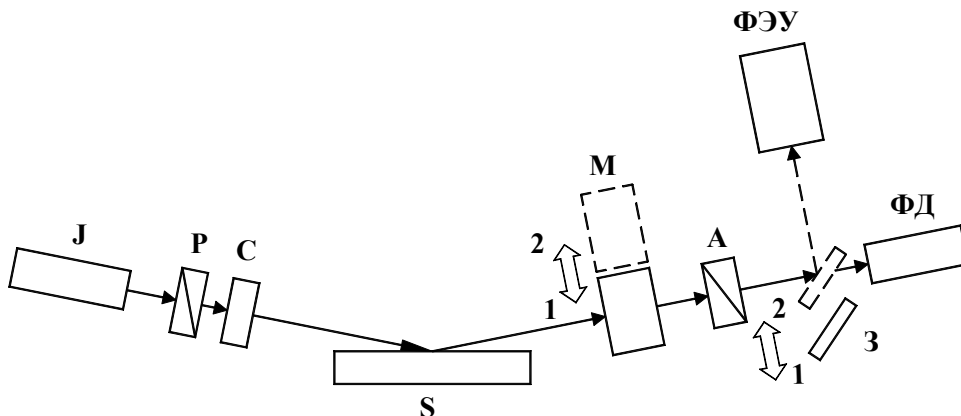


Рис. Оптическая схема комбинированного эллисометра

связанные с работой прибора. Это очень наглядно проявляется через измерительные зоны прибора [2, 3]. Для экспериментальных значений поляризационных углов  $\Psi$  и  $\Delta$ , как правило, наблюдается заметный разброс по измерительным зонам, обусловленный нарушениями в оптической юстировке, неточным определением параметров фазового компенсатора, сбоями в системе термостатирования узла компенсатора и т.д.

В соответствии с такими особенностями «нулевой» методики в работах [4–6] предложен новый подход к эллисометрической метрологии. В рамках этого подхода разброс экспериментальных значений углов  $\Psi$  и  $\Delta$  по измерительным зонам, включающий в себя влияние как свойств прибора, так и свойств образца, может рассматриваться как объективный метрологический критерий, определяющий точность измерения поляризационных углов. Данный метрологический критерий не отменяет аттестацию элементов прибора по классической метрологической схеме. Межзонный разброс поляризационных углов является итоговым, или, можно сказать, интегральным критерием для прибора, все элементы которого прошли аттестацию по классической метрологической схеме.

Использование интегрального метрологического критерия не является столь простой задачей, как может показаться на первый взгляд. Это связано с тем, что разброс  $\delta\Psi$ ,  $\delta\Delta$  поляризационных углов по измерительным зонам определяется не только свойствами прибора, но и качеством исследуемых образцов. Математически это можно выразить следующими формулами:

$$\delta\Psi = \delta\Psi^{np} + \delta\Psi^{obr}, \quad \delta\Delta = \delta\Delta^{np} + \delta\Delta^{obr}, \quad (1)$$

где  $\delta\Psi^{np}$ ,  $\delta\Delta^{np}$  и  $\delta\Psi^{obr}$ ,  $\delta\Delta^{obr}$  — составляющие полного разброса  $\delta\Psi$ ,  $\delta\Delta$  по измерительным зонам, обусловленные свойствами прибора и качеством поверхности исследуемого образца соответственно.

Применительно к метрологическому прибору и эталонному образцу формула (1) запишется

$$\delta\Psi_{m,z} = \delta\Psi_{m,z}^{np} + \delta\Psi_{m,z}^{obr}, \quad \delta\Delta_{m,z} = \delta\Delta_{m,z}^{np} + \delta\Delta_{m,z}^{obr}, \quad (2)$$

где  $\delta\Psi_{m,z}$ ,  $\delta\Delta_{m,z}$  — полный межзонный разброс на метрологическом приборе для эталонного образца, а смысл остальных обозначений вытекает из разъяснений к формуле (1).

В случае высококачественных образцов, когда

$$\delta\Psi_{m,z}^{obr} \ll \delta\Psi_{m,z}^{np}, \quad \delta\Delta_{m,z}^{obr} \ll \delta\Delta_{m,z}^{np}, \quad (3)$$

общий разброс определяется преимущественно свойствами прибора

$$\delta\Psi_{m,z} \approx \delta\Psi_{m,z}^{np}, \quad \delta\Delta_{m,z} \approx \delta\Delta_{m,z}^{np}. \quad (4)$$

Таким образом, при выполнении условий (3) общий разброс на эталонных образцах определяет чисто приборные погрешности метрологического эллисометра, поэтому и необходимы для метрологических целей эталонные образцы высокого качества.

При аттестации «нулевого» рабочего прибора (в данном случае «нулевой» схемы базового прибора ЛЭФ 3М-1) можно исходить из предположения, что составляющая межзонного разброса на эталонных образцах, обусловленная качеством этих образцов, практически, одинакова для метрологического и рабочего приборов. А поскольку

чисто приборные погрешности рабочего эллипсометра больше по сравнению с метрологическим, то условие, аналогичное условию (3), имеет место и для рабочего прибора. Это означает, что приборные погрешности  $\delta\Psi_{p,\varepsilon}^{np}$ ,  $\delta\Delta_{p,\varepsilon}^{np}$  рабочего эллипсометра также определяются преимущественно полным межзонным разбросом  $\delta\Psi_{p,\varepsilon}$ ,  $\delta\Delta_{p,\varepsilon}$  на эталонных образцах

$$\delta\Psi_{p,\varepsilon} \approx \delta\Psi_{p,\varepsilon}^{np}, \quad \delta\Delta_{p,\varepsilon} \approx \delta\Delta_{p,\varepsilon}^{np}. \quad (5)$$

При аттестации «нулевого» рабочего прибора главной задачей по-прежнему является установление минимальных значений межзонного разброса для каждого эталонного образца. В случае необходимости проводятся работы по дальнейшей доводке данного прибора. При этом ориентиром являются результаты, полученные на метрологическом «нулевом» эллипсометре.

Аттестацию фотометрической схемы базового эллипсометра ЛЭФ 3М-1 целесообразно проводить в рамках нового метрологического подхода, используя эталонные образцы, охарактеризованные по межзонному разбросу, определяемому в основном свойствами прибора. Первоначально каждый эталонный образец будем характеризовать межзонным разбросом  $\delta\Psi_{m,\varepsilon}$ ,  $\delta\Delta_{m,\varepsilon}$ , установленным на образцовом эллипсометре «нулевого» типа. При этом межзонный разброс удобнее определить не как максимальные отклонения внутризонных значений поляризационных углов от их усредненных значений, а как интервал, образованный крайними значениями внутризонных углов. Согласно этому определению,

$$\delta\Psi_{m,\varepsilon} = \delta\Psi_{m,\varepsilon}^{(2)} - \delta\Psi_{m,\varepsilon}^{(1)}, \quad \delta\Delta_{m,\varepsilon} = \delta\Delta_{m,\varepsilon}^{(2)} - \delta\Delta_{m,\varepsilon}^{(1)}, \quad (6)$$

где  $\delta\Psi_{m,\varepsilon}^{(1)}$ ,  $\delta\Delta_{m,\varepsilon}^{(1)}$  и  $\delta\Psi_{m,\varepsilon}^{(2)}$ ,  $\delta\Delta_{m,\varepsilon}^{(2)}$  — граничные значения внутризонных углов  $\Psi$  и  $\Delta$ .

Естественно предположить, что истинные значения поляризационных углов для эталонных образцов  $\Psi_\varepsilon$  и  $\Delta_\varepsilon$  располагаются внутри интервалов межзонного разброса

$$\Psi_\varepsilon \in (\Psi_{m,\varepsilon}^{(1)}, \Psi_{m,\varepsilon}^{(2)}), \quad \Delta_\varepsilon \in (\Delta_{m,\varepsilon}^{(1)}, \Delta_{m,\varepsilon}^{(2)}). \quad (7)$$

Теперь можем оценить ошибки  $\delta\Psi_{\phi,\varepsilon}$  и  $\delta\Delta_{\phi,\varepsilon}$  в определении поляризационных углов эталонного образца по фотометрической схеме базового прибора ЛЭФ 3М-1. Если определенные по фотометрической схеме значения  $\Psi_{\phi,\varepsilon}$  и  $\Delta_{\phi,\varepsilon}$  располагаются вне интервалов межзонного разброса (7) и, для определенности слева от этих интервалов, то с учетом (7) можем записать

$$\delta\Psi_{\phi,\varepsilon} = |\Psi_{\phi,\varepsilon} - \Psi_\varepsilon| < |\Psi_{\phi,\varepsilon} - \Psi_{m,\varepsilon}^{(2)}|, \quad (8)$$

$$\delta\Delta_{\phi,\varepsilon} = |\Delta_{\phi,\varepsilon} - \Delta_\varepsilon| < |\Delta_{\phi,\varepsilon} - \Delta_{m,\varepsilon}^{(2)}|. \quad (9)$$

Верхние границы ошибок, определяемые формулами (8) и (9), в рассматриваемом случае всегда больше соответствующих величин межзонного разброса

$$|\Psi_{\phi,\varepsilon} - \Psi_{m,\varepsilon}^{(2)}| > \delta\Psi_{m,\varepsilon}, \quad |\Delta_{\phi,\varepsilon} - \Delta_{m,\varepsilon}^{(2)}| > \delta\Delta_{m,\varepsilon}, \quad (10)$$

но сами ошибки могут быть и меньше этих величин.

Если же измеренные по фотометрической схеме значения  $\Psi_{\phi,\varepsilon}$  и  $\Delta_{\phi,\varepsilon}$  располагаются внутри интервалов межзонного разброса (7), то очевидно

$$\delta\Psi_{\phi,\varepsilon} < \delta\Psi_{m,\varepsilon}, \quad (11)$$

$$\delta\Delta_{\phi,\varepsilon} < \delta\Delta_{m,\varepsilon}. \quad (12)$$

Казалось бы, не существует никакой связи между аттестацией «нулевой» и аттестацией фотометрической схем базового прибора. Однако корреляция между этими схемами существует. Если интервалы межзонного разброса на эталонном образце при переходе от образцового эллипсометра к «нулевой» схеме базового прибора не только расширяются, но и заметно сдвигаются, то это указывает на существенные погрешности базового прибора, например в его юстировке, что неизбежно сказывается на результатах измерения по фотометрической схеме. Фактически это означает, что при переходе от образцового к рабочему прибору усредненные по измерительным зонам значения поляризационных углов для эталонного образца не должны заметно изменяться. Регулируя этот фактор при аттестации «нулевой» схемы базового прибора, мы одновременно уточняем калибровочные параметры фотометрической схемы. Можно сказать, что в какой-то мере имеет место метрологическая саморегуляция измерительного эллипсометрического комплекса, сочетающего в себе «нулевой» и фотометрический подходы.

В то же время следует предостеречь против переоценки роли усредненных по зонам углов  $\Psi$  и  $\Delta$ . В общем случае они могут заметно отличаться от истинных значений поляризационных углов, и определяется это в первую очередь свойствами поверхности.

Корреляция между «нулевой» и фотометрической схемами базового прибора на самом деле гораздо глубже. Проявляется это при исследовании неоднородных поверхностей и связано с возможностями обоих подходов по исследованию таких поверхностей. В дальнейшем мы вернемся к этому вопросу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 583 с. *Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург*  
(Н. И. Комяк, О. С. Дронь)
2. Ржанов А.В., Свитаев К.К., Семененко А.И. и др. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с. *Институт прикладной физики НАН Украины, г. Сумы*  
(А. И. Семененко)
3. Семененко А.И. // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 45, № 1. С. 199–201. *ОАО «Феодосийский приборостроительный завод»*  
(В. В. Бобро)
4. Семененко А.И., Бобро В.В. // Автометрия. 1997. № 1. С. 43–49.
5. Semenenko A.I., Bobro V.V., Mardezhov A.S., Semenenko E.M. // Proc. SPIE. 1998. V. 3485. P. 336–342.
6. Бобро В.В., Семененко А.И. // Научное приборостроение. 2000. Т. 10, № 1. С. 65–69. *Материал поступил в редакцию 07.04.2000.*

## ELLIPSOMETER COMBINING THE ZERO AND PHOTOMETRIC APPROACHES

V. V. Bobro<sup>1</sup>, O. S. Dron, N. I. Komyak, A. I. Semenenko<sup>2</sup>

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

<sup>1</sup>*OAO «Feodosia Instrument Engineering Plant»*

<sup>2</sup>*Institute of Applied Physics, the Ukraine NAS, Sumy*

The metrological advantages and specific features of metrological certification of an ellipsometer combining the zero and photometric approaches are discussed.