

УДК 535.5:531.7

© В. В. Бобро

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСАТОРА ЭЛЛИПСОМЕТРА

В современных эллипсометрах в качестве компенсатора чаще всего используется пластина одноосного кристалла с оптической осью, лежащей в плоскости пластины. Температурная неустойчивость эллипсометрических результатов при использовании данного компенсатора обусловлена его большой толщиной. Рассмотрен двойной компенсатор, состоящий из двух пластин одноосного кристалла, оптические оси которых лежат в плоскости пластин и взаимно перпендикулярны. Указаны его достоинства и недостатки. Как альтернатива ему предложено использование в качестве компенсатора пластины одноосного кристалла с оптической осью, образующей с нормалью к пластине сравнительно небольшой угол  $\theta$ . Такой компенсатор может существенно снизить экспериментальные ошибки, связанные с температурными колебаниями.

### ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой, непосредственно связанной с точностью эллипсометрических измерений, является температурная неустойчивость параметров компенсатора. В современных эллипсометрах в качестве компенсатора чаще всего используется пластина одноосного кристалла с оптической осью, лежащей в плоскости пластины. Фазовый параметр  $\delta$  такого компенсатора описывается приближенной формулой [1]

$$\delta \approx \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_o), \quad (1)$$

где  $n_e = \sqrt{\varepsilon_{||}}$ ,  $n_o = \sqrt{\varepsilon_{\perp}}$ ;  $d$  — толщина пластины;  $\lambda$  — длина плоской монохроматической электромагнитной волны;  $\varepsilon_{||}$  и  $\varepsilon_{\perp}$  — главные значения тензора диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ik}$ , отвечающие соответственно оптической оси и двум другим эквивалентным главным осям тензора.

Температурная неустойчивость эллипсометрических результатов при использовании данного компенсатора обусловлена его большой толщиной. На практике обычно используются значения толщин  $d \approx 1500$ – $2000$  мкм. При такой толщине температурные колебания показателей преломления  $n_e$  и  $n_o$ , проявляющиеся в шестом или седьмом знаке после запятой, а также температурные колебания самой толщины  $d$  приводят к заметным изменениям фазового параметра  $\delta$ , что существенно сказывается на точности эллипсометрических измерений.

Обычный компенсатор (с оптической осью, лежащей в плоскости пластины), фазовый параметр  $\delta$  которого определяется формулой (1), становится термостойчивым при очень малых толщинах.

Малая толщина может быть достигнута, если пластина одноосного кристалла наклеивается на изотропную стеклянную подложку толщиной 1500–2000 мкм и затем путем шлифовки и полировки доводится до необходимой малой толщины. При этом изотропная стеклянная подложка становится составной частью компенсатора. Такие компенсаторы, обладающие хорошей термостойкостью, существуют. Единственным их недостатком является сложная технология изготовления.

### ДВОЙНОЙ КОМПЕНСАТОР

Улучшенным вариантом рассмотренного компенсатора (по температурной устойчивости) является двойной компенсатор [1], состоящий из двух пластин одноосного кристалла, оптические оси которых лежат в плоскости пластин и взаимно перпендикулярны (см. рис. 1).

Для случая, когда "быстрая" ось пластины 2 совпадает с плоскостью падения (соответственно "быстрая" ось пластины 1 перпендикулярна

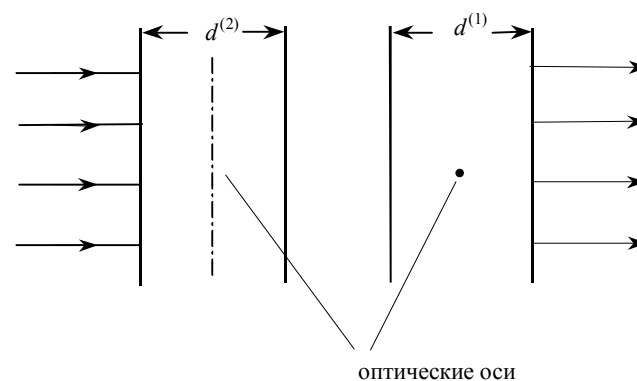


Рис. 1. Двойной компенсатор

к плоскости падения), матрицы Джонса пластин имеют следующий вид [1]:

$$L_k^{(1)} \sim \begin{Bmatrix} \rho^{(1)} & 0 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix}, \quad L_k^{(2)} \sim \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho^{(2)} \end{Bmatrix},$$

где  $\rho^{(1)} = f^{(1)} \exp(-i\delta^{(1)})$ ,  $\rho^{(2)} = f^{(2)} \exp(-i\delta^{(2)})$ .

Тогда матрица Джонса двойного компенсатора запишется:

$$L_k = L_k^{(1)} L_k^{(2)} \sim \rho^{(1)} \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho^{(2)}/\rho^{(1)} \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Представим ее в стандартном виде

$$L_k \sim \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

Сравнивая (2) и (3), находим параметр  $\rho(f, \delta)$  двойного компенсатора:

$$\rho = \frac{\rho^{(2)}}{\rho^{(1)}} = \frac{f^{(2)}}{f^{(1)}} \exp(-i(\delta^{(2)} - \delta^{(1)})) = f \exp(-i\delta),$$

откуда

$$f = \frac{f^{(2)}}{f^{(1)}}, \quad \delta = \delta^{(2)} - \delta^{(1)}. \quad (4)$$

Двойной компенсатор всегда представлял интерес в связи с возможностью реализации идеальных значений параметров:

$$f = 1, \quad \delta = 90^\circ. \quad (5)$$

Чтобы реализовать ситуацию, когда

$$\frac{f^{(2)}}{f^{(1)}} = 1, \quad \delta^{(2)} - \delta^{(1)} = 90^\circ, \quad (6)$$

необходимо выбирать такие области толщин  $d^{(2)}$  и  $d^{(1)}$  ( $d^{(2)} > d^{(1)}$  и  $d^{(2)} \approx d^{(1)}$ ), для которых

$$\begin{aligned} \delta^{(2)} &\approx 180^\circ m + 45^\circ, \\ \delta^{(1)} &= \delta^{(2)} - 90^\circ \approx 180^\circ m - 45^\circ, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$m = 2, 3, 4.$$

Эти области характеризуются примерно одинаковыми амплитудами осцилляций параметров  $f^{(1)}$  и  $f^{(2)}$ ,  $\delta^{(1)}$  и  $\delta^{(2)}$ , что почти обеспечивает выполнение условий (6) и, следовательно, условий (5) (см. [1]). По той же причине, а также в связи с малым различием толщин  $d^{(2)}$  и  $d^{(1)}$  (это соответствует соотношениям (7)) температурные изменения параметров  $f^{(1)}$  и  $f^{(2)}$ ,  $\delta^{(1)}$  и  $\delta^{(2)}$  практически одинаковы,

а это означает, как следует из формул (4), существенное снижение температурной зависимости параметров  $f$  и  $\delta$  двойного компенсатора.

### КОМПЕНСАТОР С ОПТИЧЕСКОЙ ОСЬЮ, ВЫВЕДЕННОЙ ИЗ ПЛОСКОСТИ ПЛАСТИНЫ ОДНООСНОГО КРИСТАЛЛА

Ситуация коренным образом изменится [2], если в качестве компенсатора использовать пластину одноосного кристалла с оптической осью, расположенной под углом  $\theta$  к нормали пластины (рис. 2).

Электромагнитная волна произвольной поляризации, падающая на такую пластину вдоль ее нормали, внутри пластины распадается на обыкновенную и необыкновенную волны. Необыкновенная волна поляризована в плоскости, образованной оптической осью и нормалью, а обыкновенная поляризована линейно в перпендикулярном к указанной плоскости направлении. Волновые векторы  $k_e$  и  $k_0$  данных волн различны и определяются формулами, полученными из волнового уравнения Френеля [3]:

$$\begin{aligned} k_e &\cong \frac{2\pi}{\lambda} [n_0 + (n_e - n_0) \sin^2 \theta - \\ &\quad - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{n_{(0)}} (n_e - n_0)^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta, \\ k_0 &= \frac{2\pi}{\lambda} n_0. \end{aligned}$$

На выходе из пластины между обыкновенной и необыкновенной волнами возникает разность фаз

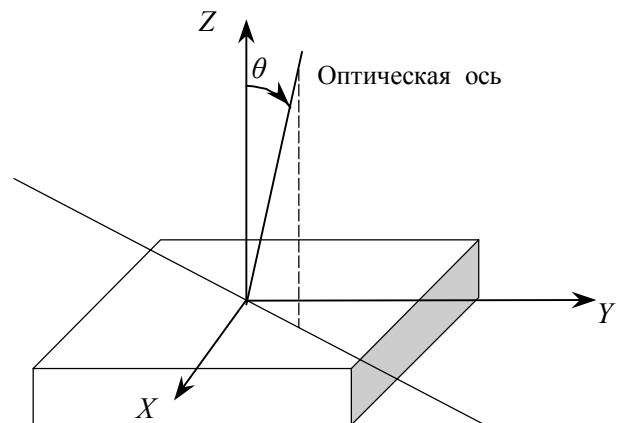


Рис. 2. Компенсатор с оптической осью, выведенной из плоскости пластины одноосного кристалла

$$\delta \approx (k_e - k_0) \cdot d \approx \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_0) \sin^2 \theta, \quad (8)$$

которая и представляет собой фазовый параметр пластины одноосного кристалла с произвольной ориентацией оптической оси. Формулу (8) для  $\delta$  перепишем в виде, аналогичном формуле (1), т.е. в виде, характерном для обычного компенсатора, у которого оптическая ось лежит в плоскости пластины ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\sin \theta = 1$ ):

$$\delta \approx \frac{2\pi d_{\text{эф}}}{\lambda} (n_e - n_0), \quad (9)$$

где

$$d_{\text{эф}} = d \sin^2 \theta. \quad (10)$$

Минимальное значение  $d_{\text{эф}}$ , обеспечивающее разность фаз  $\delta = \pi/2$ , находится с помощью формулы (9)

$$(d_{\text{эф}})_{\min} = \frac{\lambda}{4(n_e - n_0)}. \quad (11)$$

Считая толщину пластины  $d$  заданной в интервале  $d \approx 1500\text{--}2000$  мкм, найдем с помощью формул (10) и (11) минимальное значение  $\sin \theta$ , обеспечивающее разность фаз  $\delta = \pi/2$ :

$$(\sin \theta)_{\min} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{d(n_e - n_0)}}.$$

Рассмотрим для примера пластину кристаллического кварца с параметрами:

$$d = 1570 \text{ мкм}, \quad (n_e - n_0) \approx 0.01, \quad \lambda = 0.6328 \text{ мкм}.$$

В этом случае  $(\sin \theta)_{\min} = 0.1$ , т.е.  $\theta_{\min} \approx 5.5^\circ$ ,  $(d_{\text{эф}})_{\min} \approx 15.7$  мкм.

Формулы (1) и (9) аналогичны, но во втором случае  $d_{\text{эф}}$  на два порядка меньше реальной толщины, а это означает, что температурные колебания фазового параметра  $\delta$  снижаются в рассматриваемом случае также на два порядка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компенсатор с оптической осью, образующей угол  $\theta$  с нормалью к плоскости пластины ( $\theta \ll 90^\circ$ ), обладающий значительной температурной устойчивостью, имеет по сравнению с двойным компенсатором ряд существенных преимуществ, главные из которых следующие:

— гораздо большая простота в изготовлении, связанная с низкой чувствительностью (на два порядка меньшей по сравнению с двойным компенсатором) к изменению толщины пластины (изменению толщины в 1 мкм соответствует изменение фазового параметра всего лишь на 3 мин);

— простота оптической юстировки (отсутствует необходимость в процедуре по установлению соосности и параллельности пластин);

— фазовый параметр каждой из пластин двойного компенсатора составляет  $180^\circ m \pm 45^\circ$  ( $m$  — целое число), а в этой области контроль фазового параметра в процессе изготовления пластин оказывается более сложным, чем при  $\delta \approx 90^\circ$ ;

— не существует особых требований к точности задания угла  $\theta$  для предлагаемого компенсатора.

Таким образом, использование в качестве компенсатора пластины одноосного кристалла с оптической осью, образующей с нормалью к пластине сравнительно небольшой угол  $\theta$ , может коренным образом изменить ситуацию в эллипсометрии, существенно снизив экспериментальные ошибки, связанные с температурными колебаниями параметров компенсатора. Технология изготовления предложенного термоустойчивого компенсатора разработана на ОАО "Феодосийский приборостроительный завод".

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржанов А. В., Свитащев К. К., Семененко А. И. и др. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с.
2. Семененко А. И., Бобро В. В. О метрологическом обеспечении эллипсометрии (общий подход) // Автометрия. 1997. № 1. С. 43–49.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматгиз, 1959. 532 с.

**ОАО "Феодосийский приборостроительный завод", Украина**

Материал поступил в редакцию 04.07.2001.

## PROVIDING THE TEMPERATURE STABILITY OF THE COMPENSATOR PARAMETERS IN THE ELLIPSOMETER

V. V. Bobro

*OAS "Feodosya Instrument-Making Plant" Feodosya, Ukraine*

In modern ellipsometers, the compensator is often a plate of a uniaxial crystal with the optical axis lying in the plate plane. The temperature variations of the ellipsometry data are due to the large thickness of the compensator used. A double compensator is proposed, consisting of two uniaxial crystal plates, with optical axes lying in the plate plane and being mutually perpendicular. It is shown that using as a compensator the uniaxial crystal plate with the optical axis making a relatively small angle  $\theta$  with the plate normal, one can radically change the situation in ellipsometry by reducing essentially experimental errors due to temperature variations.