

УДК 535.51. 541.1

И.В. ИВАШКЕВИЧ, Н.А. КРЕКОТЕНЬ, А.Н. ПЕТЛИЦКИЙ,  
И.У. ПРИМАК, Л.И. СОТСКАЯ, А.Б. СОТСКИЙ, Н.И. СТАСЬКОВ

## КОНТРОЛЬ ОРИЕНТАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ ПОДЛОЖКИ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЛИПСОМЕТРА С БИНАРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Предложена методика определения ориентации оптической оси подложки при помощи эллипсометра с бинарной модуляцией состояния поляризации света. Выполнены экспериментальные исследования сапфировой подложки на спектральном эллипсометре ES-2. Обсуждаются погрешности решения обратной задачи.

### Введение

В микроэлектронике существует потребность в эллипсометрическом контроле кремниевых слоев, наносимых на одноосно-анизотропные подложки. Для решения соответствующих обратных задач необходимо предварительное определение ориентации оптической оси подложки, которая характеризуется углом  $\theta_c$  ( $0^\circ \leq \theta_c \leq 90^\circ$ ) между вектором оптической оси  $\mathbf{c}$  и нормалью к подложке, а также углом  $\Delta\alpha$  ( $0^\circ \leq \Delta\alpha \leq 360^\circ$ ) между проекцией вектора  $\mathbf{c}$  на плоскость подложки и некоторым реперным вектором  $\mathbf{a}$ , лежащим в этой плоскости (рис. 1). Известные методы исследования ориентации оптической оси кристалла [1, 2], ввиду своей общности, достаточно сложны. В настоящей статье предлагается более простой метод решения этой задачи, использующий обработку экспериментальных данных, получаемых с помощью автоматизированного спектрального эллипсометра ES-2 с бинарной модуляцией состояния поляризации света.

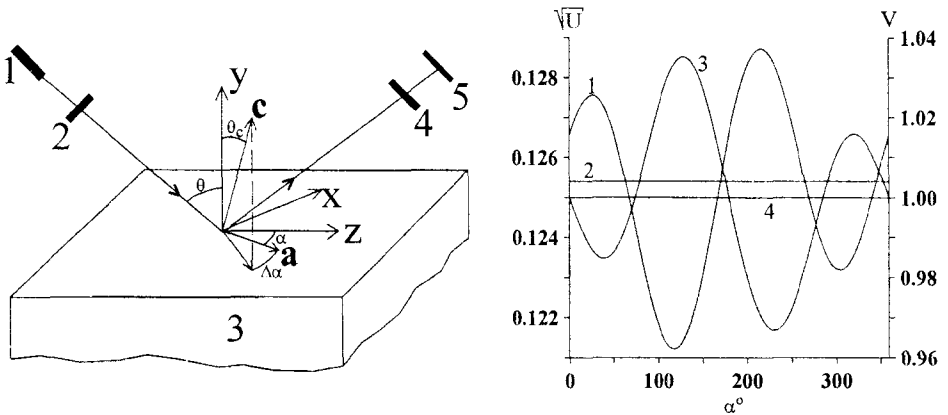


Рис. 1. Геометрия задачи (1 – источник оптического излучения, 2 – поляризатор, 3 – подложка, 4 – анализатор, 5 – фотоприемник) и расчетные зависимости  $U(\alpha)$  (1,2),  $V(\alpha)$  (3, 4). Зависимости 1 и 3 соответствуют монокристаллу сапфира ( $\varepsilon_o = (1,766)^2$ ,  $\varepsilon_e = (1,757)^2$ ); 2 и 4 – изотропной подложке с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 0,5(\varepsilon_o + \varepsilon_e)$ . При вычислениях использо-

ваны значения  $A = 9,5^\circ$ ,  $P = 29,81^\circ$ ,  $\theta = 65^\circ$ ,  $\theta_c = 60^\circ$ ,  $\Delta\alpha = 0^\circ$

**Основная часть**

Эллипсометр ES-2 имеет конфигурацию поляризатор-образец-анализатор (рис. 1) [3]. На вход фотодетектора прибора поступает интенсивность

$$I(A, P) = I_0 \left| \left( \frac{R_{pp}}{R_{ss}} \cos P - \frac{R_{ps}}{R_{ss}} \sin P \right) \cos A + \left( \sin P - \frac{R_{sp}}{R_{ss}} \cos P \right) \sin A \right|^2,$$

где  $I_0$  – некоторая константа,  $A$  и  $P$  – азимуты анализатора и поляризатора;  $R_{pp}, R_{ps}, R_{sp}, R_{ss}$  – элементы матрицы коэффициентов отражения, учитывающие взаимное преобразование волн  $s$ - и  $p$ -поляризации при их отражении от поверхности образца. В соответствии с решением граничной задачи для одноосной подложки (рис. 1) имеем

$$R_{pp} = \frac{(E_x^{(e)} + \bar{H}_z^{(e)})(H_x^{(o)} + \bar{E}_z^{(o)}) - (E_x^{(o)} + \bar{H}_z^{(o)})(H_x^{(e)} + \bar{E}_z^{(e)})}{\Delta},$$

$$R_{ps} = \frac{2((H_x^{(o)} \bar{E}_z^{(e)}) - H_x^{(e)} \bar{E}_z^{(o)})}{\Delta}, R_{sp} = \frac{2((E_x^{(o)} \bar{H}_z^{(e)}) - E_x^{(e)} \bar{H}_z^{(o)})}{\Delta},$$

$$R_{ss} = \frac{(H_x^{(o)} - \bar{E}_z^{(o)})(E_x^{(l)} - \bar{H}_z^{(l)}) + (H_x^{(e)} - \bar{E}_z^{(e)})(\bar{H}_z^{(o)} - E_x^{(o)})}{\Delta},$$

$$\Delta = (H_x^{(o)} - \bar{E}_z^{(o)})(E_x^{(e)} + \bar{H}_z^{(e)}) - (E_x^{(o)} + \bar{H}_z^{(o)})(H_x^{(e)} - \bar{E}_z^{(e)}),$$

$$\bar{E}_z^{(o)(e)} = \frac{\sqrt{\varepsilon_a} E_z^{(o)(e)}}{\cos \theta}, \quad \bar{H}_z^{(o)(e)} = \frac{H_z^{(o)(e)}}{\sqrt{\varepsilon_a} \cos \theta},$$

$$H_x^{(o)} = -\frac{\varepsilon_o c_x E_x^{(o)}}{k_y^{(o)} c_z - \beta c_y}, \quad E_z^{(o)} = -\frac{k_y^{(o)} c_x E_x^{(o)}}{k_y^{(o)} c_z - \beta c_y}, \quad H_z^{(o)} = -k_y^{(o)} E_x^{(o)}, \quad k_y^{(o)} = -\sqrt{\varepsilon_o - \beta^2},$$

$$E_x^{(e)} = -\frac{c_x H_x^{(e)}}{k_y^{(e)} c_z - \beta c_y}, \quad E_z^{(e)} = \frac{(c_z - \beta \varepsilon_o^{-1} (\beta c_z + k_y^{(e)} c_y)) H_x^{(e)}}{k_y^{(e)} c_z - \beta c_y}, \quad H_z^{(e)} = -\frac{k_y^{(e)} c_x H_x^{(e)}}{k_y^{(e)} c_z - \beta c_y},$$

$$k_y^{(e)} = \frac{c_y c_z \beta (\varepsilon_e - \varepsilon_o) + \sqrt{\varepsilon_o \{ (\varepsilon_e - \beta^2) [\varepsilon_o + c_y^2 (\varepsilon_e - \varepsilon_o)] - \beta^2 c_z^2 (\varepsilon_e - \varepsilon_o) \}}}{c_y^2 (\varepsilon_o - \varepsilon_e) - \varepsilon_o},$$

$$\beta = \sqrt{\varepsilon_a} \sin(\theta), \quad \mathbf{c} = c_x \mathbf{i} + c_y \mathbf{j} + c_z \mathbf{k},$$

$$c_x = \sin \theta_c \sin(\alpha + \Delta\alpha), \quad c_y = \cos \theta_c, \quad c_z = \sin \theta_c \cos(\alpha + \Delta\alpha).$$

Здесь  $\mathbf{E}^{(o)}, \mathbf{H}^{(o)}$  и  $\mathbf{E}^{(e)}, \mathbf{H}^{(e)}$  – векторы напряженности электромагнитного поля обыкновенной и необыкновенной волн на границе  $y = 0$ ,  $\varepsilon_a$  – диэлектрическая проницаемость воздуха,  $\varepsilon_o$  и  $\varepsilon_e$  – главные значения тензора диэлектри-

ческой проницаемости подложки,  $\alpha$  – угол между вектором  $\mathbf{a}$  и плоскостью падения света (рис. 1).

После цикла измерений при фиксированной длине волны формируется файл значений величин

$$U = (\sin^2 A - B_1 B_2 \cos^2 A + C)(B_1 B_2 \sin^2 A - \cos^2 A + C)^{-1}, \quad (1)$$

$$V = \frac{B_1 \sin^2 P \cos^2 A - \sin^2 P \sin^2 A + U(B_1 \cos^2 P \sin^2 A - \cos^2 P \cos^2 A)}{(B_1 + 1)0,5 \sin(2A) \sin(2P) \sqrt{U}}, \quad (2)$$

где  $B_1 = I_1 / I_2$ ,  $B_2 = I_3 / I_4$ ,

$$I_1 = I(A, P), I_2 = I(A + 90^\circ, P), I_3 = I(A, P + 90^\circ), I_4 = I(A + 90^\circ, P + 90^\circ),$$

$$C = B_2(\sin^2 P \sin^2 A - \cos^2 P \cos^2 A) + B_1(\cos^2 P \sin^2 A - \sin^2 P \cos^2 A).$$

При исследовании изотропного образца имеют место равенства

$$R_{ps} = R_{sp} = 0, \quad \sqrt{U} = \tan \psi, \quad V = \cos \Delta, \quad \tan \psi \exp(i\Delta) = R_{pp} R_{ss}^{-1},$$

где  $\psi$  и  $\Delta$  – эллипсометрические углы. Тогда параметры  $U$  и  $V$  не зависят от угла  $\alpha$  ( $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ ). Однако при наличии анизотропии у исследуемой подложки зависимости  $U$  и  $V$  от  $\alpha$  могут быть существенными (см. рис. 1). Из анализа выражений (1) и (2) следует, что в случае  $\theta_c \neq 0$  уравнение

$$F(\alpha) = F(\alpha + 180^\circ) \quad (3)$$

имеет единственное решение  $\alpha = \alpha_0$ . Здесь  $F(\alpha)$  – любая из функций  $U(\alpha)$ ,  $V(\alpha)$ . При выполнении (3) вектор оптической оси  $\mathbf{c}$  лежит в плоскости падения света. Таким образом, измерив зависимости  $U(\alpha)$ ,  $V(\alpha)$  и решив уравнение (3), можно указать плоскость, образованную вектором  $\mathbf{c}$  и нормалью к подложке.

Для практического расчета  $\alpha_0$  целесообразно записать ряд Фурье

$$F(\alpha) = a + \sum_{\nu=1}^m b_\nu \sin(\nu\alpha) + \sum_{\nu=1}^m c_\nu \cos(\nu\alpha). \quad (4)$$

Здесь коэффициенты  $a, b_\nu, c_\nu$  определяются путем интегрирования функции  $F(\alpha)$ , что обеспечивает устойчивость результатов относительно шумов регистрации интенсивности.

Полагая в (4)  $m = 2$ , находим аналитическое решение уравнения (3):

$$\alpha_0 = g + 0,5\pi(1 - \sin g(g)), \quad g = -\arctg(c_1 b^{-1}).$$

Следует отметить, что при данном угле  $\alpha_0$  возможны два значения  $\Delta\alpha$ :

$$\Delta\alpha = 360^\circ - \alpha_0, \quad \Delta\alpha = 180^\circ - \alpha_0. \quad (5)$$

Истинное значение  $\Delta\alpha$  и угол  $\theta_c$  могут быть определены путем минимизации функционала

$$I(\theta_c, \Delta\alpha) = \sum_{j=1}^s \{ [U_j - U(\alpha_j, \theta_c, \Delta\alpha)]^2 + [V_j - V(\alpha_j, \theta_c, \Delta\alpha)]^2 \} \quad (6)$$

при нулевых приближениях (5). Здесь  $s$  – количество экспериментальных точек,  $U_j$  и  $V_j$  – экспериментальные значения  $U$  и  $V$  при угле  $\alpha_j$ ,  $U(\alpha_j, \theta_c, \Delta\alpha)$ ,

$V(\alpha_j, \theta_c, \Delta\alpha)$  – теоретические значения этих параметров, вычисляемые на основании (1), (2).

Пример зависимостей  $U(\alpha)$  и  $V(\alpha)$  представлен на рис. 2. Экспериментальные данные получены путем вращения пластины монокристалла сапфира ( $Al_2O_3$ ) матированной обратной поверхностью относительно плоскости падения света с длиной волны  $648nm$ . Вычисления по формулам (5) привели к значениям  $\Delta\alpha = 326,4^\circ$  и  $\Delta\alpha = 46,4^\circ$ . В то же время минимизация функционала (6) дала результат  $\Delta\alpha = 321^\circ$ ,  $\theta_c = 51^\circ$ . Близкое согласие значений  $\Delta\alpha$ , полученных двумя независимыми способами, подтверждает эффективность предлагаемого подхода.

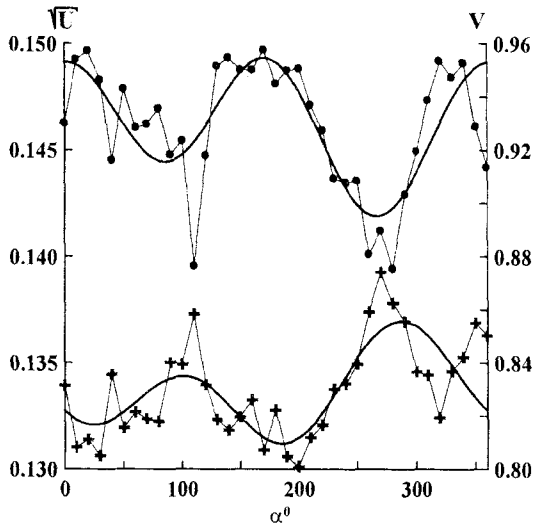


Рис. 2. Экспериментальные зависимости  $U(\alpha)$  (крестики) и  $V(\alpha)$  (точки), соответствующие  $A = 9,5^\circ$ ,  $P = 29,81^\circ$ ,  $\theta = 65^\circ$ , и интерполяция этих зависимостей с помощью рядов (4) (гладкие кривые)

В заключение отметим, что точность определения ориентации оптической оси подложки можно поднять, снизив погрешности измерения эллипсометрических параметров (в нашем исследовании погрешности в основном обусловлены несовершенством механической части установки) и уменьшив шаг угловой дискретизации. При этом минимизация погрешностей  $U$  и  $V$  может быть достигнута как усовершенствованием установки, так и оптимизацией азимутов  $A$  и  $P$ .

Чтобы проиллюстрировать последнюю возможность, запишем погрешности эллипсометрических параметров в виде

$$\delta U = \frac{\partial U}{\partial B_1} \left( \frac{\partial B_1}{\partial I_1} \delta I_1 + \frac{\partial B_1}{\partial I_2} \delta I_2 \right) + \frac{\partial U}{\partial B_2} \left( \frac{\partial B_2}{\partial I_3} \delta I_3 + \frac{\partial B_2}{\partial I_4} \delta I_4 \right), \quad (7)$$

$$\delta V = \frac{\partial V}{\partial B_1} \left( \frac{\partial B_1}{\partial I_1} \delta I_1 + \frac{\partial B_1}{\partial I_2} \delta I_2 \right) + \frac{\partial V}{\partial B_2} \left( \frac{\partial B_2}{\partial I_3} \delta I_3 + \frac{\partial B_2}{\partial I_4} \delta I_4 \right), \quad (8)$$

где  $\delta I_i$  – шумы регистрации интенсивностей  $I_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ). Предположим, что квадрат относительной погрешности измерения интенсивности не превосходит значения  $S$  ( $(\delta I_i / I_i)^2 < S$ ). Тогда в соответствии с (7), (8)

$$(\delta U)^2 \leq (\delta U)_{\max}^2, (\delta V)^2 \leq (\delta V)_{\max}^2,$$

где

$$(\delta U)_{\max}^2 = 4S\Phi_1, (\delta V)_{\max}^2 = 4S\Phi_2, \Phi_1 = \left( \frac{\partial U}{\partial B_1} B_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial B_2} B_2 \right)^2,$$

$$\Phi_2 = \left( \frac{\partial V}{\partial B_1} B_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial B_2} B_2 \right)^2.$$

Если основным источником погрешностей  $\delta I_i$  является аналого-цифровое преобразование, то можно считать, что величины  $\Phi_k$  являются функциями переменных  $U, V, A, P$ , а  $S$  от  $A$  и  $P$  не зависит. Это позволяет свести задачу о минимизации величин  $(\delta U)_{\max}^2$  и  $(\delta V)_{\max}^2$  при заданных значениях  $U$  и  $V$  к исследованию функций  $\Phi_k(A, P)$  ( $k=1,2$ ). Численные расчеты при  $U = 0,016, V = 1$  (эти  $U$  и  $V$  соответствуют изотропной подложке с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 0,5(\varepsilon_o + \varepsilon_c)$ ) показали, что наименьшее значение суммы  $\Phi_1 + \Phi_2$  достигается при  $A = 0,108^\circ$  и  $P = 0,306^\circ$ . Численное моделирование зависимостей  $U(\alpha), V(\alpha)$  с использованием генератора случайных чисел для отношений  $\delta I_i / I_i$  ( $i=1,4$ ) показало, что переход от  $A = 9,5^\circ$  и  $P = 29,81^\circ$  к оптимальным  $A = 0,108^\circ$  и  $P = 0,306^\circ$  позволяет уменьшить погрешности определения  $\theta_c$  и  $\Delta\alpha$ , вызванные шумами измерения интенсивности света, более чем на порядок.

### Заключение

Предложена и апробирована экспериментально методика определения ориентации оптической оси одноосной подложки на базе эллипсометра с бинарной модуляцией состояния поляризации света. Оценены возможности минимизации погрешностей измерений за счет выбора азимутов поляризатора и анализатора прибора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1970. – 856 с.
2. **Меркулов, В.С.** К обобщенной эллипсометрии анизотропных сред / В.С. Меркулов // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 103. – № 4. – С. 646-648.
3. Разработка оптических методов и аппаратуры для контроля технологии и параметров полупроводниковых структур нано- и микроэлектроники / В.И. Ковалев [и др.] // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44. – С. 1059-1062.