

УДК 535-46; 535.51

Б. М. Аюпов

(Новосибирск)

УСТАНОВЛЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ЛИМБОВ  
АЗИМУТАЛЬНЫХ ШКАЛ ЭЛЛИПСОМЕТРОВ

Предложена новая методика калибровки лимбов азимутальных шкал эллипсометров. Показано, что с помощью этой методики возможно установление анизотропии образцов и их выбор для операции калибровки.

Юстировка эллипсометров представляет собой один из этапов измерения на этих приборах, составной частью юстировки является калибровка азимутальных шкал поляризующих элементов. При этом должны учитываться как несовершенство этих элементов, так и неидеальность образца, с помощью которого проводится данная операция. В работах по калибровке азимутальных шкал эллипсометров анизотропия образцов обычно не принимается во внимание [1—4].

Наиболее очевидный способ установления лимбов поляризатора и анализатора — измерение их положения при нулевой интенсивности отраженного света для угла падения света на поверхность диэлектрика, равного углу Брюстера для материала этого диэлектрика [1, 2]. При этом компенсатор удаляется из оптического тракта вместе с поляризатором или анализатором, такая операция наиболее оправдана при первой установке поляризующих элементов в эллипсометр.

В одной из самых ранних работ [3] по применению эллипсометрии для измерения толщины тонких пленок на поглощающих подложках предложен способ юстировки лимбов азимутальных шкал поляризатора и анализатора также без компенсатора в оптическом тракте эллипсометра. Для этого в качестве образца используется металлическая поверхность, угол падения выбирается близким к главному углу падения, анализатор устанавливается примерно перпендикулярно плоскости падения, отслеживается интенсивность света, падающего на приемник. При сканировании угла анализатора с шагом  $0,1^\circ$  происходит поиск таких положений поляризатора и анализатора, когда интенсивность света на приемнике будет самой минимальной. Эти положения соответствуют поляризатору в плоскости падения, а анализатору — перпендикулярно этой плоскости.

В более поздней работе [1] компенсатор также удалялся, использовалась диэлектрическая поверхность, углы падения света на образец выбирались до и после угла Брюстера. Измерения проводились при изменении положений анализатора с шагом порядка  $10^\circ$ , определялось положение поляризатора при минимуме света на приемнике. Две такие кривые, полученные до и после угла Брюстера, пересекаются в некоторых точках, которые принадлежат положениям поляризующих элементов в плоскости падения и перпендикулярно этой плоскости.

Методика установления поляризующих элементов эллипсометра без удаления компенсатора представлена в [4]. В данной методике угол падения света на образец произволен, сам изотропный образец может быть любым. Вначале при случайном положении поляризующих элементов находится минимум све-

та на приемнике, затем, например, поляризатор поворачивается на  $90^{\circ}00'$  и подстройкой положений компенсатора и анализатора снова достигается минимум света на приемнике. Далее процедура повторяется уже с поворотом анализатора на  $90^{\circ}00'$ ; такие итерации проводятся до тех пор, пока значения шкал поляризатора так же, как и анализатора, не станут отличаться только на  $\pm 90^{\circ}00' \pm 01'$ , а компенсатор не будет менять своих положений в пределах  $\pm 03'$ .

В данной работе представлена еще одна методика установления азимутальных шкал эллипсометров без удаления компенсатора из оптического тракта прибора. Она позволяет установить даже слабую анизотропию образцов и, следовательно, оценить их пригодность для юстировки эллипсометров.

Измерения проводились на эллипсометре ЛЭФ-3М при  $\lambda = 622$  нм и конфигурации поляризующих элементов PCSA (поляризатор — компенсатор — образец — анализатор). Вначале был проведен эксперимент, как в работе [1], но без удаления компенсатора. При угле падения  $65^{\circ}$  и отражении света от гладкой поверхности кварцевого стекла марки КИ измерялись положения поляризатора и компенсатора при изменении угла анализатора с шагом  $10^{\circ}$ . На рис. 1 эти результаты для реальной шкалы эллипсометра представлены в двойном масштабе: значения анализатора сдвинуты на  $90^{\circ}00'$  и для каждой шкалы даны свои значения поляризатора. Видно, что две кривые пересекаются в двух точках, которые и принадлежат искомым значениям шкал.

На основе рис. 1 понятна методика, предложенная в работе [4]; каждый поворот поляризатора или анализатора на  $90^{\circ}$  означает переход на другую кривую. Отсюда видно, что количество шагов для нахождения постоянных значений поляризатора и анализатора будет зависеть от первоначальной точки и первого шага. Изменение поляризатора на  $90^{\circ}00'$  означает горизонтальный переход, например, из точки 1 в точку 7, а поворот анализатора на  $90^{\circ}00'$  соответствует вертикальному переходу из точки 1 в точку 2. Из рисунка видно, что из первоначальной точки 1 при первом повороте поляризатора на  $90^{\circ}00'$  к ближайшей точке пересечения ведет меньшее число шагов, чем при другой тактике. Одновременно из рис. 1 видно, что для воспроизводимости измерений в точке пересечения следует их производить с малой случайной ошибкой, иначе экспериментальные точки не фиксируются в месте пересечения кривых, а его проходят и стремятся к следующему. Внешне это выглядит

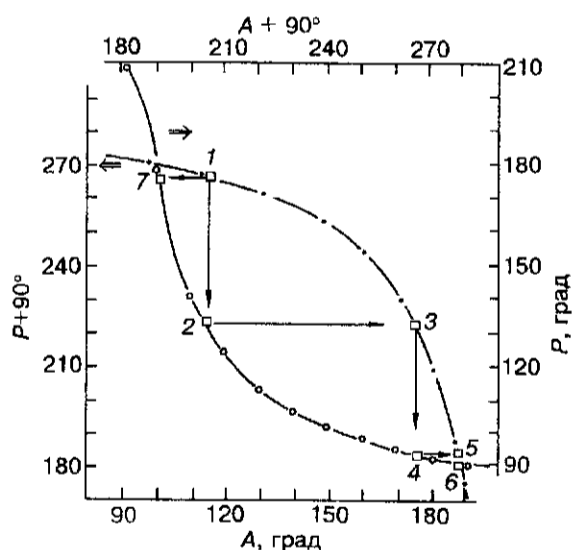


Рис. 1. Азимутальные углы поляризатора в зависимости от положений анализатора при отражении света от гладкой поверхности кварцевого стекла марки КИ.

Одна и та же кривая нанесена со сдвигом на  $90^{\circ}00'$  положений анализатора и поляризатора

как расходимость результатов, когда в процессе калибровки получаются все время разные результаты.

В данной работе предлагается более точная методика установления лимбов азимутальных шкал поляризующих элементов эллипсометров. Она заключается в том, что положения анализатора сканируются с шагом  $0^{\circ}10'$  около плоскости падения и перпендикулярно ей, а углы падения выбираются до и после углов Брюстера (главных углов падения). Оказалось, что экспериментальные точки, полученные в районе  $\pm 0^{\circ}30'$  от плоскости падения или перпендикулярно ей, могут быть описаны прямыми линиями, что в существенной степени облегчает обработку экспериментальных данных.

Для обоснования предложенной методики практически необходимо было найти зависимость положений поляризатора и компенсатора от значений коэффициентов матрицы отражения образца и отклонений анализатора от плоскости падения. Такая зависимость получается при приравнивании поляризации света, прошедшего через поляризатор и компенсатор, к поляризации падающего на образец света, вычисленной на основе матрицы отражения образца и азимута анализатора [5, 6]:

$$\frac{\operatorname{tg}C + \rho_c \cdot \operatorname{tg}(P - C)}{\rho_c \operatorname{tg}(P - C) \cdot \operatorname{tg}C - 1} = \frac{R_{ps} \cdot \operatorname{ctg}A}{R_{sp} \cdot \operatorname{ctg}A - R_{pp}}, \quad (1)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  — азимутальные углы анализатора, поляризатора и компенсатора;  $R_{pp}$ ,  $R_{ps}$ ,  $R_{sp}$  — коэффициенты матрицы отражения;  $\rho_c$  — параметры компенсатора. Приравнивание вещественных и мнимых частей (1) дает нелинейную систему из двух уравнений с двумя неизвестными, решение которой и дает искомый результат. Если положить равными нулю недиагональные элементы матрицы отражения, считать компенсатор идеальным, то для анализатора, сканируемого около перпендикуляра к плоскости падения ( $A \sim 90^{\circ}$ ), имеют место две зависимости:

$$\operatorname{tg}C = - \frac{\operatorname{ctg}A}{2 \operatorname{tg}\Psi \cdot \cos\Delta}, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg}(P - C) = \frac{\operatorname{ctg}A}{2 \operatorname{tg}\Psi \cdot \sin\Delta}. \quad (3)$$

Здесь индексы  $pp$  после знаков  $\Psi$  и  $\Delta$  опущены. Для анализатора, расположенного в плоскости падения ( $A \sim 0^{\circ}$ ), получается:

$$\operatorname{tg}C = - \frac{\operatorname{ctg}A}{2 \operatorname{tg}\Psi \cdot \cos\Delta}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}(P - C) = - \frac{\operatorname{tg}\Psi \cdot \operatorname{tg}A}{2 \cdot \sin\Delta}. \quad (5)$$

Из формул (2)—(5) видно, что для изотропного образца все зависимости положений поляризатора и компенсатора при движении анализатора вблизи плоскости падения или около перпендикуляра к ней проходят через «нулевые» точки, и, значит, они все будут пересекаться в одном месте.

На рис. 2 представлены результаты измерений положений поляризатора (а) и компенсатора (б) для отражения света от гладкой поверхности кварцевого стекла марки КИ при двух углах падения света на образец ( $50$  и  $60^{\circ}$ ) и сканировании положений анализатора вблизи  $A \sim 0$  и  $90^{\circ}$ . Заметно, что все результаты располагаются на прямых линиях; естественно, что на прямой линии будут измерения без участия образца, когда плечи эллипсометра поставлены «на просвет» (прямая 2 на рис. 2, а, б). Видно, что все пять прямых на обоих рисунках пересекаются в одной точке, при этом значения анализатора для двух точек пересечения совпадают.

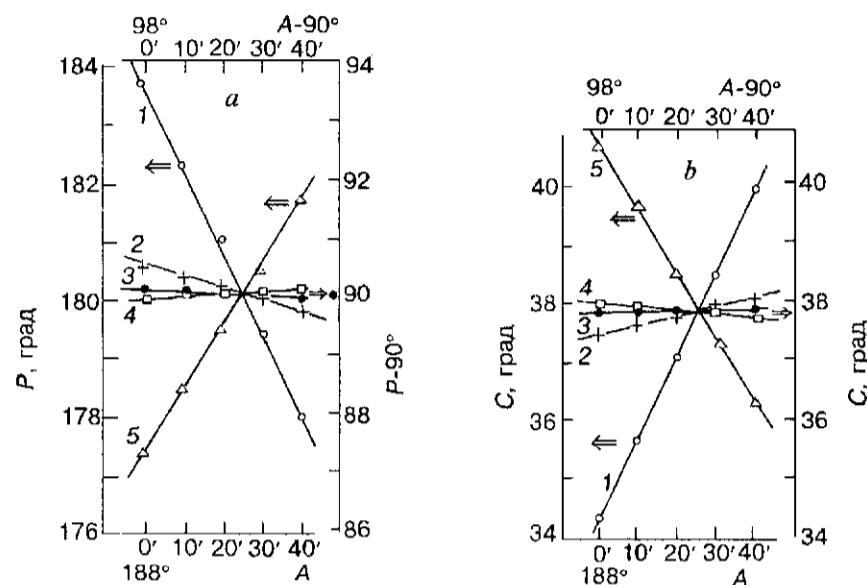


Рис. 2. Зависимость положений поляризатора (а) и компенсатора (б) от угла анализатора вблизи и перпендикулярно плоскости падения при отражении света от гладкой поверхности кварцевого стекла марки КИ:

прямые 1, 3 даны для  $\varphi = 60^\circ$ ; 4, 5 —  $\varphi = 50^\circ$ ; 2 — плечи эллипсометра поставлены «на просвет»; 1, 5 — анализатор находится вблизи перпендикуляра к плоскости падения; 3, 4 — около плоскости падения

Те же координаты точек пересечения пяти прямых для поляризатора и компенсатора получаются при отражении света от поверхности монокристаллического кремния после ее шлифовки, химико-механической полировки и химического травления при двух углах падения света на образец ( $70^\circ$  и  $80^\circ$ ) и сканировании положений анализатора около плоскости падения и вблизи перпендикуляра к ней. Обозначим их через  $A_0$ ,  $P_0$ ,  $C_0$ .

Сравнение уравнений (2)–(5) с рис. 2, а, б показывает, что поведение поляризатора и компенсатора в данных условиях достаточно точно описывается этими уравнениями. Например, угол наклона прямых изменяет свой знак, если измерения проводятся до и после угла Брюстера (главного угла падения). Внешне уравнения (2) и (4) очень похожи, но поведение этих тригонометрических функций при  $A \sim 0$  и  $90^\circ$  совершенно различно, что и передают данные на рис. 2, б.

Такая методика калибровки лимбов азимутальных шкал позволяет производить ее и на эллипсометрах со значительной случайной ошибкой измерений, например, тех, где используется визуальная оценка интенсивности света на приемнике.

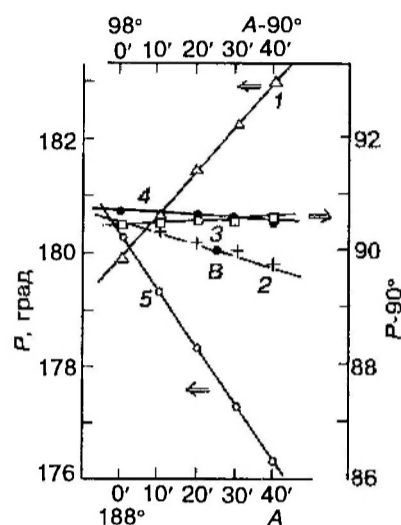
Пересечение пяти (см. рис. 2, а, б) прямых в одной точке является, как показывает практика, скорее, исключением, чем правилом. Обычно при измерениях с использованием, например, полированных поверхностей монокристаллического кремния, не подвергшихся химическому травлению, прямые не пересекаются в одной точке, что свидетельствует о наведенной анизотропии полированной поверхности.

В литературе описаны методики определения наличия анизотропии у образцов [7, 8]; они заключаются в том, что у эллипсометра фиксируется один из поляризующих элементов, а положение двух других при минимуме интенсивности света на приемнике изучается в зависимости от угла вращения вокруг оси, перпендикулярной плоскости подложки.

В данной работе анализатор устанавливался перпендикулярно плоскости падения и находились значения  $(P - P_0)$  в зависимости от угла вращения при исследовании полированной поверхности кремния. Величина отклонений поляризатора от плоскости падения в таких экспериментах зависела от угла

Рис. 3. Зависимость положений поляризатора от угла анализатора вблизи плоскости падения и перпендикуляра к этой плоскости при отражении света от полированной кремниевой пластины:

прямые 1, 3 получены при  $\varphi = 70^\circ$ ; 4, 5 —  $\varphi = 80^\circ$ ; 2 — плечи эллипсометра поставлены «на просвет»; прямые 1, 5 — анализатор находится вблизи перпендикуляра к плоскости падения; 3, 4 — около плоскости падения; точка В соответствует месту пересечения всех прямых на рис. 2, а



падения света на образец, при этом на постоянное значение ( $P - P_0$ ) накладывалась хорошо воспроизводимая при измерениях случайная компонента, обусловленная, вероятнее всего, заполированными царапинами. Для выяснения влияния анизотропии поверхности на процедуру измерений (см. рис. 2, а, б) был взят образец, у которого при угле падения света  $70^\circ$  отклонение значений поляризатора от плоскости падения ( $P - P_0$ ) равнялось  $1,5^\circ$ . На рис. 3 приведены результаты измерений, проведенных по той же схеме, которая использовалась для получения рис. 2, а. Видно, что для анизотропного образца не имеет место пересечение пяти прямых в одной точке, появление недиагональных коэффициентов в матрице отражения обуславливает сдвиг прямых 1, 3—5 от нулевой точки В на рис. 3. Таким образом, анизотропия образца может быть обнаружена с помощью описываемой методики, в которой не требуется предварительной калибровки азимутальных шкал анализатора, поляризатора и компенсатора.

Поскольку с помощью предлагаемой методики возможно независимо от предварительной калибровки поляризующих элементов эллипсометра определение наличия недиагональных коэффициентов матрицы отражения образца, то она может быть использована как для выбора образцов для операции калибровки, так и для установления наличия нарушенного слоя на поверхности кристаллов кубической сингонии путем фиксации наведенной анизотропии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржанов А. В., Свиташев К. К., Семенов А. И. и др. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979.
2. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
3. McCrakin F. L., Passaglia E., Stromberg R. R., Steinberg H. L. Measurement of the thickness and refractive index of very thin films and optical properties of surfaces by ellipsometry // J. Res. NBS. 1963. 63A, N 4. P. 363.
4. Свиташев К. К., Хасанов Т. Учет оптической активности компенсатора при юстировке эллипсометра // Оптика и спектроскопия. 1986. 60, вып. 2. С. 399.
5. Филиппов В. В., Тронин А. Ю., Константинова А. Ф. Эллипсометрия анизотропных сред // Кристаллография. 1994. 60, вып. 2. С. 399.
6. Azzam R. M. A., Bashara N. M. Polarization transfer function of an optical system as a bilinear transformation // JOSA. 1972. 62, N 2. P. 222.
7. De Smet D. J. Ellipsometry of biaxial surface // JOSA. 1975. 65, N 5. P. 542.
8. Тронин А. Ю. Эллипсометрическая методика измерения матрицы отражения слабоанизотропной среды // ПТЭ. 1989. № 6. С. 123.

Поступила в редакцию 14 октября 1996 г.