

УДК 681.785.35.001.891.5

Т. Хасанов

(Новосибирск)

АТТЕСТАЦИЯ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ЭЛЛИПСОМЕТРОВ

Обсуждаются вопросы испытаний, аттестации и средства контроля эллипсометров, решение которых позволит избежать искажений результатов, обусловленных несовершенством прибора и его оптических элементов. Рассматривается каждый оптический элемент и его параметр несовершенства или погрешности. Предлагаются способы контроля величины параметра несовершенств и описываются некоторые возможные причины искажения результатов эллипсометрических измерений. Показано, что плавленный и кристаллический кварц, структура Si—SiO₂ и некоторые оптические устройства могут успешно использоваться как средства контроля для аттестации эллипсометров. Анализируется точность эллипсометрических измерений при применении однозонной и многозонной методик.

Исторически эллипсометрия возникла как оптический метод исследования чистоты поверхности жидких и твердых тел и измерения параметров тонких пленок на них [1, 2].

В настоящее время появились эллипсометрические приборы, использующие источники электромагнитного излучения с длиной волны далеко за пределами оптического диапазона, и область применения метода значительно расширилась [3, 4]. Существенно возросло число специалистов, далеких от эллипсометрии и оптики вообще, которые используют эллипсометрические приборы. Следовательно, возникают определенные затруднения и сомнения в достоверности получаемых результатов при решении практических задач в разных условиях и на различных приборах.

В данном сообщении обсуждаются вопросы испытаний, аттестации и выбора средств контроля эллипсометров, решение которых позволит избежать искажений результатов, обусловленных несовершенством прибора и его оптических элементов. Рассматривается каждый оптический элемент и его параметр несовершенств или погрешности. Предлагаются способы контроля величины параметра несовершенств, и описываются некоторые возможные причины искажения результатов эллипсометрических измерений. Анализируется точность применения однозонной и многозонной методик.

В общем случае любой эллипсометрический прибор содержит источник излучения электромагнитной волны, объект взаимодействия, приемник излучения и поляризационные элементы, снабженные угломерными устройствами, которые позволяют анализировать изменение состояния поляризации электромагнитной волны. Предположим, что все механические и оптические узлы эллипсометра не имеют никаких погрешностей или несовершенств. Рассмотрим оптическую схему такого эллипсометра (рис. 1).

1. *Источник излучения.* Предполагается, что источник излучает плоскопараллельную монохроматическую электромагнитную волну со стабильной интенсивностью.

2. *Круговой поляризатор.* Фазосдвигающее устройство, позволяющее преобразовывать излучение источника с линейной или эллиптической поляризацией в круговую.

3. *Поляризатор.* Линейный поляризатор, дающий возможность получить линейную поляризацию с любым заданным азимутом и постоянной

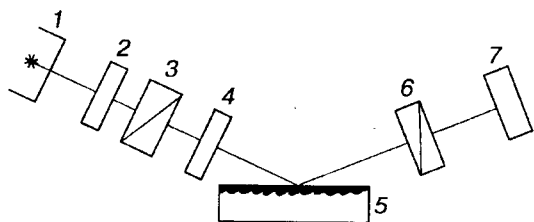


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема эллипсометра:

1 — источник света (ОКГ); 2 — круговой поляризатор; 3 — поляризатор; 4 — компенсатор; 5 — исследуемая система — образец; 6 — анализатор; 7 — фотоприемник

интенсивностью. (Здесь не рассматриваются приборы, работающие с использованием круговых или эллиптических поляризаторов.)

4. *Компенсатор.* Фазосдвигающее устройство в четверть длины волны, позволяющее вместе с линейным поляризатором получать любое заданное состояние поляризации.

5. *Исследуемая система — образец (объект испытаний).* Реальный поляризующий объект исследования со специальным устройством, например, предметный столик для эллипсометров типа ЛЭФ-2, ЛЭФ-3М, который дает возможность привязки к угломерным устройствам угла падения и отражения излучения. При измерении «на просвет» угломерные устройства образца могут быть такими, как у компенсатора.

6. *Анализатор.* Линейный анализатор, позволяющий измерять любой азимут линейной поляризации электромагнитной волны со сколь угодно малой интенсивностью.

Для отсчета углов поворота поляризатора, анализатора, компенсатора и угла падения излучения на объект исследования используются различные угломерные устройства как по конструкции, так и по точности. В частности, угломерные устройства эллипсометров типа ЛЭФ-2, ЛЭФ-3М имеют лимбы с минутными делениями. (Здесь эти вопросы не обсуждаются.) Предполагается, что они заведомо аттестованы и правильно вмонтированы в прибор. Однако следует заметить, что предлагаемые способы контроля могут выявить непригодность угломерных устройств прибора для эллипсометрических измерений.

7. *Фотоприемник.* Приемник излучения, способный измерять сколь угодно малую интенсивность излучения независимо от состояния поляризации волны.

Отмеченные требования являются трудно реализуемыми и не всегда могут соответствовать предполагаемым «идеальным» оптическим элементам. Только теоретически можно предположить, что все механические и оптические узлы эллипсометра не имеют никаких погрешностей или несовершенств. Реально отклонение от «идеального» каждого элемента и эллипсометра в целом не должно превышать некоторой допустимой величины. Рассмотрим каждый оптический элемент в плане его допустимой погрешности или несовершенств.

1. *Источник излучения.* Световой поток, излучаемый источником, имеет конечную монохроматичность, расходимость и стабильность по интенсивности. Оптический квантовый генератор по своим характеристикам является наиболее близким к «идеальному» источнику излучения для эллипсометра. Расходимость и немонохроматичность световых пучков ОКГ незначительно влияют на результаты эллипсометрических измерений только при углах падения, очень близких к углу Брюстера [5]. Влиянием нестабильности интенсивности светового пучка лазеров, обычно используемых в эллипсометрах ЛЭФ-2 и ЛЭФ-3М, при измерениях с нулевыми схемами можно пренебречь.

2. *Круговой поляризатор.* (Подробно круговые и эллиптические поляризаторы описаны в [6].) В зависимости от температуры окружающей среды, условий настройки и качества используемой четвертьволновой пластинки на

выходе данного кругового поляризатора поляризация в той или иной степени отличается от круговой. При нулевых схемах эллипсометров такое отличие практически не влияет на результаты измерений. Однако когда применяется метод качания [7] при слабой интенсивности светового пучка или плохой чувствительности фотоприемника, необходимо учитывать влияние указанного отличия от круговой поляризации на конечный результат. Такой учет необходим также при фотометрических измерениях.

3. *Поляризатор*. Линейный поляризатор всегда имеет конечную эллиптичность. (Поляризаторы, их классификация и основные параметры описаны в [6]. Другую информацию о них можно найти в [8—10].) Комплексный параметр несовершенств поляризатора, определяемый из выражения $\alpha_p = t_{1p} + it_{2p}$, является одним из важных при эллипсометрических измерениях [8]. Здесь t_{1p} и t_{2p} представляют собой малый азимут и малую эллиптичность выходящего из поляризатора эллиптически поляризованного света относительно системы координат, оси которой параллельны направлениям пропускания и поглощения поляризатора [8]. Случайные и систематические погрешности $\delta\Psi_p$ и $\delta\Delta_p$, обусловленные комплексным несовершенством поляризатора α_p , определяются из следующих выражений [8] (для эллипсометров, собранных по схеме PCSA):

$$|\delta\Psi_p| = |t_{2p}| \sin 2\Psi \quad \text{и} \quad |\delta\Delta_p| = |2t_{1p}|.$$

Нетрудно убедиться, что для эллипсометров ЛЭФ-2, ЛЭФ-3М величинами t_{1p} и t_{2p} можно пренебречь, когда они меньше 0,5 и 1 угл. мин.

4. *Компенсатор*. Фазосдвигающее устройство в четверть длины волны обладает несовершенствами, рассмотрению которых среди всех элементов эллипсометра посвящено наибольшее число публикаций, например [8—12, 29]. Компенсаторы изготавливаются преимущественно из кристаллического кварца, благодаря стабильности его физико-химических параметров по отношению к окружающей среде (отсутствие гигроскопичности, наиболее высокая устойчивость к кислотам, щелочам, относительно высокая твердость [13]). Существуют разные способы устранения несовершенств компенсатора. Только влиянию оптической активности компенсатора из кристаллического кварца на результаты эллипсометрических измерений посвящены десятки работ (см., например, [14—18]).

Разработанный нами метод юстировки устраняет влияние оптической активности компенсатора из кристаллического кварца на результаты эллипсометрических измерений с точностью до деления лимбов угломерных устройств их поляризационных элементов [19].

В любых эллипсометрах, где присутствует в схеме компенсатор, проводится сравнение эллипсометрических параметров компенсатора и исследуемого объекта. Поэтому все несовершенства исследуемого объекта могут быть перенесены на компенсатор и обратно. Вот почему компенсатор и исследуемый объект целесообразно рассматривать как единую систему. Следовательно, при аттестации эллипсометра требуется стабильность не только поляризационных углов исследуемого объекта (контрольного образца — объекта испытаний), но и компенсатора. В типичной схеме эллипсометра на отражение сравниваются комплексные отношения двух ортогональных компонент пропускания и отражения компенсатора и образца [20].

На работу компенсатора при прохождении через него электромагнитного излучения влияют наличие дихроизма и возникающая деполаризованная компонента [21—23]. Подобные недостатки кварцевых пластинок, предназначенных для использования в качестве компенсатора, устраняются после эффективного просветления их поверхностей [24].

5. *Исследуемая система — образец (объект испытаний)*. Реальный полярирующий объект с отличными от нуля коэффициентами зеркального отражения или пропускания. (Например, у сильно шероховатых и диффузно рассеивающих поверхностей может отсутствовать зеркальное отражение.) Необходимый угол падения излучения на образец устанавливается с помощью

предметного столика, угломерного устройства отсчета угла падения и специальных диафрагм в плече поляризатора и анализатора. Эти же диафрагмы и предметный столик обеспечивают постоянство плоскости падения электромагнитной волны на исследуемый объект — образец, т. е. постоянство юстировочных параметров (P_p, A_s или P_s, A_p) при смене образцов или угла падения. При исследовании анизотропных объектов к предметному столику и юстировочным параметрам предъявляются дополнительные требования.

6. *Анализатор.* Линейный анализатор должен удовлетворять тем же требованиям, что и поляризатор. (Поляризатор и анализатор отличаются местом расположения в оптической схеме эллипсометра.) Кроме того, необходимо, чтобы он мог измерять азимут вектора электрического поля электромагнитной волны со сколь угодно малой интенсивностью. Малая интенсивность излучения возможна при отражении от границы раздела двух диэлектриков, которые имеют приблизительно одинаковые показатели преломления. Например, при измерении на диэлектриках с иммерсионной жидкостью и в окрестности угла Брюстера интенсивность излучения, падающего на анализатор, может оказаться ничтожно малой. В этих случаях обязательно следует учитывать возможные потери интенсивности излучения при прохождении его через анализатор. Потеря, обусловленная только отражением от двух поверхностей на входе и выходе анализатора, составляет порядка 7—8 %. Более того, следует учесть, что минимум интенсивности на приемнике излучения достигается путем поворота оси пропускания анализатора относительно вектора электрического поля линейно поляризованной волны на 90° . Поэтому интенсивность излучения на входе анализатора не должна быть меньше некоторого минимального значения, о котором речь пойдет ниже.

7. *Фотоприемник.* Одной из важных его характеристик является порог чувствительности. При проведении измерений по нулевой схеме предъявляются высокие требования именно к порогу чувствительности, особенно при измерении вблизи угла Брюстера и на границе раздела двух диэлектриков. Он также важен при определении юстировочных параметров прибора. Действительно, можно показать, что интенсивность на выходе анализатора

$$I_{\text{вых}} = I_A \sin^2 A_r, \quad (1)$$

где I_A — интенсивность линейно поляризованной волны, падающей на анализатор; A_r — азимут оси поглощения анализатора относительно вектора электрического поля. (Потери интенсивности при прохождении волны через анализатор не учтены.) С другой стороны, пороговая чувствительность приемника (I_n) должна удовлетворять условию

$$I_n \leq I_{\text{вых}}.$$

(Предполагается, что между анализатором и приемником нет никаких элементов, ослабляющих интенсивность излучения.) Так как для любого приемника излучения $I_n \neq 0$, точность определения азимута анализатора, отвечающего $I_{\text{вых}} = 0$, определяется конечным значением пороговой чувствительности приемника. В качестве примера рассмотрим отражение p -компоненты линейно поляризованного света от поверхности диэлектрика. Согласно (1), имеем

$$I_{\text{вых}} = I_0 r_p^2 \sin^2 A_r. \quad (2)$$

Здесь I_0 — интенсивность излучения, падающего на диэлектрик; r_p — френелевский коэффициент. В этом случае при фиксированном значении I_0 угол падения необходимо выбирать таким, чтобы $I_A = I_0 r_p^2 > I_n$. В противном случае приемник излучения не позволяет обнаружить изменения в значении A_r . Напомним, что приемники излучения, используемые в эллипсометрах ЛЭФ-2 и ЛЭФ-3М, в подобных случаях позволяют обнаружить изменение значения A_r до 5 угл. с и меньше [25].

Заметим, что при измерении по нулевой схеме на системах с коэффициентами отражения, близкими к 1 и сильно выраженными неоднородностями, приводящими к появлению деполяризованной компоненты, лучшим приемником в видимой области спектра является глаз.

Рассмотренные погрешности или несовершенства каждого оптического элемента показывают тесную их взаимосвязь. Действительно, низкий уровень чувствительности приемника не позволяет реализовать высокое качество поляризаторов и точность их угломерных устройств, отклонение от круговой поляризации — получить для произвольного азимута линейной поляризации на выходе поляризатора одинаковую интенсивность и т. д.

Рассмотрим теперь допустимую погрешность или несовершенство эллипсометра в целом. В качестве такой величины могут быть приняты разности экспериментально измеренных значений ρ — комплексное отношение двух взаимно ортогональных коэффициентов отражения (пропускания) или Ψ и Δ эллипсометрических параметров отражающей (пропускающей) системы относительно их истинных значений. (Истинное значение в смысле расчета по адекватно выбранной модели отражающей (пропускающей) системы.)

В табл. 1 представлены экспериментальные значения Ψ и Δ и их разность относительно рассчитанных Ψ_p и Δ_p ($\delta\Psi = \Psi - \Psi_p$, $\delta\Delta = \Delta - \Delta_p$) для плавленного кварца. Все измерения проведены на одном образце.

Рассчитанные значения (Ψ_p , Δ_p) получены в предположении отражения света от границы раздела двух полубесконечных диэлектриков с показателем преломления 1 и 1,4570, экспериментальные — результаты измерений (Ψ и

Таблица 1

Номер п/п	Дата	φ , град	Δ	Ψ	$\delta\Delta$	$\delta\Psi$
1	09.01.80	70	0	21°40'	0	0
2	12.08.80	56	359°27'	0°44'	0°33'	0
3	14.08.80	60	359°53'	1°00'	0°07'	0
4	14.08.80	60	359°45'	1°01'	0°15'	0°01'
5	03.08.81	70	0	21°40'	0	0
6	20.03.81	70	0	21°40'	0	0
7	22.04.81	70	0°01'	21°41'	0°01'	0°01'
8	12.01.82*	70	359°46'	21°35'	0°14'	0°05'
9	11.04.82*	70	359°55'	21°37'	0°05'	0°03'
10	28.03.82	70	0°02'	21°40'	0°02'	0
11	10.05.82	70	359°59'	21°40'	0°01'	0
12	01.11.83	70	0°01'	21°40'	0°01'	0
13	21.11.85*	70	0°01'	21°37'	0°01'	0°03'
14	22.11.85	70	0°03'	21°39'	0°03'	0°01'
15	14.05.90	70	0°01'	21°40'	0°01'	0
16	25.07.96	70	0	21°40'	0	0

* Случаи сбоя юстировки эллипсометра.

Δ) на эллипсомере ЛЭФ-2, проведенных в разное время на поверхности плавленого кварца с качественной полировкой. Измеренное на рефрактометре значение показателя преломления плавленого кварца $1,4570 \pm 2 \cdot 10^{-4}$. Видно, что экспериментальные значения поляризационных углов практически не отличаются от расчетных, кроме случаев сбоя юстировки эллипсометра и измерений в окрестности угла Брюстера. Следовательно, можно допустить, что расчет проведен по адекватной модели. Незначительное отличие экспериментальных значений от расчетных, полученных в течение длительного времени, свидетельствует об устойчивости поверхности плавленого кварца, как указывалось выше для кристаллического кварца [13]. Поэтому плавленый кварц нами уверенно используется в качестве *средства контроля для аттестации эллипсометра*, особенно для проверки соответствия угла падения показаниям его угломерных устройств (многоугловые измерения).

В табл. 2 приведены результаты измерений поляризационных углов Ψ и Δ , проведенных в разное время, на одном и том же образце Si—SiO₂. Видно, что разброс параметров Ψ и Δ значительно превосходит точность делений (угл. мин) лимбов угломерных устройств эллипсометра ЛЭФ-2, на котором проведены измерения. Однако показатель преломления и толщина диэлектрической пленки, соответствующие расчетным значениям этих поляризационных углов, не сильно различаются между собой. Расчетные значения получены в предположении отражения света от поверхности диэлектрика на кремнии с показателем преломления $N = 3,865 - i0,023$ (рис. 2). Можно допустить, что экспериментальные и расчетные значения поляризационных углов различаются между собой не только вследствие изменения толщины и показателя преломления пленки. Тем не менее наблюдаемую невоспроизводимость экспериментальных значений поляризационных углов проще обосновать изме-

Т а б л и ц а 2

Номер п/п	Дата	φ , град	Δ	Ψ	T_c	δ	n	$d, \text{Å}$
1	4.10.80	70	80°12'	46°08'	0,995	86°42'	1,4605	1078
2	8.10.80	70	80°10'	46°27'	1,072	89°59'	1,4615	1081
3	8.10.80	70	80°21'	46°50'	1,031	87°22'	1,4607	1088
4	8.10.80	70	80°28'	46°53'	0,984	86°27'	1,4698	1089
5	10.10.80	70	80°17'	46°43'	1,077	90°02'	1,4610	1086
6	14.04.82	70	80°27'	46°45'	0,995	80°13'	1,4672	1076
7	14.04.82	70	80°18'	46°17'	0,988	74°30'	1,4676	1069
8	14.04.82	70	80°56'	46°59'	1,081	72°24'	1,4659	1095
9	14.04.82	70	80°42'	46°13'	0,985	89°47'	1,4661	1084
10	17.04.82	70	80°26'	46°20'	НР	НР	1,4688	1083
11	19.04.82	70	80°26'	46°23'	НР	НР	1,4689	1083
12	20.04.82	70	80°18'	46°45'	1,052	90°38'	1,4686	1075
13	21.04.82	70	80°17'	46°10'	1,022	91°27'	1,4698	1079
14	10.05.82	70	80°23'	46°19'	НР	НР	1,4692	1082

Примечание. НР — не рассчитан.

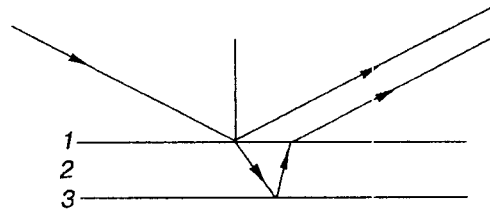


Рис. 2. Отражающая система:
1 — внешняя среда; 2 — диэлектрик; 3 — кремний

нением толщины пленки от точки к точке на поверхности образца. В табл. 3 представлены результаты измерений, проведенные в одно и то же время в пяти точках (рис. 3), другого образца. Видно, что расчетные значения показателя преломления и толщины пленки, соответствующие этим значениям поляризационных углов, показывают изменение толщины с максимальной разностью в 15 \AA .

Измерения, представленные в табл. 2, проведены разными компенсаторами, существенно отличающимися своими параметрами друг от друга. Это обстоятельство может тоже внести свой вклад в наблюдаемые различия измеренных значений поляризационных углов. В подтверждение можно привести результаты измерений п. 7, 8 (см. табл. 2), где наблюдается максимальная разность в 26 \AA в расчетных значениях толщин. На основе анализа результатов, приведенных в табл. 2 и 3, можно допустить, что толщина и показатель преломления пленки SiO_2 на поверхности кремния не изменяются. Поэтому, когда эллипсометр используется для определения показателя преломления и толщины пленки, для проверки его работоспособности можно использовать структуру Si-SiO_2 . Для этой цели могут быть применены и другие отражающие системы (см., например, [26]).

При проведении эллипсометрических измерений, особенно на анизотропных материалах, принципиально важно точное определение юстировочных параметров. В этих случаях в качестве средства испытаний эллипсометра лучше всего подходит ориентированный кристаллический кварц [27].

В табл. 4 представлены результаты измерения поляризационных углов Ψ_j и Δ_j ($j = 1, 2$) и их отличие от расчетных на нескольких образцах для двух симметричных ориентаций кристаллических кварцевых пластинок (1 — оптическая ось, параллельная плоскости падения, 2 — перпендикулярная). Расчетные значения в данном случае получены в предположении отражения света от границы раздела среда с показателем преломления 1 и ориентированный одноосный кристалл с показателем преломления $n_o = 1,54264$ и $n_e = 1,55169$ (рис. 4).

Видно, что экспериментально измеренные значения параметров Ψ_j достаточно близки к их расчетным значениям практически для всех образцов.

Таблица 3

Номер точки	φ , град	Δ	Ψ	n	d , \AA
1	70	$79^\circ 41'$	$44^\circ 21'$	1,4616	1051
2	70	$79^\circ 39'$	$44^\circ 18'$	1,4618	1050
3	70	$79^\circ 30'$	$43^\circ 29'$	1,4619	1037
4	70	$79^\circ 30'$	$43^\circ 45'$	1,4620	1038
5	70	$79^\circ 44'$	$44^\circ 24'$	1,4612	1052

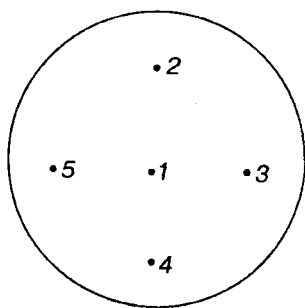


Рис. 3. Поверхность кремниевой шайбы с диэлектрическим покрытием как отражающая система (см. рис. 2): цифры — точки, на которых проводились измерения

Экспериментально измеренный параметр Δ_j отличается от его расчетного значения. В некоторых случаях для совершенно разных образцов экспериментально измеренные значения Δ_j с точностью до деления лимбов угломерных устройств эллипсометра совпадают с их расчетными значениями. Когда отличием значения Δ_j от расчетного можно пре-

небречь, ориентированный кристаллический кварц может служить прекрасным средством контроля для аттестации эллипсометра.

Таблица 4

Номер образца	Дата	φ , град	Ψ_{\parallel}	$\delta\Psi_{\parallel}$, мин	Δ_{\parallel}	$\delta\Delta_{\parallel}$	Ψ_{\perp}	$\delta\Psi_{\perp}$, мин	Δ_{\perp}	$\delta\Delta_{\perp}$
1	09.12.81	45	18°08'	3	179°21'	0°39'	17°32'	1	179°32'	0°28'
1	09.12.81	50	11°07'	3	178°57'	1°03'	10°35'	1	179°12'	0°48'
1	09.12.81	55	3°36'	0	177°16'	2°44'	3°09'	0	176°59'	3°01'
1	09.12.81	60	4°15'	2	2°50'	2°50'	4°36'	2	2°41'	2°41'
1	09.12.81	65	11°59'	1	1°08'	1°08'	12°12'	0	0°54'	0°54'
1	09.12.81	70	19°24'	0	0°40'	0°40'	19°33'	0	0°30'	0°30'
1	17.05.82	45	18°09'	2	179°28'	0°32'	17°31'	2	179°38'	0°22'
1	17.05.82	50	11°09'	1	179°09'	0°51'	10°35'	1	179°22'	0°38'
1	17.05.82	55	3°34'	2	177°24'	2°36'	3°07'	2	177°35'	2°25'
1	17.05.82	60	4°15'	1	2°01'	2°01'	4°35'	1	1°42'	1°42'
1	17.05.82	65	11°59'	1	0°37'	0°37'	12°13'	1	0°39'	0°39'
1	17.05.82	70	19°23'	1	0°20'	0°20'	19°33'	0	0°22'	0°22'
2	21.02.85	70	19°24'	0	0°36'	0°36'	19°32'	0	0°26'	0°26'
3	21.02.85	70	19°24'	0	0°33'	0°33'	19°33'	0	0°31'	0°31'
4	20.02.85	70	19°24'	0	0°34'	0°34'	19°33'	0	0°33'	0°33'
5	15.03.85	70	19°24'	0	0°39'	0°39'	19°32'	1	0°29'	0°29'
6	03.09.85	70	19°23'	1	0°41'	0°41'	19°33'	0	0°33'	0°33'
7	22.11.85	70	19°24'	0	0°54'	0°54'	19°33'	0	0°47'	0°47'
8	05.12.85	70	19°25'	1	0°15'	0°15'	19°32'	1	0°17'	0°17'
9	06.12.85	70	19°24'	0	0°08'	0°15'	19°32'	1	0°06'	0°06'
10	13.01.86	70	19°22'	2	0°22'	0°22'	19°32'	1	0°18'	0°18'

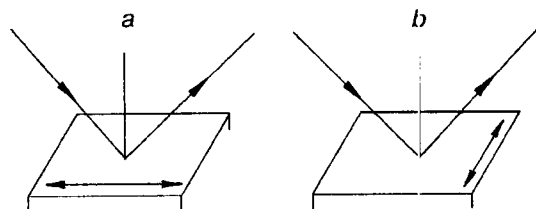


Рис. 4. Отражение излучения от границы раздела диэлектрик — одноосный кристалл. Отражающая поверхность кристалла, параллельная направлению оптической оси: *a* — оптическая ось кристалла, параллельная плоскости падения излучения; *b* — перпендикулярная

В настоящее время для аттестации эллипсометров разработаны специальные образцы (средство испытаний эллипсометров), встроенные внутри призмы из прозрачного материала, с целью защиты их от влияния окружающей среды. Однако из-за свойства материала призмы, технических допусков и несовпадения нормалей к поверхности призмы и луча эти образцы не обладают никаким преимуществом относительно плавленного и кристаллического кварца. При совпадении нормалей к поверхности призмы и луча резко ухудшается степень гашения. В этом случае они не пригодны для аттестации эллипсометров.

Как было отмечено, в качестве *средств контроля* можно использовать также пропускающие системы со стабильным (постоянным) значением комплексного отношения двух ортогональных коэффициентов пропускания, например, специально отщепленные пластинки из слюды. Нами разработаны другие стабильные пропускающие системы [28], с помощью которых можно получить различные Ψ , Δ с постоянными значениями и высокой воспроизводимостью их численных значений.

Однако требования к аттестации и юстировке эллипсометра для научно-исследовательских работ могут оказаться значительно выше, чем для контроля каких-либо параметров отражающей (или пропускающей) системы. Поэтому ниже предлагаются некоторые способы проверки для тех, кто намерен проводить строгий контроль качества юстировки и аттестации своего прибора.

1. *Проверка несовершенств поляризатора, анализатора и угломерных устройств в бескомпенсаторной схеме эллипсометра.* Плечи поляризатора и анализатора устанавливаются в горизонтальном положении (поляризатор и анализатор работают «на просвет»). Достигается максимальное гашение на выходе эллипсометра поворотом поляризатора и анализатора. Затем поляризатор (анализатор) поворачивается на определенный (например, 90 или 45°) или любой другой предельно минимальный угол. После этого поворотом анализатора (поляризатора) достигается максимальное гашение на выходе эллипсометра.

Сравниваются углы поворота поляризатора и анализатора. Если они с точностью делений лимбов угломерных устройств прибора между собой совпадают при повороте их на 360° с произвольно выбранным интервалом, то это свидетельствует о пренебрежимо малом значении параметра несовершенств обоих поляризаторов и их угломерных устройств. В противном случае необходимо искать причины несовершенств и их устранять.

2. *Проверка несовершенств поляризатора и анализатора при отражении излучения от поверхности диэлектрика.* Эллипсометр устанавливается на отражение под определенным углом, например 70°. В качестве отражающей системы выбирается диэлектрик (например, хорошо отполированный плавленный кварц). Проводится юстировка эллипсометра по методике, изложенной в [19], т. е. определяется показание лимбов поляризатора и анализатора, когда их ось пропускания совпадает с плоскостью падения ($P = P_p$, $A = A_p$). Поляризатор поворачивается от плоскости падения на определенный угол, например $\pm 15^\circ$. Поворотом анализатора достигается гашение на выходе

эллипсометра. Сравниваются полученные два значения показаний лимбов анализатора в условии гашения. По абсолютному значению они должны совпадать. В противном случае это свидетельствует о наличии несовершенств поляризатора или его угломерного устройства, которые необходимо устранять. Аналогично проверяется несовершенство анализатора.

3. *Проверка постоянства плоскости падения при изменении угла падения излучения на исследуемый объект.* Для получения дополнительной информации часто используют результаты измерений, найденные при нескольких углах падения на исследуемый объект. В этом случае требуется сохранение положения плоскости падения при изменении угла падения.

При разных углах падения проводится юстировка эллипсометра по методике, изложенной в [19]. Совпадение юстировочных параметров для всех углов падения свидетельствует, очевидно, о постоянстве плоскости падения при изменении угла падения.

Проверку постоянства плоскости падения при изменении угла падения еще проще можно осуществить следующим образом. Поляризатор и анализатор устанавливаются в положение P_p, A_s (или P_s, A_p), т. е. вектор электрического поля находится в плоскости падения (или перпендикулярно ей). В этом положении поляризатора и анализатора для всех углов падения при отражении света от *изотропного образца* на выходе эллипсометра наблюдается минимум интенсивности излучения, отсутствие которого при каком-либо угле падения свидетельствует о несохранении плоскости падения.

4. *Проверка качества работы приемника излучения.* Известно, что при отражении от диэлектрика в окрестности угла Брюстера резко уменьшается p -компонента вектора электрического поля отраженной волны. Это обстоятельство можно использовать для проверки порога чувствительности приемника излучения следующим образом. На предметный столик эллипсометра устанавливается диэлектрик. Угол падения выбирается в окрестности угла Брюстера. Поляризатор устанавливается в положении P_p . В этом случае, допустив $I_0 = I$ и подставив значение r_p в формулу (2), можно оценить I_p приемника излучения в относительных единицах по соответствующему углу поворота анализатора. Устанавливая нужный угол падения, можно выбрать сколь угодно минимальное значение r_p .

5. *Проверка компенсатора (четвертьволновой пластинки).* Как было отмечено, определению параметров компенсатора посвящено большое число работ. Поэтому на них не будем останавливаться. Ниже анализируется точность при однозонной и многозонной методиках эллипсометрических измерений и предлагается простой способ определения параметров компенсатора и условий для достижения и реализации максимальной их точности.

6. *Измерение остаточной (малой) эллиптичности поляризатора и анализатора для PCSA-схемы эллипсометра.* Согласно [8] малой эллиптичности поляризатора, t_{2p} можно определять из результатов четырех неэквивалентных углов гашения анализатора:

$$t_{2p} = \text{res}1A / 4\sin 2\Psi,$$

где $\text{res}1A = A_1 - A_2 - A_3 + A_4$.

Несложно показать, что, выбирая систему отсчета относительно быстрой и медленной оси компенсатора (более подробно см. [29, 30]), малую эллиптичность анализатора можно определять из выражения

$$t_{2A} = \text{res}1P' / 4\sin 2(\arctg T_c),$$

где $\text{res}1P' = P_1 - P_2 - P_3 - P_4$.

В табл. 5 в качестве примера представлены допустимые значения несовершенств и их отклонений в оптических элементах и узлах прибора для эллипсометров типа ЛЭФ-2, ЛЭФ-3М с минутными угломерными устройствами, которыми можно пренебречь.

Т а б л и ц а 5

Элемент, узел	Вид несовершенства или отклонение	Значение
Поляризатор (анализатор)	Параметр малой эллиптичности	1,5'
Компенсатор (четвертьволновая пластинка)	а) отклонение разности фаз от 90°,	± 3°
	б) отклонение от ортогональности двух собственных волн	± 1'
	в) отклонение отношения коэффициентов пропускания в двух ортогональных направлениях от единицы или мера остаточного дихризма	± 2'
Приемник излучения	Минимальный угол поворота поляризатора (анализатора) при отражении света от плавленого кварца при угле падения 56°, который обнаруживается фоторегистрирующей системой прибора, не более	± 1'
Узел угла падения	Отклонение P_p, A_p, C_p от их исходных значений при всех углах падения.	± 1'
Отражающая система	Разность расчетных и экспериментальных значений поляризационных углов для плавленого кварца	± 1'

Анализ точности при однозонной и многозонной методиках эллипсометрических измерений. Эллипсометрические измерения можно проводить по однозонной или многозонной методике. Удобнее однозонная методика, особенно при автоматизации измерений. С целью уменьшения и устранения влияния несовершенств оптических поляризационных элементов на результаты измерений широко используются методы зонных усреднений или «инварианты эллипсометрии» [30—33]. Кроме того, формулы зонных усреднений существенно упрощают сложную вычислительную процедуру определения эллипсометрических параметров Ψ и Δ . Однако при обеих методиках точность определения эллипсометрических углов одинакова.

На примере определения разности фаз, вносимой фазовой пластинкой, покажем, что ни зонные усреднения, ни «инварианты эллипсометрии» [30—33] не могут повысить точность результатов эллипсометрических измерений.

Согласно [29, 30], в зависимости от выбора системы отсчета компенсатор может быть исследуемым объектом, а образец — выполнять вспомогательную роль. Параметры компенсатора в условиях гашения на выходе эллипсометра можно определять из выражения [8]

$$\rho_c = \frac{1}{\operatorname{tg}(P - C)} \frac{\rho_s + \operatorname{tg}C \operatorname{tg}A}{\rho_s \operatorname{tg}C - \operatorname{tg}A},$$

где $\rho_c = T_c \exp(i\delta)$ и $\rho_s = \operatorname{tg}\Psi \exp(i\Delta)$ — комплексные амплитудные коэффициенты пропускания и отражения для компенсатора и образца соответственно; P, A и C — азимутальные углы гашения поляризатора, анализатора и компенсатора в p, s -системе координат. Разность фаз δ , вносимая фазовой пластинкой, определяется из выражения

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \sin\Delta}{(1 - 2\cos\Delta \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{ctg}2C - \operatorname{tg}^2\beta)\sin2C}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg}\beta = \operatorname{tg}A/\operatorname{tg}\Psi$. Измерения являются наиболее точными при $C = \pm \pi/4$, тогда из (3) имеем

$$\delta = \arctg(k \cdot \sin\Delta), \quad (4)$$

где $k = \pm \operatorname{tg}2\beta$.

Анализируем точность определения δ в зависимости от параметра Δ :

$$\frac{d\delta}{d\Delta} = \frac{k \cdot \cos\Delta}{1 + (k \cdot \sin\Delta)^2}.$$

Видно, что минимальная ошибка δ достигается при $\Delta = \pi/2(2m + 1)$. Действительно, из соотношения (4) следует, что

$$\left. \frac{d^2\delta}{d^2\Delta} \right|_{\Delta=\pi/2} = -\frac{k^2}{2} < 0.$$

Таким образом, максимальная точность определения параметров δ достигается при $\Delta = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$, $m = 0, 1$.

Аналогичным образом нетрудно убедиться, что заданных значений $\Delta \neq \pi m$ максимальная точность определения параметра δ достигается при $\Psi = \pi/4$. Точность определения параметра T_c также максимальна именно при $\Delta = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$ и $\Psi = \pi/4$.

Наглядно вышеизложенное можно доказать на основе зависимости азимутальных углов гашения от Ψ и Δ и несовершенств компенсатора. Как и в [29, 30], предположим, что поляризатор и анализатор являются идеально линейными. Кроме того, погрешности азимутальных углов δA , δP , δC полагаются равными нулю. На практике это достигается методикой, предложенной в работе [19]. Как показано в [29], при $\Delta = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$ и $\Psi = \pi/4$ имеем

$$\delta = 2A. \quad (5)$$

Используя разложения в ряд Тейлора, значение ρ_c , согласно [8], из выражения (4) с учетом (5) можно получить:

$$\delta = 2\Psi + t_{1c} \sin 2\Psi \cdot \sin\Delta, \quad (6)$$

где t_{1c} представляет собой отклонения фазового сдвига в компенсаторе от $\pi/2$. Предположим, что $\delta = 95^\circ$, $\Psi = 45^\circ$, тогда из (6) находим

$$t_{1c} = 5^\circ / \sin\Delta.$$

Видно, что истинное значение t_{1c} получается только при $\Delta = \pi/2$.

В табл. 6 представлены определяемые значения и ошибки параметра t_{1c} в зависимости от Δ , где наблюдается рост ошибки с уменьшением параметра Δ .

Очевидно, что аналогичные расчеты можно провести и для Ψ . Также можно убедиться, что наблюдается рост ошибки с увеличением отличия параметра Ψ от $\pi/4$.

Следует подчеркнуть, что указанная ошибка будет и при двухзонной, и четырехзонной методиках расчета, а также при расчете по инвариантам эллипсометрии. В зависимости от выбора зоны

Т а б л и ц а 6

Δ , град	t_{1c} , град	σ , %
90	5	0
85	5,019	0,38
80	5,077	1,54
75	5,176	3,53
70	5,321	6,42
65	5,517	10,34

может изменяться только знак параметра t_{1c} , точность определения не изменяется. Все указанные утверждения справедливы и для параметра T_c . На основе проведенного анализа можно сделать следующие утверждения:

— для достижения и реализации максимальной точности определения параметров компенсатора измерения необходимо проводить при следующих значениях эллипсометрических параметров отражающей системы: $\Delta = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$ и $\Psi = \pi/4$;

— при Ψ , отличной от $\pi/4$, и Δ , отличной от $\pi/2$, никакие зонные усреднения или использование «инвариантов эллипсометрии» не повышают точности определения параметров компенсатора;

— зонные усреднения упрощают и исключают необходимость учета отличий Ψ и Δ от $\pi/4$ и Δ от $\pi/2$, но не повышают точности определения параметров компенсатора;

— то, что названо инвариантами эллипсометрии, не является инвариантами в полном смысле этого термина.

В силу равнозначности компенсатора и образца следует, что для определения эллипсометрических углов Ψ и Δ с максимальной точностью необходимо использовать четвертьволновые пластинки без дихроизма ($\delta = \pi/2$, $T_c = 1$).

ВЫВОДЫ

Рассмотрены несовершенства или погрешности каждого оптического элемента и эллипсометра в целом. Показано их взаимозависимое влияние на достоверность результатов измерений.

Установлено, что для контроля работоспособности (аттестации) эллипсометра успешно можно использовать плавный и кристаллический кварц с полированной поверхностью, а также структуру Si—SiO₂, полученную термическим окислением. На правильно аттестованном эллипсометре для полированных плавного и кристаллического кварца экспериментально измеренные поляризационные углы должны совпадать с расчетными с точностью делений угломерных устройств прибора. Для структуры Si—SiO₂ должна наблюдаться воспроизводимость рассчитанных значений показателя преломления и толщины пленки из экспериментальных поляризационных углов.

Показано, что с помощью самого эллипсометра можно проверить величину параметров несовершенств его оптических элементов. В бескомпенсаторной схеме эллипсометра наличие несовершенств поляризаторов можно оценить качественно, а с компенсатором — количественно.

На основе анализа доказано, что широко используемые зонные усреднения позволяют лишь исключить влияние несовершенств компенсатора без повышения точности измерений. Для достижения максимальной точности необходимо использовать четвертьволновые пластинки без дихроизма ($\delta = \pi/2$, $T_c = 1$). Соответственно для определения параметров компенсатора с максимальной точностью необходимо применять отражающую систему с параметрами $\Delta = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$ и $\Psi = \pi/4$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржанов А. В., Свиташев К. К., Семенов А. И. и др. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979.
2. Современные проблемы эллипсометрии: Сб. материалов I-й Всесоюз. конф. /Отв. ред. А. В. Ржанов. Новосибирск: Наука, 1980.
3. Эллипсометрия — метод исследования поверхности: Сб. материалов II-й Всесоюз. конф. Новосибирск: Наука, 1983.
4. Эллипсометрия: теория, методы, приложения: Сб. материалов III-й Всесоюз. конф. Новосибирск: Наука, 1987.
5. Chan C. C., Tamir T. Angular shift of a Gaussian beams reflected near the Brewster angle // Opt. Lett. 1985. 10, N 8. P. 378.
6. Шерклифф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.
7. Zaininger K. H., Revesz A. C. Ellipsometry—a valuable tool in surface research // RCA Rev. 1964. 25, N 1. P. 85.
8. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
9. Горшков М. М. Эллипсометрия. М.: Мир, 1974.
10. Yerrard U. G. Optical compensators for measurement of elliptical polarization // JOSA. 1948. 38, N 1. P. 35.
11. Holmes D. A., Feneht D. L. Formulas for using wave plates in ellipsometry // JOSA. 1967. 57. P. 466.

12. Семененко А. И., Миронов Ф. С. Однозонная методика // Оптика и спектроскопия. 1977. 42, вып. 3. С. 528.
13. Воронкова Е. М., Гречушников Б. И., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники: Справочное издание. М., 1965.
14. Aspnes D. E. Effect of component optical activity in data reduction and calibration of rotating-analyser ellipsometers // JOSA. 1974. 64, N 6. P. 812.
15. Aspnes D. E. Alignment of an optically active biplate compensator // Appl. Opt. 1971. 10, N 11. P. 2545.
16. Миронов Ф. С., Семененко А. И. О проявлении оптической активности кристаллического компенсатора в эллипсометрии // УФЖ. 1981. 26, № 6. С. 938.
17. Миронов Ф. С., Семененко А. И. О проявлении оптической активности кристаллического компенсатора в эллипсометрии // УФЖ. 1982. 27, № 3. С. 338.
18. Пахомов А. Г., Константинова А. Ф. Метод юстировки эллипсометра, устраняющий влияние оптической активности компенсатора // ЖТФ. 1981. 51, вып. 2. С. 442.
19. Свиташев К. К., Хасанов Т. Учет оптической активности компенсатора при юстировке эллипсометра // Оптика и спектроскопия. 1986. 61, вып. 2. С. 399.
20. Jonson Y. A., Bashara N. M. General equations of symmetrical ellipsometer arrangements // JOSA. 1970. 60, N 2. P. 221.
21. Иоффе С. Б., Шаробура В. П. Изменения в показаниях эллипсометра, обусловленные многократными отражениями света в кварцевой компенсирующей пластинке // ОМП. 1974. № 5. С. 3.
22. Мардежев А. С., Семененко А. И., Хасанов Т. Температурная зависимость параметров компенсатора // Эллипсометрия — метод исследования поверхности. Новосибирск: Наука, 1983.
23. Свиташев К. К., Хасанов Т. Измерение деполяризованной компоненты в плоскопараллельной пластинке // Оптика и спектроскопия. 1989. 66, вып. 1. С. 218.
24. Рыхлицкий С. В., Свиташев К. К., Соколов В. К., Хасанов Т. О влиянии многократного отражения на работу фазовой кварцевой пластинки // Оптика и спектроскопия. 1987. 63, вып. 5. С. 1092.
25. Свиташев К. К., Хасанов Т. Измерение малых вращений плоскости поляризации // Оптика и спектроскопия. 1983. 54, вып. 3. С. 538.
26. Григорьева Т. И., Зилинг К. К., Мардежев А. С., Хасанов Т. Эллипсометрическое определение толщины и оптических постоянных пленок титана с учетом поверхностного окисления. Новосибирск, 1985. (Препр. СО АН СССР. ИФП; № 3-85).
27. Любинская Р. И., Мардежев А. С., Свиташев К. К., Хасанов Т. Определение оптических постоянных одноосных кристаллов с учетом поверхностной изотропной пленки из эллипсометрических измерений // Оптика и спектроскопия. 1985. 59, вып. 2. С. 353.
28. Пат. 1675817 Россия. Фазосдвигающее устройство /А. С. Мардежев, Т. Хасанов. Заявл. 05.06.89; Оpubл. 07.09.91, Бюл. № 33.
29. Хасанов Т. Определение параметров фазовой пластинки и однозонная методика эллипсометрических измерений // Эллипсометрия: теория, методы, приложения. Новосибирск: Наука, 1987. С. 79.
30. Хасанов Т. Об использовании измерительных зон в эллипсометрических измерениях // Оптика и спектроскопия. 1988. 64, вып. 5. С. 1087.
31. Семененко А. И. Измерительные зоны эллипсометра // Оптика и спектроскопия. 1975. 39, вып. 3. С. 587.
32. Семененко А. И. Инварианты эллипсометрии // Оптика и спектроскопия. 1978. 45, вып. 2. С. 387.
33. Семененко А. И. К теории измерительных зон эллипсометра // Там же. Вып. 1. С. 199.

Поступила в редакцию 25 ноября 1996 г.