

УДК 535.5.511:531.7

© В. В. Бобро, А. И. Семененко

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ. НОВЫЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ

Рассмотрены особенности метрологического обеспечения эллипсометрии. Предложен новый подход к метрологии эллипсометрии, в рамках которого разброс экспериментальных значений поляризационных углов Ψ и Δ по измерительным зонам рассматривается как объективный метрологический критерий. Приведены экспериментальные результаты по межзонному разбросу углов Ψ и Δ на образцах со сверхтонкими поверхностными пленками.

Предельные возможности метода эллипсометрии могут быть реализованы только через конкретный прибор, при этом эллипсометры разного типа дают неодинаковую степень реализации предельных возможностей. Задача чрезвычайно усложняется из-за высокой чувствительности метода к состоянию исследуемой поверхности. В результате прибор дает ошибки, связанные не только со свойствами самого прибора, но и с качеством измеряемого образца. В этих условиях очень важной и трудной задачей является выделение чисто приборных погрешностей из процесса эллипсометрических измерений и разработка методов их существенного уменьшения, позволяющих приблизиться к предельным возможностям эллипсометра. Для решения этой задачи особое значение приобретает разработка надежного метрологического обеспечения эллипсометрии.

В эллипсометрии чаще всего используются фотометрические («ненулевые») приборы, которые не позволяют в явной форме разделить приборные погрешности и ошибки, связанные с качеством образца. Поэтому декларируемые высокие точностные характеристики таких приборов могут лишь ввести в заблуждение, особенно если иметь в виду не только качество, но и проявления поверхностной анизотропии, присущей большинству исследуемых образцов.

Физические основы эллипсометрии проявляются прежде всего при использовании «нулевого» подхода к процессу измерения поляризационных углов Ψ и Δ , характеризующих изменение состояния поляризации светового пучка в процессе его отражения от исследуемого образца [1]. Поэтому, разрабатывая надежную, научно обоснованную метрологию эллипсометрии, целесообразно опираться на данный подход. Принципиальную роль при «нулевом» подходе играют измерительные зоны прибора.

Решая метрологическую проблему, обычно идут по пути создания эталонных образцов, в слу-

чае эллипсометрии это были бы образцы с заданными геометрическими и оптическими параметрами. Однако метод эллипсометрии при таком подходе практически невозможно поверять каким-либо другим методом. Это связано с поразительно высокой чувствительностью метода эллипсометрии к изменению параметров исследуемых образцов. Поэтому вроде бы совершенно естественным является принятый для эллипсометрии способ аттестации прибора по значениям поляризационных углов эталонных образцов. Но и этот путь не является полностью удовлетворительным, т. к. в любом случае существует заметный разброс значений поляризационных углов эталонных образцов по измерительным зонам.

Действующая в настоящее время в эллипсометрии метрология как раз и основана на использовании эталонного образца, экспериментальные значения поляризационных углов Ψ и Δ которого определяются путем усреднения по четырем измерительным зонам. При этом результаты измерения отличаются большим разбросом по зонам прибора, что объясняется прежде всего дефектами прибора, ограниченностью принятой методики по определению параметров фазового компенсатора, а также заметной анизотропией разработанного эталонного образца, которая не учитывается в используемых для экспериментального определения поляризационных углов зонных соотношениях «изотропного» случая. В результате усредненные значения углов Ψ и Δ , несмотря на некоторое их улучшение, все-таки заметно ограничены в своей точности и не отражают истинных свойств образца. Такая направленность метрологии не стимулирует повышения точности приборов, скрадывает свойства анизотропии и качество поверхности отражающих систем, а в конечном итоге весьма ограничивает возможности метода эллипсометрии. В основном по этой причине до сих пор и не был создан для метрологических целей эллипсометр повышенной точности, который одновременно мог бы быть ис-

пользован как для проведения научных исследований, так и для технологических целей.

В то же время разброс экспериментальных значений углов Ψ и Δ по измерительным зонам может рассматриваться как объективный метрологический критерий, определяющий точность измерения поляризационных углов и, следовательно, точность нахождения физико-химических параметров приповерхностных слоев. Величина этого разброса зависит от точности угломерных устройств, чувствительности фотодетектора, от точности определения и стабильности полного набора параметров оптических элементов (прежде всего фазового компенсатора), а также от многих других показателей прибора, определяющих его совершенство. Данный подход лежит в основе однозонной методики эллипсометрических измерений, предполагающей уменьшение разброса экспериментальных значений поляризационных углов Ψ и Δ по измерительным зонам до того минимума, который определяется свойствами прибора [2, 3].

Особого внимания заслуживает то, что любой отражающий объект в какой-то мере обладает анизотропией, пренебрежение которой неизбежно приводит к снижению точности определения эллипсометрических параметров. Для учета анизотропии отражающих сред необходимо использовать метод обобщенных измерительных зон [1, 4], реализующий однозонную методику, но уже по обобщенной схеме.

Реализация однозонной методики в рамках единой эллипсометрической теории, охватывающей как изотропные, так и анизотропные отражающие системы, в конечном итоге позволит проводить аттестацию эллипсометров любого класса точности. В связи с этим особое значение приобретают разработка и создание метрологического эллипсометра повышенной точности для аттестации серийно выпускаемых эллипсометров и оптических элементов к ним.

Однозонная методика, таким образом, является теоретической основой для создания надежного метрологического обеспечения эллипсометрии и конструкторских разработок новых типов прецизионных приборов.

Для решения чисто метрологической задачи в рамках нового подхода требуется достаточно полный набор качественных образцов, которые соответствующими им значениями углов Ψ и Δ охватывали бы всю выделенную часть координатной плоскости (Ψ , Δ). Первоначально на метрологическом эллипсометре по таким образцам проводятся измерения во всех зонах и устанавливается степень реализации однозонной методики. Затем такие же измерения проводятся на серийном приборе и по степени реализации однозонной методики делается вывод о реальной точности серийного

прибора. В случае необходимости проводятся работы по дальнейшей доводке данного прибора. При этом ориентиром являются результаты, полученные на метрологическом эллипсометре.

Такая процедура требует именно высококачественных образцов. Это связано с тем, что разброс поляризационных углов Ψ и Δ по измерительным зонам определяется не только свойствами прибора, но и качеством исследуемых образцов. Математически это можно выразить следующими формулами:

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

где $\delta\Psi^{(np)}$, $\delta\Delta^{(np)}$ и $\delta\Psi^{(обр)}$, $\delta\Delta^{(обр)}$ — разброс Ψ и Δ по измерительным зонам, обусловленный свойствами прибора и качеством поверхности исследуемого образца соответственно.

В случае идеальных образцов

$$\delta\Psi^{(обр)} = 0, \quad \delta\Delta^{(обр)} = 0, \quad (2)$$

и общий разброс определяется исключительно свойствами прибора

$$\delta\Psi = \delta\Psi^{(np)}, \quad \delta\Delta = \delta\Delta^{(np)}, \quad (3)$$

поэтому и необходимы для метрологических целей образцы, близкие к идеальным.

В то же время такая сложная зависимость межзонного разброса углов Ψ и Δ обеспечивает принципиальную возможность оценивать качество реальных образцов, измеряемых на серийном приборе, по степени реализации однозонной методики. Ухудшение на данном приборе степени реализации однозонной методики (по сравнению с измерениями на качественных образцах) может быть непосредственно связано с неоднородностью образцов по поверхности, шероховатостью границ раздела и т.д.

Если влияние поверхности существенно преобладает над вкладом прибора

$$\delta\Psi^{(обр)} \gg \delta\Psi^{(np)}, \quad \delta\Delta^{(обр)} \gg \delta\Delta^{(np)}, \quad (4)$$

то полный разброс, очевидно, определяет в основном качество поверхности

$$\delta\Psi \approx \delta\Psi^{(обр)}, \quad \delta\Delta \approx \delta\Delta^{(обр)}. \quad (5)$$

В общем случае ситуация, конечно, гораздо более сложная. Для определения чисто приборных погрешностей $\delta\Psi^{(np)}$ и $\delta\Delta^{(np)}$ необходимо использовать объективные способы выявления наиболее качественных (метрологических) образцов. Хорошо известно, что от качества поверхности зависит глубина минимума интенсивности светового пучка на выходе прибора в ситуации гашения. Чем выше качество поверхности, тем большую глубину имеет минимум. Это обстоятельство можно использовать для выявления наиболее качественных

образцов. Однако необходимо использовать и другие методы, например оптические, рентгеновские, электронную микроскопию и т.д.. Определив по качественным (метрологическим) образцам приборные погрешности $\delta\Psi^{(np)}$ и $\delta\Delta^{(np)}$, а это предполагает, очевидно, выполнение условий

$$\delta\Psi^{(обр)} \ll \delta\Psi^{(np)}, \quad \delta\Delta^{(обр)} \ll \delta\Delta^{(np)}, \quad (6)$$

и зная полный разброс $\delta\Psi$, $\delta\Delta$ для произвольного образца, локализованного по Ψ и Δ в той же сравнительно небольшой области, что и соответствующий метрологический образец, легко находим (см. формулы (1)) параметры $\delta\Psi^{(обр)}$ и $\delta\Delta^{(обр)}$, характеризующие качество исследуемого образца.

Рассмотренная выше сложная зависимость межзонного разброса углов Ψ и Δ ярко проявляется в эксперименте по реализации однозонной методики на образцах кремния со сверхтонкими поверхностными пленками, проведенном на приборе ЛЭФ-ЗМ-1, выпускаемом ОАО «Феодосийский приборостроительный завод».

Экспериментальные измерения проведены на пяти образцах, из которых четыре представляют собой сверхтонкие пленки двуокиси кремния на кремнии, а один – сверхтонкую пленку теллура на кремнии. При этом для каждого образца использованы углы падения светового пучка от 50 до 75° через $2,5^\circ$ (всего 11 углов). Если под измерительной ситуацией понимать совокупность измерений (прежде всего положений гашения анализатора и поляризатора) на одном образце для одного угла падения, то в рассматриваемом случае были исследованы 55 (5×11) измерительных ситуаций.

Параметры кварцевого компенсатора определены в результате численного решения системы уравнений, представляющих собой инвариантные соотношения эллипсометрии анизотропных сред [1, 4]. Каждое уравнение такой системы определено на одной измерительной ситуации и позволяет найти один комплексный параметр. Для нахождения трех комплексных параметров необходимы как минимум три измерительных ситуации. Была разработана математическая программа для решения соответствующей обратной задачи. При этом было учтено математическое условие, связывающее недиагональные элементы ρ_1 и ρ_2 матрицы Джонса компенсатора и позволившее получить гораздо более надежное решение обратной задачи. Минимальное количество (равное трем) измерительных ситуаций, необходимое для решения обратной задачи, назовем измерительным комплексом. Для большей надежности были использованы три измерительных комплекса. При выборе этих комплексов учитывалось, что наилучшие результаты при определении параметров компенсатора получаются, если поляризационный угол Δ в каждой измерительной ситуации выбранных комплек-

сов не слишком приближается к значению 180° [1]. Кроме того, измерительные ситуации, образующие эти комплексы, должны были заметно отличаться одна от другой.

Поляризационные углы рассчитаны в приближении изотропной среды по результатам измерений в четырех измерительных зонах. По этим данным определен разброс поляризационных углов Ψ и Δ по измерительным зонам (их максимальные отклонения $\delta\Psi$ и $\delta\Delta$ по зонам от средних значений Ψ_{cp} и Δ_{cp}). Полученные для всех пяти образцов результаты, отвечающие углам падения 55 , 60 , 65 , 70 и 75° , проиллюстрированы в таблице.

Приведенные в таблице результаты, характеризующие степень практической реализации однозонной методики эллипсометрических измерений, на первый взгляд не являются вполне удовлетворительными, если связывать наблюдающийся межзонный разброс поляризационных углов Ψ и Δ исключительно с погрешностями прибора. На углах падения от 50 до $67,5^\circ$ для большинства измерений разброс углов Ψ и Δ по измерительным зонам, определяемый величинами $\delta\Psi$ и $\delta\Delta$, оказался в пределах 5 – 20 мин. Что касается углов падения 70 , $72,5$ и 75° , то для них результаты оказались абсолютно неудовлетворительными.

Прежде всего ясно, что наблюдаемый межзонный разброс углов Ψ и Δ в значительной степени, особенно в окрестности угла Брюстера, которой принадлежит интервал углов падения (70 , 75°), связан с неоднородностью рассматриваемых сверхтонких пленок по поверхности. Особая роль окрестности угла Брюстера определяется тем, что в этой области наблюдается повышенная чувствительность поляризационных углов Ψ и Δ к изменению состояния поверхности. В случае однородной подложки без пленки угловые зависимости Ψ и Δ на угле Брюстера имеют известные особенности: острие для Ψ и ступенька высотой в 180° для Δ [1]. С ростом пленки острие и ступенька размываются, при этом даже незначительные изменения в толщине пленки сопровождаются на каждом угле падения в окрестности угла Брюстера резкими изменениями Ψ и Δ , что особенно выражено для Δ . Это означает, что в случае очень тонких пленок большую роль в окрестности угла Брюстера начинает играть неоднородность поверхности в пределах светового пятна. По всей видимости, этот фактор оказывается наиболее существенным для сверхтонких пленок на кремнии, с которыми мы и имели дело. Ярким подтверждением этого является тот факт, что наиболее выраженный рост межзонного разброса в окрестности угла Брюстера (в интервале (70 , 75°)) наблюдается для угла Δ (см. таблицу), обладающего в этой окрестности по сравнению с углом Ψ гораздо большей чувстви-

Разброс поляризационных углов Ψ и Δ по измерительным зонам

Угол падения	Номер образца	$\Psi_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\delta\Psi$	$\delta\Delta$
55°	1	27° 47'	178° 33'	6'	12'
	2	27° 49'	177° 15'	9'	18'
	3	27° 47'	175° 27'	11'	19'
	4	27° 45'	175° 11'	11'	22'
	5	27° 59'	166° 56'	10'	19'
60°	1	23° 16'	178° 04'	7'	13'
	2	23° 17'	176° 11'	10'	24'
	3	23° 18'	173° 44'	14'	20'
	4	23° 20'	173° 25'	11'	21'
	5	23° 36'	161° 58'	13'	19'
65°	1	17° 37'	177° 02'	8'	20'
	2	17° 39'	174° 15'	11'	23'
	3	17° 46'	170° 35'	12'	21'
	4	17° 48'	169° 51'	12'	20'
	5	18° 33'	153° 33'	18'	25'
70°	1	10° 26'	174° 39'	10'	0° 55'
	2	10° 31'	169° 15'	14'	1° 07'
	3	10° 40'	163° 40'	23'	2° 32'
	4	10° 51'	161° 34'	11'	0° 44'
	5	12° 41'	135° 29'	18'	0° 51'
75°	1	01° 24'	133° 37'	10'	7° 10'
	2	02° 13'	112° 46'	18'	5° 16'
	3	03° 24'	103° 26'	22'	4° 48'
	4	03° 35'	102° 36'	20'	2° 08'
	5	09° 12'	086° 11'	35'	1° 35'

тельностью к изменению состояния поверхности [1].

Приведенные экспериментальные результаты показывают, что образцы кремния со сверхтонкими пленками на них не могут быть использованы для определения чисто приборных погрешностей. Качество поверхности в этом случае является главной причиной, определяющей межзонный разброс углов Ψ и Δ . Рассмотренный пример указывает на огромную важность проблемы подбора высококачественных образцов, предназначенных для определения приборных погрешностей.

В настоящее время на ОАО «Феодосийский приборостроительный завод» на основе новой метрологии разрабатывается проект по созданию образцового лазерного эллипсометра, предназначенного для метрологической аттестации серийных эллипсометров и оптических элементов к

ним, а также для научных исследований и контроля технологических процессов.

Опытный образец научно-метрологического эллипсометра будет создаваться на базе эллипсометра ЛЭФ-3М-1. В этом приборе будут использованы оптические элементы, удовлетворяющие весьма жестким требованиям, и высокочувствительный фотодетектор. Основательной переработке подвергнется узел компенсатора, что позволит строго контролировать пространственное положение компенсатора. Сам компенсатор будет термоустойчивым. Будут усовершенствованы также и лимбы оптических элементов. Контроль пространственного положения компенсатора крайне необходим. Такой контроль позволит проводить аттестацию фазовых компенсаторов, предназначенных для серийно выпускаемых эллипсометров.

Для достаточно точной аттестации фазовых компенсаторов необходимо выполнение еще одного важного условия. Образцы, по измерениям на которых определяются параметры фазовых компенсаторов, должны иметь высокую степень однородности по поверхности и слабо выраженную шероховатость границ раздела. Кроме того, образцы, на которых реализуется необходимое для определения параметров компенсатора число измерительных комплексов, должны заметно различаться по значениям поляризационных углов Ψ и Δ .

В заключение сделаем следующее обобщение. Межзонный разброс поляризационных углов является итоговым критерием для прибора, все оптические элементы которого прошли аттестацию по классической метрологической схеме. Дополнительным преимуществом данного метрологического критерия является также возможность аттестации и самих образцов по их качеству. Кроме того, он является критерием и в том смысле, что его числовые значения закладываются для разрабатываемых приборов, а для уже существующих определяют согласно разработанной метрологической схеме предельные значения этого критерия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржанов А.В., Свиташев К.К., Семененко А.И. и др. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с.
2. Семененко А.И., Бобро В.В. // Автометрия. 1997. № 1. С. 43–49.
3. Semenenko A.I., Bobro V.V., Mardezhov A.S., Semenenko E.M. A new metrological criterion in ellipsometry // Proc. SPIE. 1998. V. 3485. P. 336–342.
4. Семененко А.И., Миронов Ф.С. // Физика твердого тела. 1976. Т. 18, № 11. С. 3511–3514.

ОАО «Феодосийский приборостроительный завод»
(В.В. Бобро)
Институт прикладной физики НАН Украины,
г. Сумы
(А.И. Семененко)

Материал поступил в редакцию 21.02.99.

SPECIAL FEATURES OF METROLOGICAL SUPPORT IN ELLIPSOMETRY. NEW METROLOGICAL CRITERION

V. V. Bobro, A. I. Semenenko*

OAS «Feodosija Instrument-Making Plant»
*Institute of Applied Physics NASU, Sumy

Special features of metrological support in ellipsometry are examined. A new approach to metrology in ellipsometry is produced, where the spread of the measured polarizing angles Ψ and Δ over the measurement zones is studied as an objective metrological criterion. Experimental results over zone dispersion of angles Ψ and Δ on samples with ultrathin surface films are shown.