

## Эллипсометрический способ оценки неоднородности толщины тонкопленочных покрытий

А. С. БАТУРИН\*, В. С. БОРМАШОВ\*, В. П. ГАВРИЛЕНКО\*\*, А. В. ЗАБЛОЦКИЙ\*, С. А. ЗАЙЦЕВ\*, А. Ю. КУЗИН\*\*, П. А. ТОДУА\*\*, М. Н. ФИЛИППОВ\*\*\*

\* Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

\*\* Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Москва, Россия, e-mail: akuzin@nicrpu.ru

\*\*\* Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Россия, e-mail: MN@filippov.org.ru

Предложен эллипсометрический способ оценки неоднородности толщины тонкопленочных покрытий в диапазоне 5—150 нм.

**Ключевые слова:** тонкие пленки, толщина, эллипсометрия.

The ellipsometric method of depth inhomogeneity evaluation of thin films coatings in depth range from 5 to 150 nm is proposed.

**Key words:** thin films, thickness, ellipsometry.

Развитие микро- и нанозлектронных технологий, приборов квантовой электроники требует контролируемого (управляемого) создания металлических и диэлектрических покрытий толщиной от сотен до единиц нанометров [1]. Для этого во время производственного процесса необходимо следить за распределением толщины покрытия по поверхности протяженных объектов, например, полупроводниковых пластин диаметром 300 мм. Наиболее удобным представляется метод эллипсометрии. Причем во многих случаях не требуется измерять собственно толщину покрытия, а достаточно количественно оценить ее относительное изменение по площади подложки, т. е. неоднородность покрытия.

Предлагаемый в работе способ оценки неоднородности толщины покрытий основан на измерениях эллипсометрических углов для поляризованного света, отраженного от различных участков исследуемой поверхности. В качестве результата измерений неоднородности для *однослойных* покрытий используется относительное отклонение толщины анализируемого покрытия (АП) от среднего значения по интересующей области поверхности образца, а для *многослойных* — относительное отклонение эффективной толщины покрытия, рассчитываемое на основе определенной модели объекта. Общая толщина АП при использовании в эллипсометре оптического излучения видимой части спектра находится в диапазоне 5—150 нм. Материалы, входящие в состав АП, должны быть прозрачны для указанного оптического излучения. В процессе измерений составляется карта поверхности образца с указанными на ней точками проведения измерений. Требования к выбору точек зависят от характера технологического процесса и типа изделия. Если они не установлены, то рекомендуется располагать точки так, чтобы при ожидаемых латеральных размерах характерных участков с перепадом толщины исследуемого слоя от минимальной до максимальной на каждый такой участок приходилось не менее трех точек.

Оптимальный угол падения  $\theta$  выбирают на основе предварительной информации о материалах, входящих в состав

АП, и по оценочным значениям толщины всех его слоев следующим образом. Находят максимальное из доступных значений угла, при котором выполняется неравенство

$$(2\pi d / \lambda) \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)} < (\pi / 2) K, \quad (1)$$

где  $K$  — минимально возможное для используемой конфигурации положительное целое число;  $\lambda$  — используемая длина волны излучения;  $\theta$  — искомый угол падения;  $d$  — суммарная толщина покрытия;  $n$  — эффективный показатель преломления покрытия, рассчитываемый по формуле

$$n = \frac{\sum_{j=1}^N n_j d_j}{\sum_{j=1}^N d_j}, \quad (2)$$

где  $n_j$ ,  $d_j$  — показатель преломления и толщина  $j$ -го слоя;  $N$  — число слоев в покрытии.

После выбора угла падения по (1) измеряют эллипсометрические углы  $\psi$ ,  $\Delta$  в каждой точке. Полученные два набора таких углов  $\{\psi_i\}$ ,  $\{\Delta_i\}$  для каждой  $i$ -й точки поверхности образца усредняют

$$\langle \Psi \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Psi_i, \quad (3)$$

$$\langle \Delta \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta_i, \quad (4)$$

где  $M$  — общее число точек измерения на поверхности образца.

Расчет эффективных значений показателя преломления  $n_E$  и толщины покрытия  $d_E$  проводят по модели однородного плоскопараллельного слоя [4, 5]:

$$\langle \Psi \rangle = \Psi(n_E, d_E); \quad (5)$$

$$\langle \Delta \rangle = \Delta(n_E, d_E), \quad (6)$$

где  $\Psi(n_E, d_E)$ ,  $\Delta(n_E, d_E)$  — функциональные зависимости эллипсометрических углов от оптических параметров слоя. В качестве начальных приближений для величин  $n_E$ ,  $d_E$  используют значения, полученные при помощи (2).

Затем вычисляют функционал невязки  $\varepsilon$  по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\Psi_i - \langle \Psi \rangle)^2 + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\Delta_i - \langle \Delta \rangle)^2, \quad (7)$$

и погрешность невязки

$$\sigma_\varepsilon = 2 \left[ \left( \partial \Psi / \partial d \Big|_{n_E, d_E} \right)^2 + \left( \partial \Delta / \partial d \Big|_{n_E, d_E} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где  $\partial \Psi / \partial d$ ,  $\partial \Delta / \partial d$  — частные производные по толщине зависимостей эллипсометрических углов от оптических параметров слоя, рассчитанные для  $n_E$ ,  $d_E$ .

Разброс значений эффективной толщины, обусловленный конечной невязкой, определяют как

$$\Delta d_E = 4 \sqrt{\varepsilon / \sigma_\varepsilon}. \quad (9)$$

Относительное отклонение  $X$  толщины анализируемого покрытия (в процентах) от среднего значения по исследованной области находят по формуле

$$X = (\Delta d_E / d_E) 100. \quad (10)$$

Проверку предлагаемого способа оценки неоднородности пленочных покрытий проводили с использованием модельных расчетов и экспериментальных измерений параметров неоднородности толщины различных пленочных покрытий. Расчеты выполняли для  $\lambda = 632,8$  нм (He—Ne-лазер) и угла падения  $\theta = 70^\circ$ . Каждый этап проверки с использованием модельных расчетов — это применение разработанной методики к некоторому модельному объекту и сопоставление полученных результатов относительного отклонения толщины покрытия от среднего значения с заданными параметрами.

*Общий алгоритм проверки с использованием модельных расчетов* состоял из шести основных этапов:

выбор модели исследуемого объекта: задание количества слоев в покрытии и их материал, определение зависимостей вариации их толщины и т. п.;

расчет теоретических значений эллипсометрических углов  $\Psi$ ,  $\Delta$  при помощи решения прямой задачи эллипсометрии для выбранной модели объекта. В общем случае — это многослойное покрытие с учетом поглощения;

наложение на теоретические значения эллипсометрических углов шума с различным распределением;

решение обратной задачи эллипсометрии с целью определения эффективных значений  $d_E$ ,  $n_E$  для модели тонкого однородного слоя на толстой поглощающей гладкой подложке;

расчет относительного отклонения  $X$  эффективной толщины покрытия от ее среднего значения;

сравнение полученных по методике результатов с реальными величинами, заложенными в модели объекта.

Для работы выбраны пять моделей объектов:

*Первая* — абсолютно гладкое однослойное покрытие на кремниевой подложке. Рассмотрены варианты различных показателей преломления слоя, в том числе при поглощении на используемой длине волны. На подобных структурах оценены устойчивость и корректность работы методики при зашумленных сигналах. Для этого на рассчитанные значения углов  $\Psi$ ,  $\Delta$  был наложен шумовой сигнал с различным видом распределения: нормальным, равномерным и Пуассона.

*Вторая* — однослойное покрытие на кремниевой подложке с вариацией толщины по некоторому закону. Рассмотрены варианты различных показателей преломления слоя, в том числе при поглощении на используемой длине волны. Расчет велся для теоретических значений углов  $\Psi$ ,  $\Delta$  без учета возмущающих факторов, имеющих случайный характер (шум). В качестве законов для изменения толщины покрытия были рассмотрены: синусоидальный (плавные повторяющиеся вариации), параболический (плавное изменение профиля), модуль синуса (резкие пики) и случайный разброс с нормальным распределением (шероховатость).

*Третья* — однослойное покрытие на кремниевой подложке с вариацией толщины и с учетом воздействия возмущающих факторов, имеющих случайный характер, на измеряемые значения углов  $\Psi$ ,  $\Delta$ . Законы аналогичны второй модели и наложен шумовой сигнал с нормальным распределением.

*Четвертая* — двухслойное покрытие на кремниевой подложке с вариацией толщины одного из слоев. В качестве материалов выбраны различные оксидные покрытия, нижний слой которых представляет тонкую переходную область с оксидом кремния или неполным оксидом основного материала.

*Пятая* — многослойное периодическое покрытие на основе чередующихся слоев двух типов на кремниевой подложке. Рассмотрены варианты, при которых происходил сбой в технологии изготовления одного из слоев на некотором этапе изготовления периодической структуры.

Результаты сравнения относительного отклонения толщины от ее среднего значения для абсолютно гладкого однослойного покрытия, полученные разными способами, приведены в табл. 1. Общее число точек, где моделировались измерения,  $M = 17$ .

Прямой расчет и оценка по данной методике неоднородности толщины дают завышенные, по сравнению с заданными, результаты, но для тонких покрытий (около 10 нм) расхождение заданных и расчетных вариантов меньше.

Результаты сравнения относительного отклонения толщины для однослойного покрытия с вариацией толщины от ее среднего значения приведены в табл. 2 ( $M = 17$ ).

В данном случае по предложенной методике, как правило, получаем оценку неоднородности толщины пленки на 1—2 % ниже заданного в условиях расчета значения, однако при этом демонстрируется большая по сравнению с методом прямого расчета устойчивость для пленок с ненулевым коэффициентом поглощения.

Результаты сравнения относительного отклонения толщины покрытия от его среднего значения для однослойного покрытия с вариацией толщины и шумом приведены в табл. 3 ( $M = 17$ ). Изменение углов  $\Psi$ ,  $\Delta$  учитывалось при моделировании нормальным распределением с СКО  $0,1^\circ$ .

Результаты моделирования для абсолютно гладкого однослойного покрытия

Пленка (коэффициент преломления)	Изменение углов $\psi$ , $\Delta$ СКО = 0,1°	Значение средней толщины, нм			Относительное отклонение толщины (неоднородность), %		
		заданное	по методике	прямой расчет	заданное	по методике	прямой расчет
SiO <sub>2</sub> (n = 1,54)	Равномерное	10,0	9,7	—	0	1,7	—
		100,0	100,0	—	0	0,5	—
	Нормальное	10,0	9,9	—	0	1,7	—
		100,0	100,0	—	0	0,5	—
	Пуассоновское	10,0	10,0	—	0	2,4	—
		100,0	99,9	—	0	0,8	—
TiO <sub>2</sub> (n = 2,49)	Равномерное	10,0	10,1	10,2	0	1,4	11
		100,0	100,0	100,0	0	0,2	1,5
	Нормальное	10,0	10,2	10,2	0	1,3	10
		100,0	100,0	100,0	0	0,2	1,2
	Пуассоновское	10,0	10,1	10,1	0	1,4	10
		100,0	100,0	100,0	0	0,2	1,2
SiO (n = 2,49 – i*0,07)	Равномерное	10,0	10,7	10,7	0	1,4	9,7
		100,0	121,0	121,0	0	0,2	1,9
	Нормальное	10,0	10,7	10,7	0	1,3	8,8
		100,0	121,0	121,0	0	0,2	1,7
	Пуассоновское	10,0	10,6	10,7	0	1,4	11
		100,0	121,0	121,0	0	0,3	2,7
TiN (n = 0,86 – i*2,54)	Равномерное	10,0	69,0	69,0	0	1,7	6,2
		100,0	128,0*	128,0*	0	0,3	0,3
	Нормальное	10,0	68,0	68,0	0	1,2	5,9
		100,0	170,0*	170,0*	0	0,2	0,4
	Пуассоновское	10,0	69,0	69,0	0	1,6	7,1
		100,0	170,0*	170,0*	0	0,2	0,4

\* Значение зависит от выбора начального приближения при решении обратной задачи; приведено наиболее часто встречающееся.

Результаты моделирования для однослойного покрытия с вариацией толщины

Пленка (коэффициент преломления)	Закон изменения толщины пленки	Значение средней толщины, нм			Относительное отклонение толщины (неоднородность), %		
		заданное	по методике	прямой расчет	заданное	по методике	прямой расчет
SiO <sub>2</sub> (n = 1,54)	Модуль синуса	11,3	11,3	—	17	16	—
		113,0	113,0	—	17	14	—
	Синусоидальный	10,0	10,0	—	21	20	—
		100,0	101,0	—	21	20	—
	Параболический	11,7	11,7	—	19	18	—
		117,0	116,0	—	19	16	—
	Нормальный разброс	10,0	10,1	—	14	14	—
		100,0	101,0	—	15	15	—

Пленка (коэффициент преломления)	Закон изменения толщины пленки	Значение средней толщины, нм			Относительное отклонение толщины (неоднородность), %		
		заданное	по методике	прямой расчет	заданное	по методике	прямой расчет
TiO <sub>2</sub> ( $n = 2,49$ )	Модуль синуса	11,3	11,3	11,3	17	16	17
		113,0	114,0	113,0	17	15	17
	Синусоидальный	10,0	10,0	10,0	21	20	21
		100,0	101,0	100,0	21	20	21
	Параболический	11,3	11,3	11,3	16	15	16
		113,0	115,0	113,0	16	15	16
Нормальный разброс	10,0	10,0	10,0	12	12	12	
	100,0	100,0	100,0	12	11	12	
SiO ( $n = 2,49 - i^*0,07$ )	Модуль синуса	11,0	12,0	12,0	17	16	16
		113,0	176,0	179,0	17	12	13—170*
	Синусоидальный	10,0	11,0	11,0	21	20	20
		100,0	122,0	126,0	21	20	47
	Параболический	11,3	12,0	12,0	16	15	15
		113,0	176,0	179,0	16	11	12—180*
Нормальный разброс	10,0	11,0	11,0	19	18	18	
	102,0	126,0	125,0	17	16	29—95*	
TiN ( $n = 0,86 - i^*2,54$ )	Модуль синуса	11,3	80,0	80,0	17	18	20
		113,0	128,0	128,0	17	0,2**	0,3**
	Синусоидальный	10,0	69,0	68,0	21	21	29
		100,0	128,0	128,0	21	0,4**	0,5**
	Параболический	11,3	80,0	80,0	16	17	19
		113,0	128,0	128,0	21	0,4**	0,5**
Нормальный разброс	10,0	68,0	67,0	14	14	20	
	101,0	128,0	128,0	13	0,1**	0,3**	

\* Значение зависит от выбора начального приближения при решении обратной задачи. Сходимость решения при выборе одинакового начального приближения для всех точек измерения крайне низкая. Минимальное значение получено при вариации начального приближения для каждой точки.

\*\* Для данного сочетания средней толщины покрытия  $d$ , его коэффициента преломления  $n$ , угла падения  $\theta$  и длины волны излучения  $\lambda$  набег фазы в материале равен  $\pi$ . В связи с этим наблюдается крайне низкая чувствительность углов  $\psi$ ,  $\Delta$  к вариациям толщины пленки.

Таблица 3

Результаты моделирования для однослойного покрытия с вариацией толщины и шумом

Пленка (коэффициент преломления)	Закон изменения толщины пленки	Значение средней толщины, нм			Относительное отклонение толщины (неоднородность), %		
		заданное	по методике	прямой расчет	заданное	по методике	прямой расчет
SiO <sub>2</sub> ( $n = 1,54$ )	Модуль синуса	11,3	11,4	11,9	17	16	47***
		113,0	113,0	113,0	17	14	16
	Синусоидальный	10,0	10,0	12,0	21	20	52***
		100,0	101,0	100,0	21	20	21
	Параболический	11,0	11,5	12,0	12	12	49***
		113,0	113,0	113,0	16	14	16
Нормальный разброс	10,0	10,0	11,0	15	14	66***	
	100,0	100,0	100,0	15	14	15	

Пленка (коэффициент преломления)	Закон изменения толщины пленки	Значение средней толщины, нм			Относительное отклонение толщины (неоднородность), %		
		заданное	по методике	прямой расчет	заданное	по методике	прямой расчет
TiO <sub>2</sub> ( $n = 2,49$ )	Модуль синуса	11,3	11,0	11,2	17	17	16
		113,0	115,0	113,0	17	15	17
	Синусоидальный	10,0	10,0	10,0	21	20	21
		100,0	101,0	100,0	21	20	21
	Параболический	11,0	11,0	11,0	12	12	15
		110,0	110,0	110,0	13	12	13
	Нормальный разброс	10,0	10,0	10,0	17	16	18
		100,0	101,0	100,0	16	15	15
SiO ( $n = 2,49 - i^*0,07$ )	Модуль синуса	11,3	11,9	11,9	17	16	17
		113,0	176,0	179,0	17	12	12
	Синусоидальный	10,0	11,0	11,0	21	20	24
		100,0	122,0	126,0	21	20	25—47*
	Параболический	11,0	12,0	12,0	16	15	18
		113,0	176,0	178,0	16	12	17
	Нормальный разброс	10,0	11,0	11,0	19	18	20
		100,0	121,0	122,0	13	12	26—225*
TiN ( $n = 0,86 - i^*2,54$ )	Модуль синуса	11,3	80,0	80,0	17	17	24
		113,0	128,0	128,0	17	0,4**	0,3**
	Синусоидальный	10,0	69,0	68,0	21	20	29
		100,0	128,0	128,0	21	0,5**	0,6**
	Параболический	11,3	80,0	80,0	16	17	19
		113,0	128,0	128,0	16	0,3**	0,3**
	Нормальный разброс	10,0	68,0	68,0	12	12	19
		100,0	128,0	128,0	16	0,4**	0,4**

\* Значение зависит от выбора начального приближения при решении обратной задачи. Сходимость решения для всех точек измерения крайне низкая. Минимальное значение получено при вариации начального приближения для каждой точки.

\*\* То же, что и для табл. 2.

\*\*\* Случай малой производной только одного угла  $\psi$  по толщине пленки. Сильная чувствительность к шуму.

По сравнению с методом прямого расчета предложенная методика демонстрирует большую устойчивость и допускает отклонения от заданных значений неоднородности в среднем не более чем на один процент.

Результаты сравнения относительного отклонения толщины покрытия от ее среднего значения для двухслойного покрытия с вариацией толщины одного из слоев, приведены в табл. 4 ( $M = 17$ ). Изменение углов  $\psi$ ,  $\Delta$  учитывалось при моделировании нормальным распределением с СКО 0,1°. Вариация толщины задается синусоидальной зависимостью. Общая структура объекта — слой в 10 нм, тонкий переходный подслой 2 нм на кремниевой подложке. Прямой расчет выполнен с использованием однослойной модели.

В представленных результатах расчета неоднородность толщины слоя, оцененная способом, описанным в данной работе, в среднем ближе к заданной, чем рассчитанная прямым методом.

Результаты сравнения относительного отклонения толщины покрытия от ее среднего значения для многослойных периодических покрытий с вариацией толщины одного из слоев, приведены в табл. 5 ( $M = 17$ ). Изменение углов  $\psi$ ,  $\Delta$  учитывалось при моделировании нормальным распределением с СКО 0,1°. Вариация толщины задается синусоидальной зависимостью. Общая структура объекта — пленка из чередующихся слоев 10 нм оксида алюминия и 10 нм диоксида титана. Общее число пар слоев — 6. Подслой — 2 нм

Таблица 4

Результаты моделирования для двухслойного покрытия с вариацией толщины одного из слоев

Объект (коэффициент преломления)	Вариация толщины	Значение средней толщины, нм			Относительное отклонение толщины (неоднородность), %		
		заданное	по методике	прямой расчет	заданное	по методике	прямой расчет
Пленка SiO <sub>2</sub> ( <i>n</i> = 1,54) Подслой SiO ( <i>n</i> = 2,49 – <i>r</i> *0,07)	слой	12	11	12	18	16,0	30,0
	подслой	12	11	12	18	18,0	25,0
	вместе	12	11	11	0	1,2	16,0
Пленка TiO <sub>2</sub> ( <i>n</i> = 2,49) Подслой SiO ( <i>n</i> = 2,49 – <i>r</i> *0,07)	слой	12	12	12	18	16,0	19,0
	подслой	12	12	12	18	17,0	21,0
	вместе	12	12	12	0	1,2	7,1
Пленка TiO <sub>2</sub> ( <i>n</i> = 2,49) Подслой Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( <i>n</i> = 2,3)	слой	12	12	12	18	17,0	18,0
	подслой	12	12	12	18	17,0	20,0
	вместе	12	12	12	0	1,5	6,8
Пленка HfO <sub>2</sub> ( <i>n</i> = 1,91) Подслой SiO ( <i>n</i> = 2,49 – <i>r</i> *0,07)	слой	12	12	12	18	17,0	18,0
	подслой	12	12	12	18	15,0	15,0
	вместе	12	12	12	0	1,5	3,1

Таблица 5

Результаты моделирования для многослойных периодических покрытий с вариацией толщины одного из слоев

Вариация толщины слоя	Вид зависимости	Значение средней толщины, нм			Относительное отклонение толщины (неоднородность), %		
		заданное	по методике	прямой расчет	заданное	по методике	прямой расчет
Слой TiO <sub>2</sub> во второй группе слоев снизу	Синусоидальная	122	124	123	8,7	8,0	2,3
Слой Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в третьей группе слоев снизу	То же	122	123	124	8,7	6,7	17,0
Подслой SiO	—	122	123	123	3,5	2,9	4,4
Все слои	Линейный рост	132	136	135	13,0	11,0	18,0

слоя монооксида кремния. Прямой расчет выполнен с использованием однослойной модели.

Из представленных данных можно сделать вывод, что в случае многослойных периодических покрытий полученное по предложенной методике значение неоднородности толщины значительно ближе к заданному, чем при методе прямого расчета.

Для экспериментальной проверки предлагаемого способа на пластину монокристаллического кремния диаметром 100 мм методом плазмохимического осаждения нанесли слой SiO<sub>2</sub> толщиной 100 нм. Для напыления использовали плазмохимическую установку Oxford Plasmalab 100. Неоднородность полученного слоя по толщине была оценена в соответ-

ствии с предложенным способом. Точки измерений располагались вдоль четырех прямых, проходящих через геометрический центр пластины таким образом, чтобы она делилась этими прямыми на равные сектора. Общее количество точек измерений *M* = 25 (по 6 точек, расположенных равномерно вдоль каждой прямой плюс точка в центре пластины). Результаты измерений приведены на рис. 1. Рассчитанное в соответствии с соотношениями (3) — (10) *X* = 3,1 %.

Для прямого подтверждения правильности эллипсометрической оценки после измерений пластина была распилена на квадраты 15×15 мм, из которых выбрали те, что располагались вдоль взаимно-перпендикулярных диаметров пластины, всего 8 квадратов. На них нанесли фоторезист и выполнили литографию в виде полос шириной 20 мкм и длиной 100 мкм. После проявления литографического рисунка оксид в свободных от резиста окнах удалили в буферном растворе HF:NH<sub>4</sub>F (1:6). Время травления оксида кремния рассчитывали по скорости травления 5 нм/с и ожидаемой толщине слоя; кроме того, образец выдерживали в растворе еще 50 % от необходимого времени для обеспечения гарантированного удаления оксида кремния в окнах резиста. Затем резист удаляли в растворе *n*-метилпирролидона, образцы промывали деионизованной водой, остатки влаги убирали в потоке сжатого азота. Толщину полученных ступенек в оксиде кремния измеряли при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ). На каждом образце проводили 6 измерений высоты ступеньки в различных точках структуры, *M* = 48. Результаты измерений приведены на рис. 2.

Средняя толщина *d* = (108 ± 3) нм. Рассчитанная по результатам измерений на АСМ неоднородность слоя SiO<sub>2</sub> составила 2,6 %.

Проведенные модельные расчеты показали, что предложенная методика демонстрирует большую устойчивость и дает более близкие к заданным параметрам структур значения, чем удалось получить методом решения стандартной эллипсометрической задачи по определению толщин на основе заданных  $\psi$ ,  $\Delta$ . Экспериментальная проверка методики, проведенная при помощи прямого определения неоднородности толщины слоя на АСМ, также подтвердила ее применимость для определения неоднородности толщины тонких диэлектрических пленок. К достоинствам можно отнести экспрессность измерений и простоту обработки результатов.

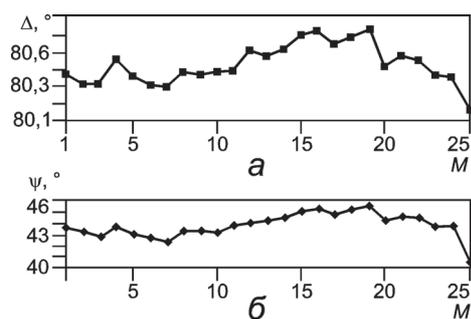


Рис. 1. Результаты измерений эллипсометрических углов  $\Delta$ ,  $\psi$  в различных точках пластины

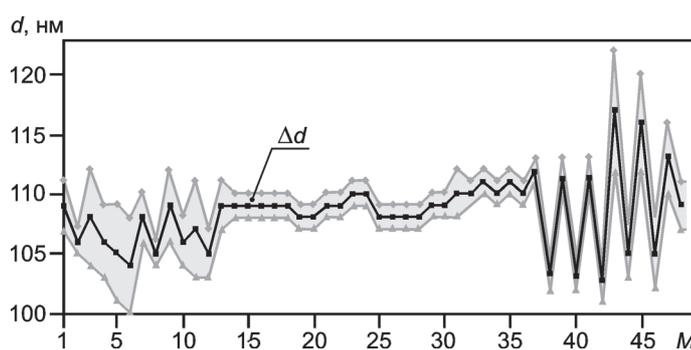


Рис. 2. Результаты измерений образцов на атомно-силовом микроскопе

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ с привлечением Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий (ЦКП МФТИ) (государственный контракт № 16.552.11.7070).

#### Л и т е р а т у р а

1. **Красников Г. Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011.

2. **Morton D. E., Johns B., Hale J.** Optical monitoring of thin films using spectroscopic ellipsometry // Proc. 45<sup>th</sup> Tech. Conf.: Soc. Vac. Coaters. P. 299—305.

3. **Woollam J. A. e. a.** Overview of variable angle spectroscopic ellipsometry (VASE), part I: basic theory and typical applications // Optical Metrology. 1999. V. CR72. P. 3—75.

4. **Азам Р., Башара Н.** Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.

5. **Горшков М. М.** Эллипсометрия. М.: Сов. радио, 1974.

Дата принятия 17.07.2013 г.

## ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

535.4

### Применение S-преобразования в задачах спекл-интерферометрии

**А. Е. ШТАНЬКО\*, Г. С. КАЛЕНКОВ\*\*, С. Д. ИВАНОВА\*, О. А. КАЛУЦКОВ\***

\* Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия, e-mail: shtanki@newmail.ru

\*\* Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия, e-mail: kalenkov@mail.ru

Предложена методика расшифровки спекл-интерферограмм на основе S-преобразования, заключающаяся в корректировке факторов, искажающих вычисляемый фазовый профиль. Получена экспериментальная оценка погрешности метода при измерениях перемещений. Показана возможность регистрации перемещений в сотые доли микрометра.

**Ключевые слова:** спекл-интерферограмма, S-преобразование, цифровая запись изображений, расшифровка интерферограмм.

A procedure of speckle interferograms decoding based on S-transformation is suggested. It includes the correction of factors distorting the calculated phase profile. The experimental assessment of the method error at measurement of shifts is obtained. The possibility of registration of shifts equal to hundredths of micrometer is presented.

**Key words:** speckle interferogram, S-transformation, digital image recording, interferogram decoding.

Во многих оптических методах исследования, таких как интерферометрия, профилометрия и других возникает задача расшифровки картин интерференционных полос. Наибольшее распространение получили метод фазовых

шагов [1] и метод, основанный на различных вариантах Фурье-преобразования [2], который интересен возможностью получения данных по отдельной картине, что важно при изучении динамических или быстропротекающих про-