
**НОВЫЕ ПРИБОРНЫЕ РАЗРАБОТКИ
И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 535.5.511: 531.7

© А. И. Семененко, И. А. Семененко, С. С. Мельник

**О НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ МЕТОДА ЭЛЛИПСОМЕТРИИ,
ОБУСЛОВЛЕННЫХ "НУЛЕВОЙ" ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ.
ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР.
18. МЕТРОЛОГИЯ "НУЛЕВОЙ" ЭЛЛИПСОМЕТРИИ.
ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРА**

Работа посвящена обобщению комбинированного подхода к определению параметров компенсатора. Сюда включается обобщение процедуры построения матрицы Джонса неидеального компенсатора, процесса установления измерительной конфигурации прибора, а также связанных с ними юстировочных процедур, предназначенных для определения линейных соотношений между параметрами ρ , ρ_1 и ρ_2 компенсатора. Показано, что в рамках обобщенного комбинированного подхода не только неоднородность компенсатора, но и погрешности его лимба не играют принципиальной роли. И в этом случае, используя соответствующие процедуры, можно обеспечить нормальную работу прибора. Доказана эквивалентность всех возможных вариантов выбора положений компенсатора при заданной измерительной конфигурации прибора. Проведенный в работе эксперимент наглядно демонстрирует методику практической реализации обобщенного комбинированного подхода.

Кл. сл.: эллипсометрия, фазовый компенсатор, матрица Джонса, калибровка, инварианты эллипсометрии, межзонный разброс, поляризационные углы

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

До сих пор все измерения на приборах с "нулевой" оптической схемой, в том числе и на приборах ЛЭФ-3М-1, проводились без учета реальных свойств компенсатора. Это касается не только малых параметров ρ_1 и ρ_2 , которые, как правило, полагались равными нулю, но также и неоднородности пластины компенсатора. При таком подходе юстировочные процедуры, позволяющие получить линейные соотношения, связывающие малые величины ρ_1 и ρ_2 с основным фазовым параметром ρ , очевидно, не могли применяться. В работе [1], посвященной анализу прежних экспериментальных данных, параметры ρ_1 и ρ_2 положены равными нулю, однако это не могло заметным образом сказаться на точности определения основного параметра ρ с помощью инвариантов эллипсометрии. В данной работе было показано, что влияние величин ρ_1 и ρ_2 при использовании инвариантов проявляется лишь во втором приближении по этим малым величинам. Поэтому, полагая $\rho_1 = \rho_2 = 0$ и используя соответствующие образ-

цы, можно было довольно точно определить (с помощью инвариантов) параметр ρ . В работе [1] использовались экспериментальные данные, полученные на приборе ЛЭФ-3М-1 (ИФП СО РАН, г. Новосибирск). Было установлено, что основным параметр ρ имеет значения, которые заметно различаются для первой и второй пар измерительных зон. Это различие можно объяснить в основном неоднородностью пластины компенсатора. Использование полученных значений параметра ρ позволило значительно снизить межзонный разброс поляризационных углов. Оставшийся минимальный разброс обусловлен как игнорированием величин ρ_1 и ρ_2 , так и неоднородностью самого образца. Чтобы выделить компоненту межзонного разброса, обусловленную неоднородностью отражающей поверхности образца, необходимо достаточно точно определить параметры ρ_1 и ρ_2 .

В предложенной в работе [2] схеме реализации комбинированного подхода к определению параметров ρ , ρ_1 и ρ_2 неоднородного в общем случае компенсатора во главу угла ставится угол поворота γ_k компенсатора, значение которого соответствует принятой измерительной конфигурации при-

бора. Однако в этом случае юстировочный параметр K'_0 , определяющий (по лимбу) положение повернутого компенсатора, при фиксированной измерительной конфигурации является строго заданным. А это ограничивает возможности в выборе физически разумных значений малых параметров ρ_1 и ρ_2 , хотя все параметры ρ , ρ_1 и ρ_2 такого компенсатора строго соответствуют его заданному положению. Ситуация усугубляется, если лимб компенсатора содержит погрешности, которые нельзя игнорировать и которые препятствуют правильной установке угла γ_k . Если лимбы поляризационных призм правильны, то эти погрешности также не являются препятствием для получения значений параметров ρ , ρ_1 и ρ_2 , соответствующих свойствам реального компенсатора для той же фиксированной измерительной конфигурации прибора. Надо просто закрыть глаза на погрешности лимба компенсатора, считая, что угол γ_k устанавливается правильно. Другое дело, что повороты поляризационных призм, отвечающие разработанной в работе [2] схеме комбинированного подхода, действительно должны быть правильными. Возникает совершенно непрозрачная ситуация, означающая, что процедура построения матрицы Джонса реального компенсатора и процесс установления измерительной конфигурации прибора должны быть обобщены. С этим обобщением непосредственно связано и проведение юстировочных процедур, определяющих линейные соотношения между параметрами ρ , ρ_1 и ρ_2 . Иначе говоря, полностью должен быть обобщен на случай реального прибора комбинированный подход к определению параметров компенсатора.

Для экспериментальной реализации обобщенного комбинированного подхода необходимо хорошо разобраться с лимбами оптических элементов прибора. Лимбы обоих поляризационных призм должны обеспечивать (в пределах точности, соответствующей лимбам данного типа) правильную установку заданных углов поворота призм. Если лимб одной из призм технологически установлен правильно, то это дает возможность проверить и при необходимости откалибровать экспериментальным путем сомнительный лимб второй призмы. В результате лимбы обеих призм становятся полностью согласованными друг с другом. Что касается лимба компенсатора, то здесь ситуация сложнее. Экспериментальная калибровка этого лимба возможна, только если пластина компенсатора достаточно однородна. В реальной же ситуации исправление лимба компенсатора возможно только расчетным путем. Но, как выяснится ниже, погрешности лимба компенсатора принципиальной роли не играют, и его перерасчет имеет только вспомогательное значение.

Для проверки теоретических построений необходим эксперимент. Сюда включается определение угловых характеристик юстировочных процедур, а также измерение положений гашения поляризационных призм на различных образцах. В итоге находятся параметры компенсатора и определяются поляризационные углы отражающих образцов. Оценка конечных результатов дается по характеру межзонного разброса поляризационных углов.

В соответствии с приведенными соображениями в настоящей работе решаются следующие задачи:

- 1) рассмотрение некоторых способов аттестации лимбов оптических элементов эллипсометра;
- 2) обобщение комбинированного подхода к определению параметров компенсатора на случай реального прибора;
- 3) экспериментальная реализация обобщенного комбинированного подхода; изучение характера межзонного разброса поляризационных углов.

1. О НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ АТТЕСТАЦИИ ЛИМБОВ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРА

Изучение лимбов оптических элементов использованного в настоящей работе прибора ЛЭФ-ЗМ-1 показало следующее. Лимб анализатора установлен правильно. Это хорошо демонстрируется (при вращении анализатора) поведением шкалы лимба относительно неподвижной отсчетной риски в соответствующем смотровом окне прибора. А вот центры лимбов поляризатора и компенсатора смещены относительно оси вращения оптических элементов. Как и для анализатора, это наглядно проявляется для каждого из этих элементов в изменении относительного расположения шкалы лимба и неподвижной отсчетной риски. Кроме того, для поляризационных призм искажения их лимбов очень хорошо проявляются в процессе измерения положений гашения этих призм с целью определения угловых характеристик юстировочных процедур, а также при исследовании различных образцов. В этом случае, меняя (с использованием реальных лимбов) измеренные положения гашения призм на 180° , причем сначала для одной призмы, а затем для другой, и оценивая возможный отход от ситуации гашения, можно достаточно точно определить степень искажения лимбов поляризационных призм. Для компенсатора подобная экспериментальная проверка возможна, только если его пластина достаточно однородна.

В результате проведения комплексных исследований было установлено, что лимб анализатора не нуждается в дополнительной корректировке. Отсчеты по этому лимбу соответствуют (в преде-

лах заданной точности лимба) истинным углам поворота анализатора. Что касается поляризатора и компенсатора, то углы, определяющие поворот этих элементов, находятся по соответствующим лимбам с некоторой ошибкой. Как показывают оценки, эта ошибка почти для всех углов, исключая малые повороты, заметно превосходит экспериментальную ошибку отсчета по лимбам данного типа. В то же время можно установить правильное соответствие между реальными и идеальными, т. е. не содержащими технологических искажений, лимбами поляризатора и компенсатора. Для поляризатора это легко сделать, используя анализатор с правильно установленным лимбом и основную процедуру по установлению юстировочных параметров P_0 и A_0 . Смысл этой процедуры хорошо известен [3]. Установленным в результате проведения данной процедуры показаниям на реальных лимбах поляризатора и анализатора $P = P_0$ и $A = A_0$ отвечает совмещение направлений пропускания поляризационных призм с плоскостью падения светового луча на образец. При этом существенно, что данный факт, при правильно установленном лимбе анализатора, не зависит от погрешностей лимба поляризатора. В соответствии с этим и проводится калибровка лимба поляризатора. Кратко опишем этот процесс.

Установим поляризатор и анализатор, расположенные на одной оси, в скрещенном положении

$$P = P_0, \quad A = A_0 + 90^\circ.$$

Этому положению в соответствии с процедурой определения параметров P_0 и A_0 отвечает гашение светового луча на выходе анализатора и, следовательно, ортогональность направлений пропускания поляризационных призм. Затем, последовательно поворачивая анализатор на некоторый малый угол α , вращаем на каждом этапе в том же направлении и поляризатор, добиваясь полного гашения светового луча. Очевидно, каждое элементарное вращение поляризатора также определяется углом α . Исходя из этого и определяя поворот поляризатора по его идеальному лимбу, запишем выражение для величины P_k :

$$P_k = P_0 + k\alpha, \quad (1)$$

где k — номер элементарного поворота, P_k — показание идеального лимба после k -го поворота. В то же время после каждого элементарного поворота фиксируем также соответствующее показание реального лимба, которому сопоставляем значение P_k . В результате, пройдя подобным образом весь реальный лимб поляризатора, проводим его калибровку, превращая фактически в идеальный лимб. После такой процедуры все положения по-

ляризатора, в том числе и положения гашения, будем определять по его откалиброванному (почти идеальному) лимбу. При этом надо иметь в виду, что юстировочный параметр P_0 определяется одним и тем же значением для обоих лимбов (реального и прошедшего калибровку). На рис. 1 показана зависимость погрешности реального лимба поляризатора от показаний P_r этого лимба. Погрешность представлена разностью $(P_i - P_r)$, где P_i — это показание исправленного лимба.

Что касается компенсатора, то здесь ситуация сложнее. Установить соответствие между реальным и идеальным лимбами экспериментальным путем можно только в случае, когда пластина компенсатора в достаточной степени однородна. Ниже мы коснемся этого вопроса. Однако практически всегда для уточнения лимба компенсатора целесообразно использовать расчетную процедуру. Данная процедура основана на использовании максимального сдвига центра лимба от оси вращения компенсатора и радиуса лимба. Максимальный сдвиг определяется по изменению относительного расположения шкалы лимба и неподвижной отсчетной риски в смотровом окне. Не приводя здесь самой расчетной процедуры, воспользуемся графическим представлением конечных результатов. На рис. 2 изображена зависимость разности $(K_c - K_r)$ от показаний K_r реального лимба компенсатора. Здесь K_c — это расчетное значение, отвечающее показанию K_r и близкое к показанию идеального лимба. Совокупность показаний K_c назовем расчетным лимбом компенсатора. Как и в случае поляризатора, юстировочный параметр K_0 компенсатора определяется

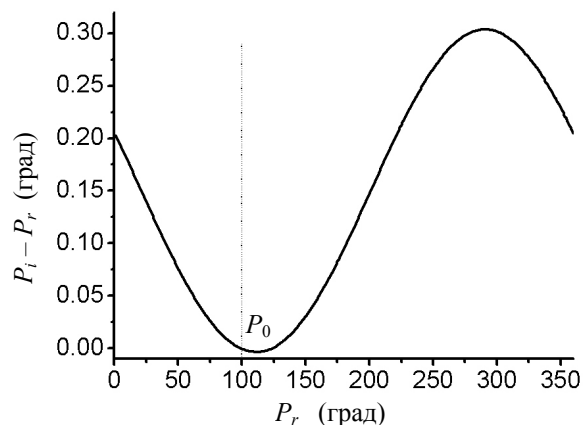


Рис. 1. Зависимость между показаниями реального (P_r) и идеального (P_i), прошедшего экспериментальную калибровку, лимбов поляризатора

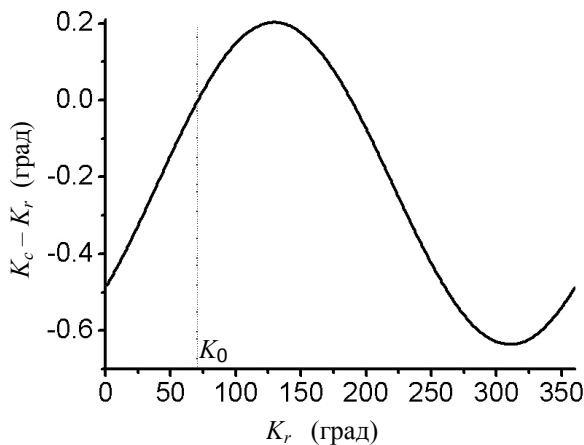


Рис. 2. Зависимость между показаниями реального (K_r) и расчетного (K_c) лимбов компенсатора

одним и тем же значением на обоих лимбах (реальном и расчетном). Для проверки такого подхода расчетная процедура была использована и для лимба поляризатора. В итоге получены результаты, практически совпадающие с теми, которые получены путем проведения экспериментальной калибровки лимба поляризатора.

Лимбы оптических элементов в используемом в настоящей работе приборе расположены так, что при вращении всех элементов в одном и том же направлении показания лимбов анализатора и компенсатора изменяются противоположно тому, как это наблюдается на лимбе поляризатора. Положительное направление вращения выберем таким образом, чтобы ему соответствовало увеличение показаний на лимбе поляризатора и, следовательно, уменьшение показаний на лимбах анализатора и компенсатора.

2. ОБОБЩЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСАТОРА

Обобщение комбинированного подхода к определению параметров компенсатора сводится к обобщению процедуры построения матрицы Джонса неидеального компенсатора, процесса установления измерительной конфигурации прибора, а также связанных с ними юстировочных процедур, предназначенных для определения линейных соотношений между параметрами ρ , ρ_1 и ρ_2 компенсатора. Рассмотрим все эти вопросы.

2.1. Обобщение процедуры построения матрицы Джонса неидеального компенсатора

В случае когда пластина компенсатора однородна, а его лимб установлен правильно, матрица

Джонса компенсатора определяется с помощью хорошо известной процедуры [3]. Ее отличительной особенностью является независимость входящих в нее параметров ρ , ρ_1 и ρ_2 от угла поворота компенсатора. С другой стороны, правильность лимба обеспечивает простоту в реализации любой измерительной конфигурации прибора. Наконец, при использовании комбинированного подхода к определению параметров ρ , ρ_1 и ρ_2 достаточно в этом случае провести соответствующие процедуры лишь для начального положения компенсатора, определяемого юстировочным параметром K_0 .

В реальном же приборе пластина компенсатора в какой-то степени неоднородна, а его лимб установлен с определенной погрешностью. Что касается лимбов поляризационных призм, то будем считать, что хотя бы один из них установлен правильно, тогда для второго с помощью самосоглашенной процедуры, подобной описанной в первом разделе, проводится уточняющая калибровка. Именно такая ситуация наблюдается и для использованного в настоящей работе прибора.

В работе [2] разработана процедура по определению параметров ρ , ρ_1 и ρ_2 неоднородного компенсатора, основанная на использовании комбинированного подхода. При этом лимбы всех оптических элементов предполагаются идеальными, что позволило сохранить в общих чертах традиционный подход к построению матрицы Джонса компенсатора, используемый для практически идеального прибора. Входящие в эту матрицу параметры ρ , ρ_1 и ρ_2 в общем случае неоднородного компенсатора зависят от угла поворота γ_k компенсатора. Эта зависимость как раз и определяется с помощью описанной в работе [2] процедуры. Но даже в случае идеальных лимбов всех элементов процедура построения матрицы Джонса неидеального компенсатора допускает физически разумное обобщение. Если же компенсатор не только неоднороден, но еще и угол его поворота определяется по искаженному в какой-то степени лимбу, то обобщение процедуры построения матрицы Джонса компенсатора становится неизбежным. Рассмотрим это обобщение.

Расположим поляризатор, компенсатор и анализатор на одной оси и введем главную плоскость Π_c , совпадающую с плоскостью падения светового луча на образец. С главной плоскостью свяжем систему координат (p, s) , одна из осей которой лежит в этой плоскости, а другая — перпендикулярна ей (см. рис. 3). Поляризационные призмы ориентируем так, чтобы их направления пропускания были взаимно ортогональны. Систему расположенных таким образом призм назовем блоком

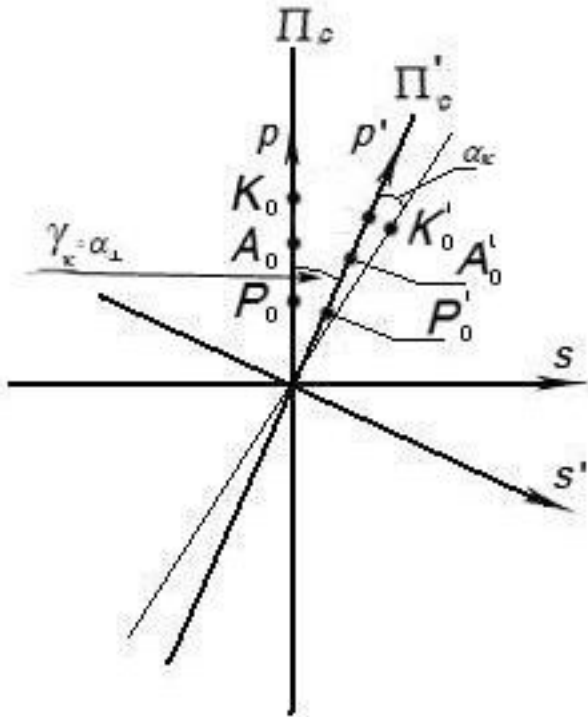


Рис. 3. Схематическое изображение процесса, соответствующего построению матрицы Джонса неоднородного компенсатора с искаженным неправильной установкой лимбом

скрещенных призм и обозначим, как $(PA)_{\perp}$. Ориентацию блока $(PA)_{\perp}$ будем определять по лимбу поляризатора, выбрав за начальную точку показание P_0 . При $P = P_0$ направление пропускания поляризатора лежит в плоскости Π_c , а анализатора — перпендикулярно ей. Введем также вспомогательную плоскость Π'_c , жестко связанную с блоком $(PA)_{\perp}$ и проходящую через ось вращения блока и направление пропускания поляризатора. С плоскостью Π'_c свяжем систему координат (p', s') , расположенную относительно Π'_c так же, как система (p, s) — относительно главной плоскости Π_c (рис. 3). Можно еще сказать, что оси системы (p', s') совпадают с направлениями пропускания поляризатора и анализатора в блоке $(PA)_{\perp}$.

Сделаем существенное замечание, касающееся юстировочных параметров P_0 , A_0 и K_0 . Параметры P_0 и A_0 определены относительно главной плоскости однозначно, а вот ситуация с юстировочным параметром K_0 компенсатора сложнее

и нуждается в дополнительном разъяснении. Установим на лимбе поляризатора показание $P = P_0$. В этом случае плоскость Π'_c параллельна главной плоскости, связанная с ней система (p', s') совпадает с системой (p, s) , а взаимно ортогональные направления пропускания блока $(PA)_{\perp}$, очевидно, соответствующим образом совпадут с осями системы (p, s) . И тогда в системе (p, s) легко определить юстировочный параметр K_0 . Но этот процесс неоднозначен. Обычно величину K_0 определяют по положению минимума компенсатора, которому соответствует ориентация "быстрой" оси вблизи главной плоскости. Но можно определить и другим способом, произвольно меняя показание K_0 вблизи положения минимума. Но здесь важно помнить, что при любом способе матрица Джонса компенсатора, хотя и описывается при $K = K_0$ одной и той же формулой

$$M_k \sim \begin{pmatrix} 1 & \rho_1 \\ -\rho_1 + \rho_2 & \rho \end{pmatrix}, \quad (2)$$

но входящие в нее величины ρ , ρ_1 и ρ_2 зависят от способа выбора юстировочного параметра K_0 .

Что касается конкретной ориентации компенсатора (при $K = K_0$) относительно главной плоскости, то для ее описания целесообразно ввести эффективную "быструю" ось, имея в виду следующее. При любом способе выбора параметра K_0 эффективная "быстрая" ось компенсатора совпадает при $K = K_0$ с главной плоскостью, но отвечающие ей величины ρ , ρ_1 и ρ_2 зависят от выбора K_0 . По этой причине на рис. 3 параметр K_0 , как и параметры P_0 и A_0 , совмещен с главной плоскостью Π_c . Это означает, что поворот компенсатора от отметки K_0 на его лимбе — это одновременно и поворот на тот же угол эффективной "быстрой" оси от главной плоскости.

Нам необходимо записать матрицу Джонса для любого (относительно главной плоскости) положения компенсатора. Имея в виду неоднородность компенсатора и погрешности его лимба, рассмотрим более общую (по сравнению с работой [2]) процедуру построения матрицы Джонса. Повернем блок $(PA)_{\perp}$ вместе с жестко связанными с ним плоскостью Π'_c и системой (p', s') на некоторый угол $\alpha_{\perp}$, отсчитываемый (от отметки P_0) по лимбу поляризатора. После этого от отметки K_0 в направлении к плоскости Π'_c поворачиваем компенсатор. Данный поворот представляет собой

суммарный поворот на угол $\alpha_{\perp}$ и сравнительно небольшой угол α_k , играющий вспомогательную роль. Как следует из рис. 3, в этом случае эффективная "быстрая" ось займет некоторое положение вблизи плоскости Π'_c . Это положение необходимо уточнить. Из-за погрешностей лимба полный угол поворота компенсатора не является точным, а это означает, что эффективную "быструю" ось невозможно ни совместить с плоскостью Π'_c , ни указать любое ее конкретное (точное) положение вблизи этой плоскости. В то же время положение минимума компенсатора относительно блока $(PA)_{\perp}$, совмещенного своими направлениями с осями системы (p', s') , является абсолютным. Это положение не зависит от точности лимба компенсатора, но его можно идентифицировать, используя соответствующее показание K'_0 этого лимба. Очевидно, определив на реальном лимбе величину K'_0 , мы, тем не менее не сможем указать точное значение угла, отвечающего повороту компенсатора от начальной отметки K_0 к его положению минимума. Однако известно, что эффективная "быстрая" ось компенсатора, находящегося в положении минимума, располагается вблизи плоскости Π'_c (см. [2, 4]). Помимо положения минимума, идентифицированного отметкой лимба K'_0 , можно рассматривать и другие варианты ориентации эффективной "быстрой" оси вблизи плоскости Π'_c . При этом любой вариант ориентации эффективной "быстрой" оси вблизи плоскости Π'_c будем идентифицировать своим показанием на реальном лимбе, также обозначая его общим символом K'_0 (см. рис. 3). Важно отметить, что в достаточно небольшой окрестности точки K'_0 на лимбе величина смещения от этой точки определяется практически точно и при использовании показаний реального лимба.

Выбирая тот или иной вид ориентации компенсатора вблизи плоскости Π'_c , мы всегда, как и в случае, описываемом выражением (2), определяем матрицу Джонса в системе координат (p', s') одной и той же формулой

$$M'_k \sim \begin{pmatrix} 1 & \rho'_1 \\ -\rho'_1 + \rho'_2 & \rho' \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Входящие в эту формулу параметры ρ' , ρ'_1 и ρ'_2 зависят от выбора показания K'_0 (от выбора ориентации оси) и в общем случае не совпадают с начальными параметрами ρ , ρ_1 и ρ_2 . Но здесь необходимо сделать существенное замечание. В реальной ситуации отличие величин ρ' , ρ'_1 и ρ'_2

от начальных параметров ρ , ρ_1 и ρ_2 определяется прежде всего степенью неоднородности пластины компенсатора и лишь затем проявляется влияние способа выбора параметра K'_0 . Для перехода к системе (p, s) , т. е. для определения матрицы Джонса относительно главной плоскости Π_c , применяется стандартная процедура [3], использующая матрицу вращения на угол $\alpha_{\perp}$. Угол $\alpha_{\perp}$ — это не просто угол поворота системы (p', s') относительно системы (p, s) . Это также и угол поворота эффективной "быстрой" оси от главной плоскости до совпадения ее с плоскостью Π'_c . Дополнительный небольшой поворот α_k этой оси от плоскости Π'_c связан исключительно с выбором удобного вида ориентации эффективной оси и полностью нейтрализуется соответствующим изменением значений параметров ρ' , ρ'_1 и ρ'_2 . Поэтому можно сказать, что угол $\alpha_{\perp}$ — это полный угол поворота γ_k компенсатора при любом способе расположения эффективной "быстрой" оси вблизи плоскости Π'_c . Но данную ситуацию можно описать и иначе, считая, что эффективная ось, совместившись с плоскостью Π'_c , при дальнейшем повороте компенсатора на угол α_k остается в этой плоскости, но при этом в соответствии с выбором отметки K'_0 на лимбе изменяются отвечающие ей параметры ρ' , ρ'_1 и ρ'_2 . Здесь наблюдается полная аналогия с выбором начального юстировочного параметра K_0 . Переходя к известному обозначению угла поворота эффективной "быстрой" оси

$$\gamma_k = \alpha_{\perp}, \quad (4)$$

и используя матрицу вращения на этот угол, приходим к матрице Джонса известного вида (см., например, [4]), элементы которой содержат угол поворота (4) и параметры ρ' , ρ'_1 и ρ'_2 , зависящие от указанных выше факторов.

2.2. Обобщение процесса установления измерительной конфигурации прибора

В связи с обобщением процедуры построения матрицы Джонса компенсатора дадим некоторые пояснения, касающиеся измерительной конфигурации прибора. Измерительная конфигурация прибора устанавливается заданием (относительно главной плоскости Π_c) углового положения компенсатора (его эффективной "быстрой" оси) для каждой измерительной зоны [5, 6]. В рамках параметрического представления зон [3] положение компенсатора определяется типом ориентации (положительным или отрицательным) эффектив-

ной "быстрой" оси и углом $\psi_k^{(j)}$ ($j=1, 2, 3, 4$), изменяющимся в интервале $(0, 90^\circ)$. Для идеального прибора, в котором пластина компенсатора однородна, а лимбы всех оптических элементов установлены правильно, угол $\psi_k^{(j)}$ отсчитывается по лимбу компенсатора (от отметки K_0) в направлении, соответствующем типу ориентации эффективной "быстрой" оси для j -й зоны. Для рассмотренной выше обобщенной процедуры, обусловленной неоднородностью компенсатора и неправильной установкой его лимба, угол $\psi_k^{(j)}$ определяется формулой

$$\psi_k^{(j)} = \alpha_\perp^{(j)}, \quad (j=1, 2, 3, 4), \quad (5)$$

где $\alpha_\perp^{(j)}$ — это угол поворота блока $(PA)_\perp$ в j -й измерительной зоне, определяемый интервалом $(0, 90^\circ)$ и отсчитываемый (от положения $P = P_0$) по лимбу поляризатора в направлении, соответствующем j -й зоне. Что касается эффективной "быстрой" оси компенсатора, то она устанавливается вблизи направления пропускания поляризатора в блоке $(PA)_\perp$ прежде всего по минимуму интенсивности светового луча на выходе блока, фиксируемому на лимбе компенсатора отметкой K'_0 . Однако могут использоваться и близкие к данному положения, отмечаемые на лимбе показаниями K'_0 с несколько другими значениями. Изменяя способ выбора показания K'_0 , мы тем самым изменяем и значения параметров ρ' , ρ'_1 и ρ'_2 (см. (3)). При этом угол $\psi_k^{(j)}$, определенный формулой (5), остается неизменным.

Отметим, что блок скрещенных призм $(PA)_\perp$ необходим не только для обоснования рассмотренной выше обобщенной процедуры. И не только для определения положения минимума компенсатора. Он необходим также для определения угловых характеристик юстировочных процедур, используемых (в комбинированном подходе) для получения линейных соотношений, выражающих величины ρ_1 и ρ_2 через основной фазовый параметр ρ . В следующем подразделе мы изложим эти процедуры заново, приведя их в соответствие с новым (обобщенным) описанием реального компенсатора.

2.3. Обобщение юстировочных процедур, используемых в комбинированном подходе к определению параметров компенсатора

Для экспериментального определения параметров компенсатора ρ , ρ_1 и ρ_2 , отвечающих заданному повороту $\gamma_k = \alpha_\perp$ и определенному выбору

величины K'_0 , используем комбинированный подход [2]. В рамках данного подхода сначала конкретизируются линейные соотношения

$$\rho_1 = g_{11}\rho + q_{11}, \quad \rho_2 = g_{22}\rho + q_{22}, \quad (6)$$

а затем привлекаются инварианты эллипсометрии, позволяющие (с учетом соотношений (6)) определить основной фазовый параметр ρ . После этого с помощью тех же соотношений (6) находятся и малые параметры ρ_1 и ρ_2 . В формулах (6) и всюду ниже штрихи у величин ρ , ρ_1 и ρ_2 опущены. Но при этом имеется в виду, что эти величины являются функциями угла поворота γ_k и зависят от способа выбора показания K'_0 .

Величины g_{11} , q_{11} и g_{22} , q_{22} из соотношений (6) определяются угловыми характеристиками $\chi_a^{(1)}$, $\chi_p^{(1)}$ и $\chi_a^{(2)}$, $\chi_p^{(2)}$ юстировочных процедур. Не будем повторять соответствующие выражения, подробно описанные в работе [2]. Однако юстировочные процедуры, изученные в работах [2, 4], опишем в основных чертах заново. Это связано с характером проведенного в подразделе 2.1 обобщения процедуры построения матрицы Джонса компенсатора.

Пусть блок $(PA)_\perp$ повернут на некоторый угол $\gamma_k = \alpha_\perp$, отсчитанный от отметки P_0 по лимбу поляризатора. Компенсатор же поворачиваем таким образом, чтобы его эффективная "быстрая" ось заняла положение, отвечающее выбранному показанию K'_0 (рис. 3). После таких поворотов положения всех оптических элементов будем определять относительно плоскости Π'_c , жестко связанной с системой (p', s') и блоком $(PA)_\perp$ (рис. 3). В связи с этим новыми юстировочными параметрами поляризатора и анализатора будут показания P'_0 и A'_0 , причем

$$P'_0 = P_0 + \alpha_\perp, \quad A'_0 = A_0 - \alpha_\perp. \quad (7)$$

Очевидно, первое из этих соотношений определяет (по лимбу поляризатора) положение блока $(PA)_\perp$, повернутого на угол $\alpha_\perp$. Знак в выражении (7) определяется относительным расположением лимбов используемого для измерений прибора и выбранным положительным направлением вращения оптических элементов.

Рассмотрим далее два варианта расположения блока $(PA)_\perp$. При этом будем учитывать, что вращение блока контролируется лимбом поляризатора.

Первый вариант — это просто блок, жестко связанный с плоскостью Π'_c . Относительно данной плоскости его положение определяется тривиальным условием $P = P'_0$.

Согласно этому условию, направление пропускания поляризатора лежит в плоскости Π'_c , а анализатора — перпендикулярно этой плоскости. Прежде всего определим для первого варианта (вблизи плоскости Π'_c) положение минимума эффективной оси, определяемое по минимуму интенсивности светового луча на выходе блока $(PA)_\perp$. Этому положению на лимбе компенсатора отвечает показание

$$K = K'_{1\min}.$$

Затем освободим поляризатор и анализатор от жесткой связи в блоке $(PA)_\perp$, рассматривая в то же время сравнительно небольшие отклонения от их фиксированных положений в блоке $(PA)_\perp$:

$$P = P'_0 + \delta P, \quad A = A'_0 + 90^\circ + \delta A. \quad (8)$$

Что касается компенсатора, то он зафиксирован в положении, определяемом выбором параметра K'_0 . При этих условиях находим положения поляризатора P_1 и анализатора A_1 , обеспечивающие гашение светового пучка на выходе анализатора:

$$P_1 = P'_0 + \delta P_1, \quad A_1 = A'_0 + 90^\circ + \delta A_1. \quad (9)$$

Из формул (9), учитывая характер выбранного положительного направления, находим угловые характеристики данной юстировочной процедуры:

$$\chi_p^{(1)} = \delta P_1, \quad \chi_a^{(1)} = -\delta A_1. \quad (10)$$

Второй вариант отличается от первого поворотом блока $(PA)_\perp$ на угол 90° . В этом случае положение блока относительно плоскости Π'_c определится условием

$$P = P'_0 + 90^\circ,$$

в соответствии с которым направление пропускания поляризатора перпендикулярно плоскости Π'_c , а анализатора — лежит в этой плоскости. Как и для первого варианта, определим сначала (опять-таки вблизи плоскости Π'_c) положение минимума эффективной "быстрой" оси. На лимбе компенсатора ему отвечает показание

$$K = K'_{2\min}.$$

Затем точно так же освобождаем поляризатор и анализатор от жесткой связи в блоке $(PA)_\perp$, рассматривая небольшие отклонения от их фиксированных положений в блоке

$$P = P'_0 + 90^\circ + \delta P, \quad A = A'_0 + \delta A. \quad (11)$$

Компенсатор же, как и в первом варианте, нахо-

дится в фиксированном положении, которое определяется тем же значением параметра K'_0 . Аналогично предыдущему находим положения гашения поляризатора P_2 и анализатора A_2

$$P_2 = P'_0 + 90^\circ + \delta P_2, \quad A_2 = A'_0 + \delta A_2, \quad (12)$$

определяющие угловые характеристики рассматриваемой юстировочной процедуры:

$$\chi_p^{(2)} = \delta P_2, \quad \chi_a^{(2)} = -\delta A_2. \quad (13)$$

Полученные подобным образом угловые характеристики $\chi_a^{(1)}$, $\chi_p^{(1)}$ и $\chi_a^{(2)}$, $\chi_p^{(2)}$ полностью определяют (см. [2]) линейные соотношения (6), связывающие параметры ρ , ρ_1 и ρ_2 . Еще раз отметим, что эти параметры, отвечающие заданному повороту $\gamma_k = \alpha_\perp$ компенсатора и конкретному выбору величины K'_0 , определяют матрицу Джонса в системе (p', s') (см. формулу (3) и рис. 3). Они же определяют (вместе с углом поворота $\gamma_k = \alpha_\perp$) и матрицу Джонса компенсатора относительно главной плоскости Π_c , т. е. в системе (p, s) .

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСАТОРА. ИЗУЧЕНИЕ МЕЖЗОННОГО РАЗБРОСА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ УГЛОВ

Перейдем теперь к экспериментальному определению параметров компенсатора. Для такой процедуры понадобятся многочисленные измерения, проведенные с использованием лимбов всех оптических элементов. В связи с этим сделаем уточняющее замечание, касающееся неправильно установленных (в используемом приборе) лимбов поляризатора и компенсатора. Лимб поляризатора откалиброван экспериментальным путем с использованием анализатора с правильно установленным лимбом. Поэтому все положения поляризатора определяем показаниями исправленного калибровой лимба, имея в виду, что юстировочному параметру P_0 отвечает одно и то же значение на обоих лимбах (реальном и прошедшем калибровку). Что касается компенсатора, то его лимб исправлен расчетным путем, но ситуация здесь не столь однозначна. Любое положение компенсатора целесообразно определять показаниями реального (искаженного) лимба, указывая в скобках соответствующие значения расчетного лимба. Это связано с тем, что возникает необходимость выяснить роль погрешностей лимба компенсатора. Учтем также, что показания расчетного лимба компенсатора сдвинуты на одну и ту же величину таким обра-

зом, чтобы юстировочный параметр K_0 определялся одним и тем же значением на обоих лимбах (реальном и расчетном).

При использовании комбинированного подхода к определению параметров компенсатора прежде всего необходимо провести экспериментальные измерения угловых характеристик юстировочных процедур, отвечающих различным положениям компенсатора. При этом появляется возможность увидеть в общих чертах проявления неоднородности компенсатора. С этой целью рассмотрим целый набор углов $\gamma_k = \alpha_\perp$, изменяющихся от нулевого значения с шагом 45° и охватывающих весь интервал $(0, 360^\circ)$. Этот набор будем рассматривать для трех способов выбора показания K'_0 :

1) выбор по положению минимума

$$K'_0 = K'_{1\min}; \quad (14)$$

2) выбор по реальному лимбу компенсатора в соответствии с условием

$$K'_0 = K_0 - \alpha_\perp; \quad (15)$$

3) выбор по расчетному лимбу компенсатора в соответствии с тем же условием (15).

Заметим, что для второго способа выбора величины K'_0 поворот компенсатора, определяемый по его реальному лимбу в соответствии с условием (15), из-за погрешностей этого лимба не совпадает с углом $\alpha_\perp$.

Для всех указанных способов выбора параметра K'_0 общими являются начальные положения блока $(PA)_\perp$ и компенсатора

$$\gamma_k = \alpha_\perp = 0, \quad P = P_0, \quad K = K_0. \quad (16)$$

Для прибора ЛЭФ-3М-1, использованного в настоящей работе, юстировочные параметры P_0 и A_0 определяются значениями

$$P_0 = 100^\circ 40', \quad A_0 = 270^\circ 18'. \quad (17)$$

Начальное положение компенсатора определено по минимуму интенсивности светового пучка на выходе блока $(PA)_\perp$

$$K_0 = K_{1\min} = 71^\circ 22'. \quad (18)$$

Что касается угловых характеристик юстировочных процедур, то для начального положения они определяются значениями

$$\chi_p^{(1)} = 4', \quad \chi_a^{(1)} = -4', \quad \chi_p^{(2)} = 4', \quad \chi_a^{(2)} = -5'. \quad (19)$$

Для начальной ситуации укажем также и второе положение минимума компенсатора:

$$K_{2\min} \approx K_{1\min}. \quad (20)$$

Некоторые соображения по поводу приближенного равенства (20), имеющего место и для других углов поворота $\gamma_k = \alpha_\perp$, будут высказаны ниже.

Далее для каждого из указанных типов параметра K'_0 измерим угловые характеристики юстировочных процедур для выбранного ряда значений угла $\gamma_k = \alpha_\perp$. При этом обратим внимание на особенности юстировочных процедур, обусловленные неоднородностью компенсатора и погрешностями его лимба. Затем, выбрав для прибора классическую измерительную конфигурацию, относим (для каждого типа величины K'_0) угловые характеристики юстировочных процедур, измеренные для значений угла $\gamma_k = \alpha_\perp = 45^\circ$ и $\gamma_k = \alpha_\perp = 315^\circ$, к первой и второй парам измерительных зон соответственно. Наконец, привлекая преобразованные с учетом соотношений (6) инварианты эллипсометрии и используя положения гашения поляризационных призм, полученные на специально подобранном образце, определяем параметры компенсатора для первой и второй пар зон. В конечном итоге это позволяет исследовать характер межзонного разброса поляризационных углов на различных образцах и выяснить степень влияния на межзонный разброс способа выбора величины K'_0 и неоднородности отражающей поверхности образцов.

Рассмотрим этот процесс для каждого типа параметра K'_0 .

Выбор параметра K'_0 по положению минимума компенсатора. Для начальных положений блока $(PA)_\perp$ и компенсатора ($\gamma_k = \alpha_\perp = 0$) угловые характеристики юстировочных процедур, соответствующих рассматриваемому типу параметра K'_0 , уже приведены (см. (19)). Укажем здесь экспериментальные значения таких характеристик и для других значений угла $\gamma_k = \alpha_\perp$. Для этого прежде всего найдем на лимбе компенсатора (для каждого из углов $\gamma_k = \alpha_\perp$) показания, которым соответствует минимум интенсивности светового пучка на выходе блока $(PA)_\perp$, и по этим показаниям определим величину K'_0 для рассматриваемого набора углов $\gamma_k = \alpha_\perp$. После этого можно перейти и к определению угловых характеристик юстировочных процедур. Будем также указывать значения дополнительного угла α_k , обусловленного выбором показания K'_0 . Для этого воспользуемся показаниями расчетного лимба компенсатора.

Рассмотрим все значения угла поворота $\gamma_k = \alpha_\perp$ из выбранного ряда. Сразу отметим, что для всех значений этого угла выполняется приближенное равенство, аналогичное (20)

$$K'_{2\min} \approx K'_{1\min}. \quad (21)$$

$$1) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 45^{\circ}:$$

$$K'_0 = K'_{1\min} = 26^{\circ}36' (26^{\circ}17'), \quad \alpha_k = 5', \quad (22)$$

$$\chi_p^{(1)} = 4', \quad \chi_a^{(1)} = -4', \quad \chi_p^{(2)} = 4', \quad \chi_a^{(2)} = -4'.$$

$$2) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 90^{\circ}:$$

$$K'_0 = K'_{1\min} = 341^{\circ}48' (341^{\circ}14'), \quad \alpha_k = 8', \quad (23)$$

$$\chi_p^{(1)} = 3', \quad \chi_a^{(1)} = -3', \quad \chi_p^{(2)} = 5', \quad \chi_a^{(2)} = -5'.$$

$$3) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 135^{\circ}:$$

$$K'_0 = K'_{1\min} = 296^{\circ}48' (296^{\circ}11'), \quad \alpha_k = 11', \quad (24)$$

$$\chi_p^{(1)} = 5', \quad \chi_a^{(1)} = -5', \quad \chi_p^{(2)} = 5', \quad \chi_a^{(2)} = -5'.$$

$$4) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 180^{\circ}:$$

$$K'_0 = K'_{1\min} = 251^{\circ}37' (251^{\circ}11'), \quad \alpha_k = 11', \quad (25)$$

$$\chi_p^{(1)} = 5', \quad \chi_a^{(1)} = -5', \quad \chi_p^{(2)} = 5', \quad \chi_a^{(2)} = -5'.$$

$$5) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 225^{\circ}:$$

$$K'_0 = K'_{1\min} = 206^{\circ}25' (206^{\circ}18'), \quad \alpha_k = 4', \quad (26)$$

$$\chi_p^{(1)} = 5', \quad \chi_a^{(1)} = -5', \quad \chi_p^{(2)} = 5', \quad \chi_a^{(2)} = -5'.$$

$$6) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 270^{\circ}:$$

$$K'_0 = K'_{1\min} = 161^{\circ}14' (161^{\circ}22'), \quad \alpha_k = 0, \quad (27)$$

$$\chi_p^{(1)} = 4', \quad \chi_a^{(1)} = -4', \quad \chi_p^{(2)} = 5', \quad \chi_a^{(2)} = -5'.$$

$$7) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 315^{\circ}:$$

$$K'_0 = K'_{1\min} = 116^{\circ}12' (116^{\circ}23'), \quad \alpha_k = -1', \quad (28)$$

$$\chi_p^{(1)} = 4', \quad \chi_a^{(1)} = -4', \quad \chi_p^{(2)} = 4', \quad \chi_a^{(2)} = -4'.$$

Для однородного компенсатора сдвиг положения минимума определяется изменением угла $\gamma_k = \alpha_{\perp}$, т. е. дополнительный угол α_k равен нулю. Данный факт позволяет при условии правильности лимбов поляризационных призм провести экспериментальную калибровку (провести аттестацию) лимба компенсатора в любом реальном приборе путем использования эталонного (однородного) компенсатора. В рассматриваемом случае угол α_k не равен нулю

$$\alpha_k \neq 0,$$

что связано с неоднородностью компенсатора. При этом, как следует из выражений (22–28), значения угла α_k меняются с изменением угла поворота $\alpha_{\perp}$, а это говорит о том, что характер неоднородности меняется при обходе пластины компенсатора.

Обращает на себя внимание поведение величины $K'_{2\min}$, определяющей положение второго минимума интенсивности светового луча. Измерения указывают (в пределах экспериментальной точности) на равенство обоих положений минимума ($K'_{2\min} = K'_{1\min}$), хотя на самом деле имеет место (для всех углов $\gamma_k = \alpha_{\perp}$) приближенное равенство (21) (см. также (20)). Здесь мы не будем подробно разбираться с этим фактом. Отметим только, что в случаях, когда показание K'_0 определяется по первому положению минимума, приближенное равенство (21) обуславливает резкое уменьшение второго из малых параметров

$$|\rho_2| \ll |\rho_1|, \quad (29)$$

причем параметр ρ_2 становится величиной второго порядка малости. Именно это и мешает его проявлению в эксперименте. Ниже, рассматривая линейные соотношения (6) и используя при этом экспериментальные данные по угловым характеристикам юстировочных процедур, мы снова обратим внимание на поведение величины ρ_2 .

Обратимся теперь к инвариантам эллипсометрии. В работе [2] инварианты, записанные для произвольной измерительной конфигурации прибора, преобразованы с учетом соотношений (6). В работе [1] они упрощены на случай классической измерительной конфигурации и использованы для экспериментального определения основного фазового параметра ρ неоднородного компенсатора. В настоящей работе для используемого прибора также выберем классическую измерительную конфигурацию:

$$\psi_k^{(j)} = \alpha_{\perp}^{(j)} = 45^{\circ} \quad (j = 1, 2, 3, 4). \quad (30)$$

Пусть K_{01} и K_{02} — это положения компенсатора для 1-й и 2-й пар измерительных зон. Понятно, что они определяются показаниями K'_0 для углов поворота $\gamma_k = \alpha_{\perp} = 45^{\circ}$ и $\gamma_k = \alpha_{\perp} = 315^{\circ}$ соответственно. Отсюда следует, что значения величин K_{01} и K_{02} , как и угловые характеристики соответствующих юстировочных процедур, даются выражениями (22) и (28). Конкретизируем прежде всего линейные соотношения (6). Привлекая формулы для величин g_{11} , q_{11} и g_{22} , q_{22} из соотношений [2, (6)] и используя значения угловых характеристик, одинаковые для обеих пар зон, находим

$$g_{11} = q_{11}, \quad g_{22} = q_{22} = 0. \quad (31)$$

Формулы (31) позволяют упростить линейные соотношения:

$$\rho_1 = g_{11}(1 + \rho), \quad \rho_2 = 0, \quad (32)$$

где

$$g_{11} = \frac{-1}{D_0} \operatorname{tg} \chi_a^{(2)} \left[1 + \operatorname{tg} \chi_p^{(1)} \operatorname{tg} \chi_p^{(2)} \right], \quad (33)$$

$$D_0 = 1 - \operatorname{tg} \chi_p^{(1)} \operatorname{tg} \chi_a^{(1)} \operatorname{tg} \chi_p^{(2)} \operatorname{tg} \chi_a^{(2)}. \quad (34)$$

Формулы (31–34) в равной мере применимы (в рассматриваемом случае) для обеих пар зон. Отметим, что в силу ограничений на точность экспериментальных измерений вторые из условий (31) и (32) являются приближенными.

Для экспериментального определения основного фазового параметра ρ используем преобразованные инвариантные соотношения, записанные для случая классической измерительной конфигурации. Для этого понадобятся соотношения (31) и (33), (34), а также положения гашения поляризационных призм, измеренные на специально подобранном образце. Поляризационные углы Δ и Ψ такого образца на приемлемых углах падения (достаточно далеких от угла 90°) не должны слишком близко приближаться к значениям 180° и 0 соответственно. Кроме того, поверхность образца должна быть достаточно однородной. В качестве такого образца использована пленка кобальта на стекле. После определения параметра ρ находится с помощью соотношения (32) и малый параметр ρ_1 . Что касается параметра ρ_2 , то он изначально равен нулю (см. (32)).

Проведенные по изложенной схеме численные расчеты привели к следующим результатам. Параметры компенсатора были определены по измерениям на 11 углах падения из интервала $(51, 70)^\circ$. Воспользовавшись стандартным комплексным представлением для этих параметров

$$\rho = f \exp(-i\delta), \quad \rho_1 = f_1 \exp(-i\delta_1), \\ \rho_2 = f_2 \exp(-i\delta_2),$$

запишем наиболее характерные значения f , δ , f_1 , δ_1 и f_2 , δ_2 .

Первая пара зон

$$f = 0.9711, \quad \delta = 76^\circ 00', \\ f_1 = 0.0018, \quad \delta_1 = 37^\circ 21', \quad f_2 = 0, \quad \delta_2 = 0. \quad (35)$$

Вторая пара зон

$$f = 0.9831, \quad \delta = 72^\circ 11', \\ f_1 = 0.0019, \quad \delta_1 = 35^\circ 44', \quad f_2 = 0, \quad \delta_2 = 0. \quad (36)$$

Здесь обращает на себя внимание заметная разница между значениями основного фазового параметра δ , отвечающими первой и второй парам

зон. Эта разница сохраняется и даже усиливается при рассмотрении всего набора углов падения. Такое различие между парами зон объясняется прежде всего неоднородностью компенсатора. В то же время наблюдающаяся зависимость результатов от угла падения светового пучка обусловлена неоднородностью отражающей поверхности образца, в данном случае пленки кобальта. По этой причине межзонный разброс поляризационных углов на выбранном образце, хотя и сокращен заметно, но все же на некоторых углах падения разброс угла Δ достигает довольно больших величин (одного, двух градусов). Параметры компенсатора, определяемые выражениями (35) и (36), позволили провести измерения и исследовать характер межзонного разброса на образцах сапфира и оптического стекла. На сапфире межзонный разброс, особенно для угла Δ , оказывается довольно заметным. Связанная с этим неоднородность поверхности сапфира заметно проявляется и в процессе измерений положений гашения поляризационных призм (особенно поляризатора). Измерения же на оптическом стекле не являются особенно показательными. Неоднородность поверхности оптического стекла особенно проявляется в окрестности угла Брюстера, причем в первую очередь в отношении угла Δ . Вне этой окрестности межзонный разброс угла Δ не особенно выделяется, и связано это с близостью данного угла к значениям 180 и 0° .

Выбор параметра K'_0 по реальному лимбу компенсатора. Такой выбор производится в соответствии с условием (15). Поворот компенсатора в этом случае определяется по его реальному лимбу от отметки K_0 , но из-за погрешностей этого лимба в общем случае не совпадает с углом $\alpha_\perp$. Мы не будем рассматривать, как в предыдущем случае, все углы поворота $\gamma_k = \alpha_\perp$ блока $(PA)_\perp$. Рассмотрим только два из них, которые соответствуют классической измерительной конфигурации прибора (30). Как и в предыдущем разделе, определим положения K_{01} и K_{02} компенсатора для 1-й и 2-й пар измерительных зон. Им соответствуют показания K'_0 (см. (15)) для углов поворота $\gamma_k = \alpha_\perp = 45^\circ$ и $\gamma_k = \alpha_\perp = 315^\circ$. Приведем также угловые характеристики юстировочных процедур и значения угла α_k .

$$1) \gamma_k = \alpha_\perp = 45^\circ:$$

$$K_{01} = K'_0 = 26^\circ 22' (26^\circ 03'), \quad \alpha_k = 19', \\ \chi_p^{(1)} = 18', \quad \chi_a^{(1)} = 10', \quad \chi_p^{(2)} = 18', \quad \chi_a^{(2)} = 10'. \quad (37)$$

$$2) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 315^{\circ}:$$

$$K_{02} = K'_0 = 116^{\circ}22'(116^{\circ}33'), \quad \alpha_k = -11', \\ \chi_p^{(1)} = -4', \quad \chi_a^{(1)} = -14', \quad \chi_p^{(2)} = -5', \quad \chi_a^{(2)} = -14'. \quad (38)$$

Нетрудно показать, что угловые характеристики (37) и (38) отличаются от угловых характеристик (22) и (28) в основном сдвигом на некоторую постоянную величину. Поэтому можно записать приближенные равенства

$$\chi_p^{(1)} \approx \chi_p^{(2)}, \quad \chi_a^{(1)} \approx \chi_a^{(2)}. \quad (39)$$

Учитывая формулы для величин g_{11} , q_{11} и g_{22} , q_{22} , а также (39), найдем приближенные выражения для этих величин:

$$g_{11} \approx -\chi_a^{(1)}, \quad q_{11} \approx \chi_p^{(1)}, \quad q_{22} \approx -g_{22} \approx \chi_p^{(1)} + \chi_a^{(1)}. \quad (40)$$

Третье из выражений (40) позволяет записать второе линейное соотношение (6) в виде

$$\rho_2 \approx g_{22}(\rho - 1). \quad (41)$$

Дальнейшее изложение в точности повторяет предыдущий раздел. В качестве основного образца по-прежнему использована пленка кобальта на стекле. Основные результаты, касающиеся параметров f и δ , остаются практически неизменными. Их характерные значения представлены выражениями (35) и (36). Что касается параметров f_1 , δ_1 и f_2 , δ_2 , то они, оставаясь малыми, меняют свои значения. Особенности межзонного разброса поляризационных углов, изученного на основном образце, а также на образцах сапфира и оптического стекла, очевидно, остаются прежними.

Выбор параметра K'_0 по расчетному лимбу компенсатора. Данный выбор также производится в соответствии с условием (15), но поворот компенсатора (от отметки K_0) в этом случае определяется по его расчетному лимбу и в принципе совпадает (в рамках точности расчетной процедуры) с углом $\alpha_{\perp}$. Приведем здесь основные экспериментальные результаты, касающиеся определения положений K_{01} и K_{02} компенсатора, а также угловых характеристик юстировочных процедур. Угол α_k в данном случае, очевидно, всегда равен нулю.

$$1) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 45^{\circ}:$$

$$K_{01} = K'_0 = 26^{\circ}41'(26^{\circ}22'), \quad \alpha_k = 0, \\ \chi_p^{(1)} = -1', \quad \chi_a^{(1)} = -9', \quad \chi_p^{(2)} = -1', \quad \chi_a^{(2)} = -9'. \quad (42)$$

$$2) \gamma_k = \alpha_{\perp} = 315^{\circ}:$$

$$K_{02} = K'_0 = 116^{\circ}11'(116^{\circ}22'), \quad \alpha_k = 0, \\ \chi_p^{(1)} = 6', \quad \chi_a^{(1)} = -3', \quad \chi_p^{(2)} = 6', \quad \chi_a^{(2)} = -3'. \quad (43)$$

Приближенные соотношения (39–41) имеют место и для данного случая. Что касается экспериментальных результатов, то они полностью повторяют предыдущие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показано, что не только неоднородность компенсатора, но и погрешности его лимба не играют принципиальной роли. И в этом случае, используя соответствующие процедуры, можно обеспечить нормальную работу прибора. Эквивалентность всех вариантов выбора положений компенсатора при заданной измерительной конфигурации прибора следует из теоретических построений, приведших к обобщению комбинированного подхода к определению параметров компенсатора. И цель эксперимента состоит не в том, чтобы доказать эту эквивалентность. Проведенный эксперимент наглядно демонстрирует методику практической реализации обобщенного комбинированного подхода. Приведенные в настоящей работе экспериментальные результаты, связанные с изучением межзонного разброса поляризационных углов, носят вспомогательный характер. В новой метрологии "нулевой" эллипсометрии межзонный разброс рассматривается в качестве объективного критерия, определяющего в совокупности как точность измерения поляризационных углов, так и качество поверхности. Образцы, использованные в настоящей работе, не обладают в достаточной мере свойствами, необходимыми для надежной аттестации оптических элементов прибора. Для этих целей требуется широкий набор образцов, отличающихся не только высоким качеством, но и обеспечивающих широкий диапазон отвечающих им поляризационных углов. По измерениям на таких образцах устанавливается приборная составляющая межзонного разброса поляризационных образцов, а это позволяет по общему межзонному разбросу оценивать качество поверхности рядовых образцов. Таким образом, полный набор должен включать в себя не только группу эталонных образцов, но также и серийные образцы с обычной подготовкой поверхности. Это очень важная задача, которая будет решаться в следующих работах. Настоящую же работу можно рассматривать как подготовку к решению данной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семененко А.И., Семененко И.А. // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 1. С. 65–77.
2. Семененко А.И., Семененко И.А. // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 4. С. 24–37.
3. Ржанов А.В., Свитаев К.К., Семененко А.И. и др. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с.
4. Семененко А.И., Семененко И.А. // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 2. С. 34–46.
5. Семененко А.И., Семененко И.А. // Научное приборостроение. 2008. Т. 18, № 1. С. 3–15.
6. Семененко А.И., Семененко И.А. // Научное приборостроение. 2008. Т. 18, № 2. С. 18–32.

*Институт прикладной физики НАН Украины,
г. Сумы (Семененко А.И., Мельник С.С.)*

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург (Семененко И.А.)*

Контакты: Семененко Альберт Иванович,
sem199@mail.ru

Материал поступил в редакцию 13.04.2010.

**ON THE NEW POTENTIALS OF ELLIPSOMETRY ARISING
FROM THE NULL OPTICAL CIRCUIT.
ELLIPSOMETRY OF REAL SURFACE STRUCTURES.
18. METROLOGY OF THE NULL ELLIPSOMETRY.
ON EXPERIMENTAL EVALUATION OF DEVICE OPTIC ELEMENTS**

A. I. Semenenko¹, I. A. Semenenko², S. S. Melnik¹

¹*Institute of Applied Physics NAS, Ukraine, Sumy*

²*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

The work is devoted to the generalization of the combined approach to the definition of the compensator parameters. It includes generalization of Jones procedure for matrix construction of non-ideal compensator, the process of device measuring configuration setting, and also calibrator procedures intended for the determination of linear relations between ρ , ρ_1 and ρ_2 compensator parameters. It was shown that within the limits of the generalized combined approach not only heterogeneity but also errors of its limb have no principal significance. In this case it is also possible to secure normal work of the devices using proper procedures. Equivalence of all possible variants of compensator position at the given device configuration was proved. The experimental part of the work presents the method of practical use of the generalized combined approach.

Keywords: ellipsometry, phase compensator, matrix Jones, calibration, ellipsometry invariants, interzone disorder, polarization angles