

УДК 535.5.511:531.7

© А. И. Семененко, И. А. Семененко

ОБОСНОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИ НЕКОРРЕКТНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ.

1. О РОЛИ УГЛА БРЮСТЕРА В РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ. ОБЩИЕ СВОЙСТВА И ВЫБОР КОМПЛЕКСА УГЛОВ ПАДЕНИЯ СВЕТОВОГО ПУЧКА

В работе проведен анализ влияния наборов углов падения светового пучка прибора на характер решения математически некорректной обратной задачи эллипсометрии. Показано, что существование только одного набора углов падения, на котором реализуется правильный предельный переход к идеальной ситуации, и заметный разброс оптимальных значений d_{opt} и n_{opt} параметров пленки по угловым комплексам некоторого множества этих комплексов не является ограничивающим возможности метода фактором. Более того, подобные общие свойства угловых комплексов приводят к дополнительным возможностям метода решения математически некорректной обратной задачи. Рассмотрена также роль угла Брюстера в формировании используемых для решения обратной задачи комплексов углов падения.

Кл. сл.: эллипсометрия, поляризационные углы, математически некорректная обратная задача, критерий, оптимальное решение, численный эксперимент, сверхтонкая пленка, подложка, оптические постоянные

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование поверхностной структуры твердых тел и жидкостей относится к числу сложных и практически важных научных задач. Такая структура проявляется в самых различных формах. Это — сверхтонкие пленки естественного окисла на полупроводниках и металлах. Это — нарушенные слои на поверхности твердых тел, возникающие в результате той или иной обработки. Кроме того, это также — естественная структура поверхности жидкостей, связанная с их общими свойствами и изменяющаяся при добавках различных веществ. Во всех этих случаях обратная задача эллипсометрии является математически некорректной. Математическая некорректность проявляется в том, что даже относительно слабые экспериментальные ошибки заметно искажают истинные значения параметров, характеризующих поверхностную структуру. Очень часто эти искажения приобретают абсурдный характер. Однако надо иметь в виду, что такое проявление математической некорректности непосредственно связано с классическим подходом к решению обратной задачи. В этом случае в качестве решения выбираются параметры, определяющие точку абсолютного минимума функционала обратной задачи. При наличии экспериментальных ошибок причи-

ны, приводящие к математической некорректности, могут быть самыми разными. Для естественных окислов выраженная некорректность обратной задачи обусловлена их сверхмалой (порядка нескольких нанометров) толщиной. Для нарушенных слоев толщина не играет особой роли, и основной причиной заметного проявления некорректности является слабое отличие оптических параметров таких слоев от их объемных значений. Нарушенные слои имеют место всегда, и это обстоятельство надо учитывать при исследовании сверхтонких пленок, имеющих другую природу. Но и сам нарушенный слой, как правило, имеет более выраженную по оптическим параметрам верхнюю часть с относительно небольшой, в том числе и сверхмалой, толщиной. Подобную структуру, по-видимому, имеет и поверхность жидкостей. Таким образом, задача по исследованию поверхностной структуры твердых тел и жидкостей является довольно сложной. Она не сводится только к определению параметров некоторой сверхтонкой поверхностной пленки при заданных параметрах подложки.

В работе [1] предложен новый подход к решению математически некорректной обратной задачи эллипсометрии для однослойной системы. Этот подход основан на использовании измерений поляризационных углов, отвечающих набору углов

падения светового пучка. В работе [1] приведено общее описание правил отбора оптимального решения. Использование данных правил позволяет с высокой точностью найти решение обратной задачи относительно толщины и показателя преломления пленки при известных значениях оптических постоянных подложки. Это убедительно продемонстрировал численный эксперимент, основанный на моделировании экспериментальных ошибок. Однако для реальных исследуемых объектов оптические постоянные подложки не могут быть заданы точно. Во-первых, это обусловлено сложной структурой поверхности любого материала, а значит, и подложки. Во-вторых, между пленкой и подложкой всегда возникает некоторый переходный слой. Данные факторы являются причиной того, что подложка характеризуется уже некоторыми эффективными значениями оптических параметров. Эти эффективные значения могут заметно отличаться от оптических параметров, определяющих объемные свойства подложки. В работе [1] показано, что математическая некорректность обратной задачи значительно усиливается из-за неточного задания оптических параметров подложки. Это наблюдается даже тогда, когда неточность в задании показателя преломления подложки проявляется в четвертом или даже пятом знаке после запятой. Поэтому речь может идти только об одновременном определении всех параметров однослойной системы — как поверхностной пленки, так и подложки.

В последующих работах для решения математически некорректной обратной задачи эллипсоидометрии в ее общей постановке предложен метод последовательных приближений. Основу этого метода составляют правила отбора оптимального решения для параметров сверхтонкой пленки или нарушенного слоя при фиксированных на каждом этапе решения оптических параметрах подложки. При этом рассматривается процесс по сближению двух точек. Одна из этих точек определена параметрами пленки в точке абсолютного минимума функционала

$$(d_{\min}, n_{\min}). \quad (1)$$

Вторая точка представлена оптимальными значениями данных параметров

$$(d_{opt}, n_{opt}). \quad (2)$$

Очевидно, обеим точкам соответствуют одни и те же фиксированные для каждого шага метода значения параметров $n_0^{(0)}$, $\kappa_0^{(0)}$ подложки. Выбор значений $n_0^{(0)}$, $\kappa_0^{(0)}$ носит относительный характер. Здесь важно лишь, чтобы на первом шаге при любом типе экспериментальных ошибок обязательно

выполнялось условие

$$n_{\min} < n_{opt}, \quad d_{\min} > d_{opt}. \quad (3)$$

Условие (3) достигается легко. Это связано с тем, что точка (1) очень подвижна даже при слабом изменении показателя преломления подложки. В то же время точка оптимальных значений (2) обладает ограниченной подвижностью. Это обеспечивает переход точки минимума через точку оптимальных значений с последующим расхождением данных точек

$$n_{\min} > n_{opt}, \quad d_{\min} < d_{opt}. \quad (4)$$

Основную роль в перемещении точки минимума (1) играет показатель преломления подложки n_0 , т. е. его изменение вдоль некоторой возрастающей последовательности значений. Вследствие этого переход точки минимума (1) через точку оптимальных значений (2) наблюдается при любой величине коэффициента поглощения подложки κ_0 . Задача состоит в том, чтобы из множества переходов точки минимума через точку оптимальных значений выбрать тот переход, которому соответствует оптимальное решение, наиболее приближенное к точному решению обратной задачи. И поскольку каждому такому переходу соответствует определенное значение κ_0 , то правильный выбор перехода означает и выбор величины κ_0 как одного из параметров оптимального решения обратной задачи. Данная процедура подробно описана в работе [2]. При этом особое внимание уделено установлению признака, по которому определяется оптимальное значение коэффициента поглощения подложки.

Метод последовательных приближений отработан на численном эксперименте. Данный эксперимент включает в себя моделирование экспериментальных ошибок в задании поляризационных углов Ψ и Δ для набора углов падения светового пучка. Использование набора углов падения светового пучка на образец является необходимым условием для успешного применения метода. В то же время метод демонстрирует надежность и хорошие возможности при исследовании также и реальных отражающих систем типа "полупроводниковая подложка—прозрачная сверхтонкая пленка". Он успешно опробован при исследовании кремния и арсенида галлия с естественными сверхтонкими окисными пленками. При этом речь идет об определении всех 4 параметров таких систем.

Следует отметить, что для успешного использования предложенного метода необходима высокая точность вычислительного процесса. В связи с этим существенно модифицирован хорошо из-

вестный комплексный метод Бокса [3], положенный в основу решения обратной задачи.

Еще раз отметим, что новый подход к решению математически некорректной обратной задачи эллипсоидности основан на использовании измерений поляризационных углов, отвечающих некоторому набору углов падения светового пучка на образец. Это является необходимым условием для успешного применения метода. В то же время, как показывает анализ, выбор комплекса углов падения светового пучка не является простой задачей. И дело не только в количестве углов в таком наборе, что само по себе также играет большую роль. Есть еще один крайне важный момент, связанный с предельным переходом к идеальному случаю, когда отсутствуют экспериментальные ошибки в используемых поляризационных углах Ψ и Δ , а отражающая система является строго однослойной. Такой предельный переход при использовании методов решения математически некорректной задачи реализуется не для любого набора углов падения светового пучка. Без учета данного обстоятельства возможны дополнительные ошибки в определении параметров отражающей системы. И когда выше указывается на успешное применение метода при исследовании реальных образцов, то прежде всего имеется в виду подтверждение основных принципов, положенных в основу нового подхода к решению математически некорректной обратной задачи. Возможные дополнительные ошибки, связанные с выбором комплекса углов падения, не искажают и тем более не отменяют эти принципы.

В связи с приведенными соображениями целью настоящей работы является анализ основных свойств угловых комплексов и определение способов выбора таких комплексов. При этом особое внимание будет уделено влиянию угла Брюстера и его окрестности на характер решения обратной задачи.

ОБЩИЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСА УГЛОВ ПАДЕНИЯ СВЕТОВОГО ПУЧКА. О ВЛИЯНИИ УГЛА БРЮСТЕРА И ЕГО ОКРЕСТНОСТИ

Общие свойства углового комплекса (комплекса углов падения светового пучка на образец) установим, рассматривая предельный переход к идеальной ситуации, для которой образец является строго однослойным, а поляризационные углы определены без ошибок. Для описания данной идеальной ситуации проведем численный эксперимент для той же модели отражающей системы, что и в предыдущих работах.

Для пленки принимаем значения параметров

$$d = 2.50 \text{ нм}, \quad n = 1.50, \quad (5)$$

а для подложки

$$n_0 = 3.865, \quad \kappa_0 = 0.023. \quad (6)$$

Длина световой волны определяется значением $\lambda = 632.8 \text{ нм}$. Что касается значений углов падения φ_0 , то они устанавливаются по результатам исследования свойств некоторого множества угловых комплексов.

Как и ранее, в качестве функционала S_0 обратной задачи будем рассматривать среднеквадратичную невязку следующего вида:

$$S_0 = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [(\Delta_t[i] - \Delta_e[i])^2 + (\Psi_t[i] - \Psi_e[i])^2]. \quad (7)$$

Суммирование в выражении (7) производится по набору углов падения φ_0 светового пучка, т. е. величины $\Delta_t[i]$, $\Psi_t[i]$ и $\Delta_e[i]$, $\Psi_e[i]$ из данного выражения — это соответственно теоретические и экспериментальные значения поляризационных углов, отвечающие i -му углу падения. Набор углов падения должен удовлетворять определенным требованиям. В предыдущих работах предполагалось, что данному набору должно соответствовать тщательное экспериментальное описание тех участков кривых $\Psi(\varphi_0)$ и $\Delta(\varphi_0)$, которым соответствуют достаточно широкий интервал вокруг острия для угла Ψ и вся размытая ступенька для угла Δ . Это условие связывалось с тем, что указанные участки наиболее чувствительны к изменению параметров поверхностных структур. Вроде бы все правильно, и угол Брюстера, как и его ближайшая окрестность, в той или иной мере должны быть представлены в используемом для решения обратной задачи комплексе углов падения. Однако ситуация гораздо сложнее, чем это кажется на первый взгляд. Именно существенное изменение (на наборе углов падения) чувствительности поляризационных углов к изменению параметров пленки является причиной того, что значение параметра критерия для всех точек траектории, ведущей (при фиксированных оптических параметрах подложки) к точке абсолютного минимума функционала S_0 (см. [1]), существенно возрастает. При этом правила отбора, основанные на использовании свойств параметра-критерия [1], дают оптимальное решение, которое может заметно отличаться от точного решения даже в идеальном случае. Причем, это проявляется тем сильнее, чем ближе подходит угловой комплекс к углу Брюстера и его ближайшей окрестности. Это и означает нарушение предельного перехода к идеальной ситуации. Однако такое нарушение не является общим правилом. Всегда существует такой угловой комплекс, который восстанавливает указанный предельный переход. Ниже мы продемонстрируем это

Зависимость оптимальных значений d_{opt} и n_{opt} параметров пленки от положения перемещающегося углового комплекса

α (град)	$\varphi_0[1]$ (град)	$\varphi_0[N_f]$ (град)	d_{opt} (нм)	n_{opt}
-1.500	46.500	72.500	2.440	1.531
-0.500	47.500	73.500	2.457	1.522
0.000	48.000	74.000	2.475	1.512
0.600	48.600	74.600	2.500	1.500
1.000	49.000	75.000	2.511	1.495
1.425	49.425	75.425	2.523	1.490
1.494	49.494	φ_{Br}	2.507	1.496
1.700	49.700	75.700	2.560	1.473
1.850	49.850	75.850	2.562	1.472
2.000	50.000	76.000	2.561	1.473
2.500	50.500	76.500	2.550	1.478
3.000	51.000	77.000	2.544	1.480
3.500	51.500	77.500	2.562	1.472
4.000	52.000	78.000	2.575	1.466
4.500	52.500	78.500	2.576	1.465
5.000	53.000	79.000	2.565	1.471
5.500	53.500	79.500	2.584	1.463
6.000	54.000	80.000	2.592	1.460

на ряде примеров, а затем опишем способ выбора такого углового комплекса.

Основные свойства угловых комплексов установим, принимая для оптических параметров подложки их точные значения (6). Обратимся сначала к угловому комплексу, для которого углы падения определяются выражением

$$\varphi_0[i] = \varphi_{0b} + (i-1)h, \quad i = 1, \dots, N_f, \quad (8)$$

где φ_{0b} — начальный угол комплекса; h — шаг, с которым изменяются углы; N_f — число углов в комплексе.

Введем также угловой параметр α , определяющий движение комплекса (8) в целом к углу Брюстера или же от него. С учетом этого параметра выражение для углов перемещающегося комплекса запишется

$$\varphi_0[i] = \varphi_{0b} + (i-1)h + \alpha, \quad i = 1, \dots, N_f. \quad (9)$$

При монотонном увеличении параметра α от некоторого заданного значения рассматриваемый угловой комплекс, очевидно, перемещается в сторону угла Брюстера. Определим величины φ_{0b} , h и N_f значениями

$$\varphi_{0b} = 48.00^\circ, \quad h = 2.00^\circ, \quad N_f = 14. \quad (10)$$

При этих значениях конечный угол комплекса (8) запишется:

$$\varphi_{0f} = 74.00^\circ, \quad (11)$$

Что касается начального и конечного углов перемещающегося комплекса (9), то они, очевидно, определяются соотношениями

$$\varphi_0[1] = \varphi_{0b} + \alpha, \quad \varphi_0[N_f] = \varphi_{0f} + \alpha. \quad (12)$$

В целях удобства для углового комплекса (9) введем обозначение

$$F(\alpha), \text{ или } F(\varphi_0[N_f]). \quad (13)$$

Укажем также значение угла Брюстера для подложки (6)

$$\varphi_{Br} = 75.494^\circ. \quad (14)$$

Меняя значения параметра α , рассмотрим различные положения углового комплекса (9) и определим отвечающие им оптимальные значения d_{opt} и n_{opt} . При этом необходимо учитывать, что в идеальном случае при точно заданных параметрах подложки точка абсолютного минимума функционала S_0 определяет значения d_{min} и n_{min} , совпадающие, причем для любого углового комплекса, с точными значениями (5) параметров пленки:

$$d_{min} = 2.50 \text{ нм}, \quad n_{min} = 1.50. \quad (15)$$

Соотношения (15) уже дают точные значения параметров пленки, однако интерес представляет предельный переход, реализуемый с помощью метода решения математически некорректной задачи, т. е. путем нахождения оптимального решения и сравнения его с точным решением. Это связано с интересами решения обратной задачи для реального случая. В следующем разделе при рассмотрении предельного перехода относительно всех 4 параметров мы учтем соотношения (15), имеющие место только для идеального случая и только при точно заданных параметрах подложки.

Оптимальные значения d_{opt} и n_{opt} , отвечающие различным значениям параметра α , т. е. различным положениям углового комплекса (9), приведены в таблице. Величины $\varphi_0[1]$ и $\varphi_0[N_f]$, приведенные в этой таблице, представляют значения начального и конечного углов перемещающегося комплекса (9) (см. (12)). Для наглядности целесообразно следить за зависимостью величин d_{opt} и n_{opt} от конечного угла $\varphi_0[N_f]$, который легко

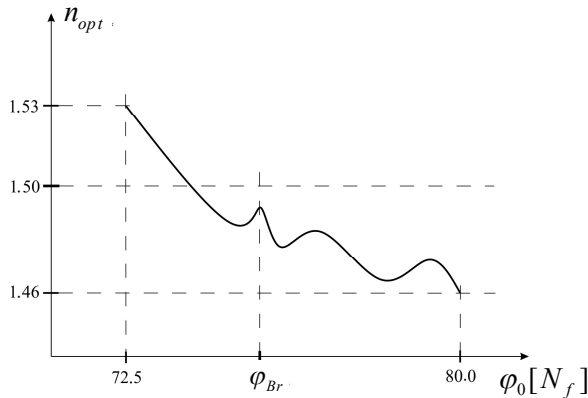


Рис. 1. Схематическое изображение зависимости $n_{opt}(\varphi_0[N_f])$ от положения конечного угла перемещающегося углового комплекса

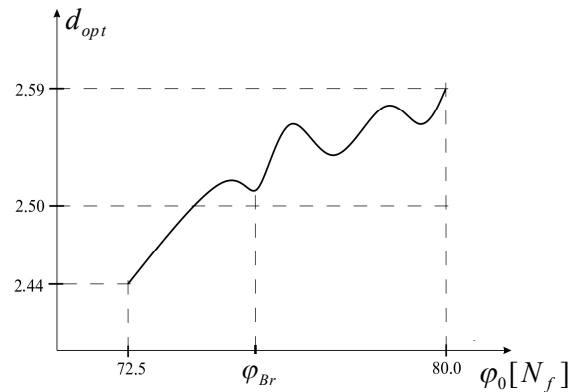


Рис. 2. Схематическое изображение зависимости $d_{opt}(\varphi_0[N_f])$ от положения конечного угла перемещающегося углового комплекса

сравнивать с углом Брюстера. Из таблицы видно, что величины d_{opt} и n_{opt} при изменении конечного угла в пределах интервала

$$\varphi_0[N_f] \in [72.50; 80.00] \quad (16)$$

могут значительно отличаться от точных значений параметров d и n , совпадающих со значениями d_{min} и n_{min} этих параметров в точке абсолютного минимума функционала S_0 . С приближением конечного угла $\varphi_0[N_f]$ к углу Брюстера зависимость величин d_{opt} и n_{opt} приобретает характер осцилляций, что наглядно представлено на рис. 1 и 2. В этом случае оптимальные значения d_{opt} и n_{opt} особенно сильно отличаются от точных значений параметров пленки. К тому же происходит это на относительно небольшом интервале углов падения светового пучка, включающем в себя и угол Брюстера. А это не выгодно в любом случае, в частности по причине того, что на угле Брюстера, как и в его окрестности, точность измерения поляризационных углов Ψ и Δ (особенно угла Δ) резко снижается. В результате проявляется только один угловой комплекс $F(\varphi_0[N_f])$, на котором реализуется правильный предельный переход к идеальному случаю

$$d_{opt} \rightarrow d_{min}, \quad n_{opt} \rightarrow n_{min}. \quad (17)$$

Это происходит на угловом комплексе с конечным углом

$$\varphi_0[N_f] = 74.60^\circ. \quad (18)$$

Данный угол достаточно удален от угла Брюстера, чтобы не вызывать затруднений в экспериментальных измерениях.

В реальной ситуации нецелесообразно определять комплекс углов падения, на котором реализуется предельный переход (17), рассматривая некоторое множество положений перемещающегося углового комплекса (9). Это связано с очень большим объемом экспериментальной работы по измерению поляризационных углов. Есть другой, гораздо более простой способ. Суть его следующая. Перемещается только конечный угол, а остальные углы фиксируются. Для примера рассмотрим конкретный угловой набор

$$\varphi_0[i] = \begin{cases} \varphi_{0b} + (i-1)h, & i=1, \dots, (N_f-2); \\ \varphi_0[N_f-2] + h_1, & i=(N_f-1); \\ \varphi_{0f} + \alpha, & i=N_f, \end{cases} \quad (19)$$

где величины φ_{0b} , φ_{0f} , h , N_f и α имеют тот же смысл, что и для предыдущего варианта, а параметр h_1 — это шаг от угла $\varphi_0[N_f-2]$ к углу $\varphi_0[N_f-1]$. Определим эти величины значениями

$$\begin{aligned} \varphi_{0b} &= 50.50^\circ, \quad h = 2.00^\circ, \quad h_1 = 1.00^\circ, \\ N_f &= 14, \quad \varphi_{0f} = 74.00^\circ. \end{aligned} \quad (20)$$

Параметр α будем определять, начиная от нуля. Здесь мы не будем изучать угловой комплекс (19), рассматривая различные положения конечного угла $\varphi_0[N_f]$ относительно угла Брюстера. Отметим только, что и в этом случае ситуация усложняется с приближением конечного угла к углу

Брюстера. Ограничимся рассмотрением углового комплекса (19) при следующих значениях параметра α :

$$\alpha = 0.00; 0.10; 0.20; 0.30; 0.35; \\ 0.40; 0.50; 0.60; 0.70. \quad (21)$$

Меняя параметр α согласно распределению (21), убеждаемся, что и в случае углового комплекса (19) существует только один набор углов падения, отвечающий значению $\alpha = 0.35^\circ$ (значению конечного угла $\varphi_0[N_f] = 74.35^\circ$), на котором реализуется правильный предельный переход (17) к идеальной ситуации. При остальных значениях величины α оптимальные значения d_{opt} и n_{opt} параметров пленки заметно отличаются от точных значений этих параметров. Это особенно проявляется на крайних значениях величины α из распределения (21). Так, при нулевом значении α

$$d_{opt} = 2.480, \quad n_{opt} = 1.510, \quad (22)$$

а при максимальном значении α из (21)

$$d_{opt} = 2.520, \quad n_{opt} = 1.491. \quad (23)$$

Существование только одного набора углов падения, на котором реализуется правильный предельный переход к идеальной ситуации, и заметный разброс оптимальных значений d_{opt} и n_{opt} по угловым комплексам некоторого множества этих комплексов не является ограничивающим возможностями метода фактором. В следующем разделе будет показано, что подобные общие свойства угловых комплексов приводят к дополнительным возможностям метода решения математически некорректной обратной задачи эллипсометрии.

О ВЫЯВЛЕНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОСНОВНОГО КОМПЛЕКСА УГЛОВ ПАДЕНИЯ СВЕТОВОГО ПУЧКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕАЛЬНЫХ ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

В условиях выраженной математической некорректности обратной задачи при исследовании поверхности реальных образцов определению подлежат все параметры отражающей системы. Понятно, что при произвольном выборе углового комплекса ошибки в определении параметров отражающей системы возникают даже в идеальной ситуации. При исследовании реальных образцов эти ошибки могут быть такими, что на их фоне влияние экспериментальных ошибок и отступлений от строго однослойной модели может, фактически, затеряться. В этом случае использование основного комплекса углов падения светового пучка, обеспечивающего предельный переход

к идеальной ситуации, играет огромную роль. По этой причине необходимо найти способ выявления основного углового комплекса в реальной ситуации. Данная задача значительно усложняется в связи с необходимостью определения всех параметров отражающего образца. Поэтому сначала решим ее для идеального случая.

Будем исходить из того, что в идеальной ситуации неизвестны все параметры однослойной системы. Рассмотрим некоторое множество угловых комплексов $F(\alpha)$ (см. (13)), придавая параметру α различные значения. Для всех углов падения каждого комплекса измерены, причем без ошибок, поляризационные углы Ψ и Δ . Будем исходить из того, что в идеальном случае при точно заданных параметрах подложки точка абсолютного минимума функционала S_0 определяет значения d_{min} и n_{min} , совпадающие, причем для любого углового комплекса рассматриваемого множества таких комплексов, с точными значениями параметров пленки. Такое свойство позволяет сформулировать правило, с помощью которого сначала находятся оптические параметры подложки, а затем и основной угловой комплекс. Указанное свойство имеет место только для идеального случая и только при точно заданных параметрах подложки. А это означает, что разброс величин d_{min} и n_{min} по угловым комплексам, отличаясь при произвольных параметрах подложки от нуля, стремится к нулю только в том случае, если параметры подложки стремятся к своим точным значениям $(n_0)_{tru}$ и $(\kappa_0)_{tru}$.

$$n_0 \rightarrow (n_0)_{tru}, \quad \kappa_0 \rightarrow (\kappa_0)_{tru}. \quad (24)$$

Поскольку задача решается в условиях, когда углы Ψ и Δ измерены, т. е. считаются известными, то нет никакой необходимости знать параметры пленки d и n . В этом случае обратная задача решается относительно оптических параметров подложки n_0 и κ_0 . Решением будут те значения этих параметров, которые обеспечивают нулевой разброс величин d_{min} и n_{min} по угловым комплексам множества. Данные значения оптических параметров подложки в рассматриваемом идеальном случае совпадут с их точными значениями. После этого способом, указанным в предыдущем разделе, из множества угловых комплексов выделяется основной комплекс. При этом определяются и параметры пленки. Для этого используются не величины d_{min} и n_{min} , что возможно в идеальной ситуации, а метод решения математически некорректной задачи. Это связано с интересами перехода к реальным отражающим объектам.

Теперь можно сформулировать и способ выявления основного углового комплекса для случая реальных отражающих объектов. Он представляет собой обобщение описанного выше способа, соответствующего идеальной ситуации. Прежде всего решается обратная задача относительно оптических параметров подложки n_0 и κ_0 . Значения этих параметров, обеспечивающие минимизацию разброса величин d_{\min} и n_{\min} по угловым комплексам множества, представляют собой решение данной обратной задачи. При этом минимизация в общем случае достигается при отличном от нуля разбросе величин d_{\min} и n_{\min} . По значениям оптических параметров подложки, обеспечивающим указанную минимизацию, для каждого углового комплекса находятся оптимальные значения d_{opt} и n_{opt} параметров пленки. Основным будет тот угловой комплекс, для которого выполняются соотношения

$$d_{opt} \approx d_{\min}, \quad n_{opt} \approx n_{\min}. \quad (25)$$

Если соотношения (25) не выполняются ни для одного углового комплекса множества, то данное множество необходимо расширить. Найденный описанным способом основной угловой комплекс одновременно определяет и параметры d и n , совпадающие с указанными в (25) величинами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в настоящей работе анализ ком-

плексов углов падения светового пучка очень важен для решения математически некорректной обратной задачи эллипсометрии. Использование множества таких комплексов приводит к дополнительным возможностям метода. В то же время необходима более детальная разработка изложенного подхода, связанная с измерениями на реальных объектах. Важен также численный эксперимент с моделированием экспериментальных ошибок в поляризационных углах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семененко А.И., Семененко И.А. // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 4. С. 132–142.
2. Семененко А.И., Семененко И.А. // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 1. С. 44–51.
3. Vox M.J. A new method of constrained optimization and a comparison with other methods // Comp. Journ. 1965. V. 8. P. 42–51.

Украина, г. Сумы (Семененко А.И.)

Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Семененко И.А.)

Контакты: Семененко Альберт Иванович, sem199@mail.ru

Материал поступил в редакцию 2.07.2012

FEASIBILITY AND PRACTICAL SUPPLEMENT OF SOLUTION METHODS FOR MATHEMATICALLY INCORRECT INVERSE PROBLEM OF ELLIPSOMETRY. 1. TOWARDS AN UNDERSTANDING OF BREWSTER ANGLE FOR SOLUTION OF INVERSE PROBLEM. GENERAL PROPERTIES AND COMPLEX SELECTION OF THE ANGLES OF INCIDENCE OF LIGHT BEAM

A. I. Semenenko¹, I. A. Semenenko²

¹Sumy, Ukraine

²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University

In this work the impact analysis of kits for the angles of incidence of mathematically incorrect inverse problem of ellipsometry. It's shown that the existence only one kit of the angles of incidence, on which the correct passage to the limit towards the ideal situation is realized, and the noticeable scatter of optimal values d_{opt} and n_{opt} of the film parameters in accordance with the angular complexes of some multitude of these complexes isn't the factor limiting the method's possibilities. Besides, the similar general properties of angu-

lar complexes lead to the additional possibilities of solution method for the mathematically incorrect inverse problem. The role of Brewster angle in formation used complexes of the angles of incidence for solution of the inverse problem also is considered.

Keywords: ellipsometry, polarization angles, mathematically incorrect inverse problem, criterion, optimum solution, numerical experiment, super- thin film, ground, optical constants