

УДК 535.5.511: 531.7

© А. И. Семененко

## О НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ МЕТОДА ЭЛЛИПСОМЕТРИИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ "НУЛЕВОЙ" ОПТИЧЕСКОЙ СХемой. ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР. 1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данная статья, открывающая цикл работ, посвящена общему описанию основных направлений исследования, непосредственно связанных с новыми возможностями "нулевой" эллипсометрии, метрологией эллипсометрии, а также с реальной структурой поверхности.

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с очень высокой чувствительностью метода эллипсометрии к изменению состояния поверхности и недостаточной осведомленностью о физических основах и трудностях в реализации возможностей метода экспериментатор, изучающий поверхность с помощью эллипсометра, часто допускает ошибки, иногда очень грубые, при интерпретации результатов измерений.

Есть несколько направлений, ведущих к реализации больших возможностей метода эллипсометрии. Одно из них связано с усовершенствованием самого прибора, его отдельных элементов в целях существенного повышения точности измерения поляризационных углов. Однако такой путь, ведущий к резкому усложнению прибора, оправдан лишь до определенного момента. Это связано не только с трудностями, обусловленными усложнением прибора, но и с практической невозможностью выбора адекватной модели исследуемой поверхности и неидеальностью этой поверхности, что делает бессмысленным достижение секундной точности в измерении поляризационных углов  $\Psi$  и  $\Delta$ .

Неадекватность модели, а также экспериментальные ошибки вызывают большие трудности в решении обратной задачи. Обратная задача эллипсометрии во многих случаях может быть отнесена к классу некорректных математических задач. В связи с этим на первый план выдвигаются проблемы, связанные с дальнейшим развитием методов решения математически некорректных обратных задач эллипсометрии. Математическая некорректность особенно четко и наглядно проявляется при исследовании сверхтонких (менее 5 нм) поверхностных пленок. Данная проблема значительно усложняется в связи с наличием переход-

ного слоя на границе пленка—подложка, роль которого резко возрастает с уменьшением толщины пленки до очень малых значений. Такой переходный слой, очевидно, включает в себя и нарушенный слой на поверхности подложки. Исследование нарушенных слоев на поверхности прозрачных и поглощающих материалов имеет и большое самостоятельное значение, причем обратная задача для нарушенных слоев имеет выраженную математическую некорректность.

Особое значение для реализации принципиальных возможностей эллипсометрии приобретает создание новой научно обоснованной метрологии. Метрология эллипсометра оказывается тесно связанной с метрологией исследуемой поверхности. Решение данной проблемы с учетом такой связи приводит к появлению новых существенных возможностей эллипсометрии.

Основной целью настоящей статьи является общее описание основных направлений исследования, приводящих к решению поставленных задач. В последующих статьях будут детально описаны конкретные результаты, полученные в рамках этих направлений.

Приводим перечень основных направлений исследования, а далее в разделах статьи даются подробные пояснения к ним.

1. Разработка физических основ метрологии эллипсометрии в тесной взаимосвязи с метрологией отражающей поверхности. Интегральный критерий.

2. Разработка метрологической схемы, основанной на использовании интегрального критерия.

3. Дальнейшее развитие теории прибора (эллипсометра), особенно в той ее части, которая касается проявления свойств фазовой пластины компенсатора.

4. Реализация основных технических требова-

ний к "нулевому" эллипсометру. Создание фазового компенсатора на основе монокристалла сапфира.

5. Проведение широкомасштабного эксперимента в целях опробования и внедрения новой метрологии эллипсометрии.

6. Разработка новых эллипсометрических подходов к исследованию реальной поверхности, основанных на использовании интегрального критерия.

7. Исследование на основе "нулевого" подхода анизотропных материалов и поверхностной анизотропии.

8. Создание пакета математических программ для определения параметров поверхностных структур. Разработка новых методов решения математически некорректной обратной задачи эллипсометрии для сверхтонких поверхностных пленок и нарушенных слоев на поверхности различных материалов.

9. Экспериментальные исследования реальных поверхностных структур (сверхтонких пленок, переходных слоев, нарушенных слоев), связанные с необходимостью перехода к новым методам интерпретации результатов измерений.

10. Разработка эллипсометрических методов определения дисперсионных кривых оптических постоянных базовых материалов полупроводниковой микроэлектроники с учетом нарушенных поверхностных слоев.

11. Решение обратной задачи дифракционной эллипсометрии с целью определения параметров многослойной среды, включающей в себя слой в виде дифракционной решетки. Разработка математической программы.

Теперь изложим те же направления, но с подробными пояснениями к ним.

### **1. РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ МЕТРОЛОГИИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ В ТЕСНОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ С МЕТРОЛОГИЕЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ КРИТЕРИЙ**

Физическая сущность метода эллипсометрии проявляется прежде всего через "нулевой" подход, т.е. через приборы с "нулевой" оптической схемой. Именно "нулевой" подход явным образом демонстрирует физику процессов, происходящих в приборе. Эллипсометр, действующий по "нулевой" схеме, очень чутко реагирует на все неблагоприятные факторы, связанные с работой прибора. Это очень наглядно проявляется через измерительные зоны такого прибора [1]. Для экспериментальных значений поляризационных углов  $\Psi$  и  $\Delta$ , как правило, наблюдается заметный разброс по измерительным зонам, обусловленный нарушениями

в оптической юстировке, неточным определением параметров фазового компенсатора, сбоями в системе термостатирования узла компенсатора и другими погрешностями прибора. Однако погрешности прибора не являются единственной причиной такого разброса. К такому же эффекту приводят также неоднородности поверхности и поверхностная анизотропия, проявление которой может быть связано, в частности, и с неоднородностью поверхности.

Таким образом, разброс  $\delta\Psi$ ,  $\delta\Delta$  поляризационных углов по измерительным зонам определяется не только свойствами прибора, но и качеством исследуемых образцов. Математически это можно выразить следующими формулами, отражающими интегральный характер процесса эллипсометрических измерений:

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

где  $\delta\Psi^{(np)}$ ,  $\delta\Delta^{(np)}$  и  $\delta\Psi^{(obr)}$ ,  $\delta\Delta^{(obr)}$  — составляющие полного разброса  $\delta\Psi$ ,  $\delta\Delta$  по измерительным зонам, обусловленные свойствами прибора и качеством поверхности исследуемого образца соответственно.

В соответствии с такими особенностями "нулевой" методики в работах [2, 3] предложен новый подход к эллипсометрической метрологии, который необходимо обобщить, учитывая неидеальный характер поверхности исследуемых образцов. В рамках этого обобщенного подхода разброс экспериментальных значений углов  $\Psi$  и  $\Delta$  по измерительным зонам может рассматриваться в качестве объективного критерия, определяющего в совокупности как точность измерения поляризационных углов, так и качество поверхности. Целесообразность введения такого интегрального критерия определяется сверхчувствительностью прибора (эллипсометра) не только к состоянию оптических элементов и точности определения их параметров (прежде всего фазового компенсатора), но и к качеству исследуемой поверхности.

### **2. РАЗРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ, ОСНОВАННОЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ**

Сверхчувствительность эллипсометра к его погрешностям невозможно учесть, проводя аттестацию прибора по классической схеме, т.е. аттестуя каждый элемент прибора по отдельности. Необходимо также аттестовать прибор в целом. Принятая в настоящее время для этих целей метрологическая процедура, основанная на использовании специально созданных сложных и стабильных эталонных образцов, которым соответствуют усредненные по всем 4 измерительным зонам прибора значения углов  $\Psi$  и  $\Delta$ , рассматриваемые как

эталонные, по ряду важных причин не может быть научно обоснована и явно недостаточна, т. к. процедура усреднения (даже на метрологическом эллипсометре) скрывает и погрешности прибора, и дефекты образца. В еще большей мере это относится к прибору с фотометрической схемой.

В качестве объективного метрологического критерия для аттестации эллипсометра может быть использован межзонный разброс экспериментальных значений углов  $\Psi$  и  $\Delta$ , точнее, его приборная составляющая. Данный метрологический критерий, выявляя очевидным образом погрешности прибора, в полной мере отвечает всем необходимым требованиям. Однако его использование не отменяет аттестацию элементов прибора по классической метрологической схеме. Приборная составляющая межзонного разброса поляризационных углов является итоговым критерием для прибора, все элементы которого прошли аттестацию по классической схеме.

Подбор эталонных образцов, которые можно было бы использовать для аттестации эллипсометров, т. е. для определения приборной составляющей межзонного разброса поляризационных углов, является очень важной и трудной задачей. В случае высококачественных образцов, когда

$$\delta\Psi^{(\text{обр})} \ll \delta\Psi^{(\text{пр})}, \quad \delta\Delta^{(\text{обр})} \ll \delta\Delta^{(\text{пр})}, \quad (2)$$

общий разброс определяется преимущественно свойствами прибора

$$\delta\Psi \approx \delta\Psi^{(\text{пр})}, \quad \delta\Delta \approx \delta\Delta^{(\text{пр})}. \quad (3)$$

Таким образом, при выполнении условий (2) общий разброс на эталонных образцах определяет чисто приборные погрешности эллипсометра, поэтому и необходимы для метрологических целей образцы высокого качества.

Зависимость межзонного разброса углов  $\Psi$  и  $\Delta$  от свойств прибора и свойств образца обеспечивает принципиальную возможность оценивать качество реальных образцов, измеряемых на рабочем (серийном) приборе. Это можно сделать, если исходить из разумного предположения, что составляющая межзонного разброса, обусловленная влиянием только прибора, практически не зависит от качества образцов, локализованных по  $\Psi$  и  $\Delta$  в одной и той же сравнительно небольшой области.

Зная приборную составляющую межзонного разброса для рабочего эллипсометра из результатов аттестации, т. е. зная величины  $\delta\Psi^{(\text{пр})}$ ,  $\delta\Delta^{(\text{пр})}$  и измерив полный разброс  $\delta\Psi$ ,  $\delta\Delta$  для произвольного образца, имеющего по  $\Psi$  и  $\Delta$  ту же локализацию, что и соответствующий метрологический образец, легко находим (см. формулы (1)) параметры  $\delta\Psi^{(\text{обр})}$  и  $\delta\Delta^{(\text{обр})}$ , характеризующие качество исследуемого образца.

Таким образом, использование интегрального критерия открывает новые возможности в исследовании качества поверхности реальных образцов. Уже сейчас ясно, что новая метрология очень тесно, буквально органически связана с физикой поверхности, поэтому ее детальная разработка неизбежно приведет к появлению принципиально новых подходов к исследованию поверхности.

Предложенную метрологию можно использовать и для аттестации эллипсометров с фотометрической схемой. По этому вопросу написана первая работа "Эллипсометр, сочетающий в себе "нулевой" и фотометрический подходы" [6]. Здесь также есть возможность выйти на интересную физику, относящуюся к исследованию неоднородной поверхности.

### 3. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРИБОРА (ЭЛЛИПСОМЕТРА), ОСОБЕННО В ТОЙ ЕЕ ЧАСТИ, КОТОРАЯ КАСАЕТСЯ ПРОЯВЛЕНИЯ СВОЙСТВ ФАЗОВОЙ ПЛАСТИНЫ КОМПЕНСАТОРА

Существенный вклад в приборную составляющую межзонного разброса поляризационных углов вносят неточности в характеристиках фазовой пластины компенсатора. В настоящее время в работах разных авторов проявляется существенная неоднозначность в подходе к описанию свойств этого сверхчувствительного оптического элемента. В связи с этим возникает необходимость в дальнейшем развитии теории прибора.

Недиагональные комплексные элементы  $\rho_1$  и  $\rho_2$  матрицы Джонса оптически активного фазового компенсатора (в приборах обычно используется оптически активный кварцевый компенсатор), несмотря на их малость, играют очень большую роль в зонных соотношениях, определяющих экспериментальные  $\Psi$  и  $\Delta$ . Существующая методика позволяет находить  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , как и основной фазовый параметр  $\rho$ , с помощью инвариантов эллипсометрии. Однако поверхность реальных образцов, по измерениям на которых строятся инварианты, должна быть очень однородной. Только в этом случае можно достаточно точно определить малые параметры  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . В такой постановке эта задача трудно реализуема. Именно в связи с этим и была предложена новая методика определения 3 комплексных параметров фазового компенсатора. В этой методике малые  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , отвечающие одному из способов оптической юстировки прибора, определенными соотношениями связываются с основным фазовым параметром  $\rho$ . Коэффициенты из этих соотношений зависят от оптической активности одноосной или двуосной кристаллической пластины фазового компенсатора и находятся в процессе оптической юстировки прибора,

не связанной с измерениями на конкретных реальных образцах. Что касается основного фазового параметра  $\rho$ , то его можно достаточно легко найти с помощью тех же инвариантов. Соответствующая обратная задача в этом случае включает в себя всего лишь 2 вещественных неизвестных параметра (вместо 6 в старой методике). Роль экспериментальных ошибок при таком подходе резко уменьшается. Данный подход позволяет существенно повысить точность экспериментальных измерений на эллипсометре, что важно для всех ситуаций, но особая необходимость в сверхточном определении параметров фазового компенсатора возникает при исследовании методом "нулевой" эллипсометрии неоднородной поверхности, а также эффектов поверхностной анизотропии. Практическая реализация нового подхода выдвигает определенные требования и к самому прибору, например необходимость использования термоустойчивого компенсатора.

Близок к завершению и другой, еще более общий подход к описанию фазового компенсатора, в рамках которого ось светового пучка, ось узла компенсатора прибора и нормаль к пластине компенсатора ориентированы произвольно друг относительно друга.

Можно утверждать, что оба подхода к описанию фазового компенсатора создают гораздо более надежную базу для создания прецизионного "нулевого" прибора, предназначенного как для метрологических целей, так и для проведения научных исследований.

#### **4. РЕАЛИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К "НУЛЕВОМУ" ЭЛЛИПСОМЕТРУ. СОЗДАНИЕ ФАЗОВОГО КОМПЕНСАТОРА НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛА САПФИРА**

При выполнении соответствующих условий приборная составляющая межзонного разброса может быть сведена к такому минимуму, при котором практически весь межзонный разброс будет определяться неоднородностью (в частности, шероховатостью) исследуемой поверхности. В связи с такой возможностью, рассмотрим основные технические требования к "нулевому" эллипсометру.

А. Разработка нового фазового компенсатора, параметры которого (их значения) обладают температурной устойчивостью. Весьма нежелательна и оптическая активность такого компенсатора. В связи с этим очень важной становится задача по созданию фазового компенсатора на основе монокристалла сапфира. Сапфир по твердости уступает лишь алмазу, у него очень высокая теплопроводность, он не обладает оптической активностью и, наконец, толщина пластины сапфира может быть

доведена до 0.15–0.20 мм. Все это и указывает на возможность создания фазового компенсатора с необходимыми свойствами на основе сапфира.

Б. Создание методики прецизионного эллипсометрического определения значений параметров фазового компенсатора.

В. Модернизация узла фазового компенсатора, обеспечивающая контролируемое управление пространственной ориентацией пластины компенсатора.

Г. Замена фотодетектора на более чувствительный, допускающий работу в режиме счета фотонов.

Д. Обеспечение большей световой герметизации прибора.

Е. Использование стабильного лазера на несколько длин волн.

При выполнении всех этих требований может быть создан прецизионный "нулевой" эллипсометр, который можно использовать как для метрологических целей, так и для проведения научных исследований.

#### **5. ПРОВЕДЕНИЕ ШИРОКОМАСШТАБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ЦЕЛЯХ ОПРОБОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ НОВОЙ МЕТРОЛОГИИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ**

Такой эксперимент может быть проведен и на обычном серийном эллипсометре (например, на приборе ЛЭФ-3М-1 Феодосийского приборостроительного завода). Требуется только, чтобы фазовый компенсатор прибора был термоустойчивым. При этом огромное значение имеет точность определения параметров такого компенсатора. Необходим также набор образцов, мало влияющих на величину межзонного разброса поляризационных углов. И все же конечной целью является создание "нулевого" метрологического эллипсометра в соответствии с техническими требованиями, изложенными в разделе 4.

#### **6. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ РЕАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ**

Используя зависимость межзонного разброса поляризационных углов от неоднородности отражающей поверхности, можно разработать новые эллипсометрические подходы к исследованию реальной поверхности.

Мы рассмотрели отражающую систему, для которой поляризационные углы  $\Psi$  и  $\Delta$  являются функцией точки на отражающей поверхности,

и получили соотношения, определяющие зависимость эффективных значений поляризационных углов от характера неоднородности поверхности и номера измерительной зоны. Изучение межзонного разброса поляризационных углов позволило сделать важные выводы относительно возможности установления характера неоднородности отражающей поверхности по межзонному разбросу.

### **7. ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ "НУЛЕВОГО" ПОДХОДА АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОВЕРХНОСТНОЙ АНИЗОТРОПИИ**

Эллипсометрия позволяет успешно исследовать анизотропию материалов и поверхностную анизотропию. В этом случае приходится иметь дело с тонкими эффектами, на которые накладывается эффективная анизотропия, обусловленная неоднородностью поверхности. Прибор с фотометрической схемой не позволяет в явной форме провести разделение истинной и эффективной анизотропии. Но это можно сделать, используя "нулевую" эллипсометрию [4, 5]. "Нулевая" эллипсометрия к тому же существенно снижает и экспериментальные ошибки в измерении поляризационных углов, что крайне важно при исследовании эффектов анизотропии. Наконец, принципиальное значение имеет и то, что в рамках единого "нулевого" подхода объединяются исследования как изотропных, так и анизотропных материалов. В этом случае только по нарушению известных простых соотношений, которым удовлетворяют положения гашения оптических элементов при исследовании изотропных сред, можно судить о наличии и выраженности анизотропии. Для "нулевой" эллипсометрии анизотропных сред точное определение параметров фазового компенсатора, их термостойчивость приобретают особое значение. Кроме того, очень нежелательна при исследовании анизотропии оптическая активность компенсатора. В связи с этим очень важной становится задача по созданию фазового компенсатора на основе монокристалла сапфира.

### **8. СОЗДАНИЕ ПАКЕТА МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР. РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИ НЕКОРРЕКТНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ ДЛЯ СВЕРХТОНКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК И НАРУШЕННЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В самое последнее время мы обнаружили и проанализировали новые возможности многоуг-

ловой эллипсометрии по исследованию нарушенных слоев на поверхности прозрачных материалов. Был сформулирован и разработан новый эллипсометрический подход, позволяющий успешно исследовать толстые (порядка десятков микрометров) нарушенные слои. Благодаря этому подходу проявились новые и неожиданные свойства нарушенных слоев, в частности на таких прозрачных материалах, как сапфир, оптические стекла и полимеры. Особенно впечатляющими оказались результаты по нарушенным слоям на монокристаллах сапфира, мало отличающегося по твердости от алмаза. Стало ясно, что контроль параметров нарушенных поверхностных слоев надо проводить по совершенно новой методике, учитывающей большие толщины этих слоев.

На основе оригинальных теоретических результатов нами создана математическая программа, позволяющая по заложенным в нее сложным моделям определять параметры нарушенных слоев любой толщины (порядка нескольких десятков микрометров) на поверхности прозрачных материалов. Если учесть имеющую место периодичность поляризационных углов  $\Psi$  и  $\Delta$  по толщине прозрачной пленки и математическую некорректность обратной задачи, обусловленную относительно слабым различием по показателю преломления объема (массива) и нарушенного слоя, то станет ясно, какие трудности пришлось преодолеть на пути решения данной задачи. Такой же подход, как выяснилось, можно использовать и для нарушенных слоев на поглощающих материалах. Большой интерес представляет исследование нарушенных слоев на поверхности кремния. Это связано с большим влиянием нарушенных слоев на процессы эпитаксии.

### **9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР (СВЕРХТОНКИЕ ПЛЕНКИ, ПЕРЕХОДНЫЕ СЛОИ, НАРУШЕННЫЕ СЛОИ), СВЯЗАННЫЕ С НЕОБХОДИМОСТЬЮ ПЕРЕХОДА К НОВЫМ МЕТОДАМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

Проведен эксперимент, связанный с исследованием нарушенных поверхностных слоев на сапфире, полистироле и оптических стеклах. Полученные результаты являются совершенно новыми и имеют принципиальное значение (см. раздел 8). Планируется такой же эксперимент на образцах ситала и кремния. В случае кремния будет исследоваться не только нарушенный слой, но также и сверхтонкая естественная окисная пленка  $\text{SiO}_2$  на поверхности кремния.

#### 10. РАЗРАБОТКА ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ БАЗОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ С УЧЕТОМ НАРУШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

Спектральная эллипсометрия обладает большими возможностями, однако ее уязвимым местом является необходимость предварительного знания, причем с достаточно большой точностью, дисперсии оптических постоянных базовых материалов, составляющих поверхностные структуры. Определение дисперсии оптических постоянных с достаточной точностью — это очень трудная задача, особенно для поглощающих материалов. Здесь можно ожидать очень крупных отклонений от истинных значений, обусловленных игнорированием реальной поверхностной структуры. Нарушенные поверхностные слои относительно слабо отличаются от объема по оптическим постоянным, но, как правило, характеризуются большой толщиной (до десятков микрометров), поэтому их учет является обязательным при определении оптических постоянных различных материалов.

Но даже при точном знании дисперсии возникают трудности, связанные с наличием нарушенных поверхностных слоев, особенно на подложке. Подложка с нарушенным поверхностным слоем имеет некоторые эффективные оптические постоянные, которые могут заметно отличаться от их значений для данного материала, а в этом случае нарушается процесс контроля параметров поверхностных структур. Особенно сильно сказывается неучтенный нарушенный слой на параметрах сверхтонких (10–100 ангстрем) пленок. Надо считать и с тем, что в процессах эпитаксиального осаждения материалов на подложки нарушенный слой играет отрицательную роль, поэтому контроль его параметров является обязательным.

Таким образом, определение дисперсии оптических постоянных различных материалов с учетом нарушенных слоев, а также обязательный контроль параметров нарушенных слоев на подложках при создании поверхностных структур представляют собой весьма актуальную задачу спектральной эллипсометрии, которую целесообразно решать, используя опять-таки "нулевую" эллипсометрию.

#### 11. РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЫ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ В СЕБЯ СЛОЙ В ВИДЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ

В основе рассматриваемой обратной задачи эл-

липсометрии лежит теория отражения электромагнитной волны от многослойной среды, включающей в себя слой в виде дифракционной решетки. Была разработана новая версия такой теории, в полной мере учитывающая особенности классической эллипсометрии. В основе данной теории лежит метод Фурье. Для обработки результатов эллипсометрических измерений в целях определения параметров многослойной отражающей системы, включающей в себя дифракционный слой, разработана математическая программа.

В основе обратной задачи по определению параметров отдельных слоев многослойной структуры, включая дифракционный слой, лежит прямая задача, связанная с теоретическим расчетом значений поляризационных углов. Для прямой задачи необходимо иметь в явном виде основное уравнение эллипсометрии для конкретной отражающей многослойной структуры

$$\operatorname{tg}\Psi \exp(i\Delta) = R_p/R_s,$$

где  $R_p$  и  $R_s$  — это комплексные амплитудные коэффициенты отражения Френеля для р- и s-волн.

Для нахождения  $R_p$  и  $R_s$  используется матричный метод. В рамках этого метода каждому слою отвечает матрица, связывающая столбец (вектор) из тангенциальных составляющих  $E$  и  $H$  на одной границе слоя со столбцом на другой. Для s-волны это одна, а для р-волны — другая матрица. Матрицы, отвечающие однородным слоям, хорошо известны. Что касается дифракционного слоя, то матрицы этого слоя в разрабатываемой математической программе рассчитываются по соответствующему алгоритму, а это и есть основная задача программы. Данная математическая программа в целом построена, получены и проанализированы первые результаты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов А.И. К теории измерительных зон эллипсометра // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 45, № 1. С. 199–201.
2. Семенов А.И., Бобро В.В. О метрологическом обеспечении эллипсометрии (общий подход) // Автометрия. 1997. № 1. С. 43–49.
3. Semenenko A.I., Bobro V.V., Mardezhov A.S., Semenenko E.M. A new metrological criterion in ellipsometry // Proc. SPIE. 1998. V. 3485. P. 336–342.
4. Семенов А.И., Миронов Ф.С. Эллипсометрия анизотропных сред // Физика твердого тела. 1976. Т. 18, № 11. С. 3511–3514.
5. Ржанов А.В., Свитаев К.К., Семенов А.И. и др. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с.

6. Бобро В.В., Дронь О.С., Комяк Н.И., Семененко А.И. Эллипсометр, сочетающий в себе "нулевой" и фотометрический подходы // Научное приборостроение. 2000. № 2. С. 59–62.

*Институт прикладной физики НАН Украины,  
г. Сумы*

Материал поступил в редакцию 21.02.2005.

**ON THE NEW POTENTIALS OF ELLIPSOMETRY ARISING  
FROM THE NULL OPTICAL CIRCUIT.  
ELLIPSOMETRY OF REAL SURFACE STRUCTURES.  
I. GENERAL DESCRIPTION OF MAIN LINES OF RESEARCH**

**A. I. Semenko**

*Institute of Applied Physics NAS, Ukraine, Sumy*

This paper, which starts a series of papers, gives a general description of main lines of research directly related to the new capabilities of "null" ellipsometry, metrology of ellipsometry, and real surface structure.