

Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. А. МАКАРА, к. ф.-м. н. В. А. ОДАРИЧ,
к. ф.-м. н. Т. Ю. КЕПИЧ, к. т. н. Т. Д. ПРЕОБРАЖЕНСКАЯ,
к. ф.-м. н. О. В. РУДЕНКО

Украина, г. Киев, УНЦ «Физико-химическое материаловедение»
КНУ им. Тараса Шевченко
E-mail: wladodarych@narod.ru

Дата поступления в редакцию
17.02 2009 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. В. СОПИНСКИЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ПРИБОР И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И СТЕПЕНИ ОДНОРОДНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

Разработана блок-схема, изготовлен макет прибора и создан пакет автоматизированных программ для измерения показателя преломления и контроля толщины пленок в процессе изготовления пленочных структур.

Создание элементов микро- и оптоэлектроники идет путем модификации поверхности полупроводников, включая точечное легирование чужеродными атомами, нанесение тонких пленок разными методами и тому подобное. При этом модификационные изменения происходят в тонких слоях, толщина которых может составлять от единиц до сотен нанометров или даже нескольких микрометров.

Для поиска оптимальных технологических условий нанесения пленок, обработки поверхности монокристаллов и т. п. необходимо иметь удобные, надежные и высокоточные бесконтактные и неразрушающие методы контроля технологических процессов на разных его этапах, а также параметров полученных структур (пленок, активных слоев и тому подобное).

Для определения параметров строения вещества, в частности параметров пленок на его поверхности, самыми перспективными являются методы отражательной спектроскопии, поскольку отраженная световая волна формируется в тонкой приповерхностной области. Существуют эллипсометрические приборы, которые предназначены для измерения поляризационных характеристик отраженной волны, чаще всего на одной фиксированной длине. Однако не существует универсального метода, который позволил бы по измеренным значениям поляризационных характеристик определить, в частности, оптические постоянные и толщину пленки. Выбор метода зависит от исследуемого объекта.

Целью данной работы являлась разработка блок-схемы, создание экспериментального образца прибора и усовершенствование методов измерения толщины, показателя преломления и однородности тонких пленочных структур, используемых в микроэлектронике и других приборостроительных отраслях.

Блок-схема и описание работы прибора

Измеряемыми величинами в эллипсометрии являются поляризационные характеристики (эллипсометрические параметры) световой волны, которые опре-

деляют форму эллипса колебаний электрического вектора световой волны.

Эллипсометрическими параметрами (эллипсометрическими углами) называют разность фаз Δ между компонентой E_s электрического вектора, перпендикулярной плоскости падения световой волны, и компонентой E_p , параллельной этой плоскости, и $\text{tg}\Psi$, значение которого равно отношению коэффициентов отражения в p - и s -плоскостях.

Наиболее пригодным для эллипсометрических измерений является фотометрический эллипсометр, который, в отличие от существующих компенсационных эллипсометров, не нуждается в компенсаторе, имеет меньшее время измерения. Это создает возможность измерения на волнах любой длины, позволяет приспособить его к процессу автоматизации и контроля.

Принцип работы эллипсометра основан на фотоэлектрическом методе Битти [1, 2].

Суть метода заключается в том, что линейно поляризованный световой пучок падает на зеркальную поверхность исследуемого объекта под произвольным углом, причем азимут поляризатора (угол между электрическим вектором световой волны и плоскостью падения луча) равен 45° . Эллиптическую поляризацию отраженного света анализируют с помощью линейного поляризатора, который последовательно устанавливают по азимутам 0 , 45 и 90° , измеряя соответствующую интенсивность отраженного света I_0 , I_{45} , I_{90} . Искомые эллипсометрические параметры вычисляют по формулам

$$\text{tg}\Psi = \sqrt{\frac{I_0}{I_{90}}}, \quad (1)$$

$$\cos\Delta = \frac{2I_{45} - I_0 - I_{90}}{2\sqrt{I_0 I_{90}}}. \quad (2)$$

Схема такого прибора приведена на **рис. 1**.

Источником света в нем является газоразрядная ртутная лампа с линейчатым спектром излучения, соединенная со стабилизированным источником питания I .

Поляризационное устройство 2 (призма Глана с воздушным промежутком) придает световой волне линейную поляризацию. Оно помещено в оправу, снабженную устройством поворота 3 поляризатора

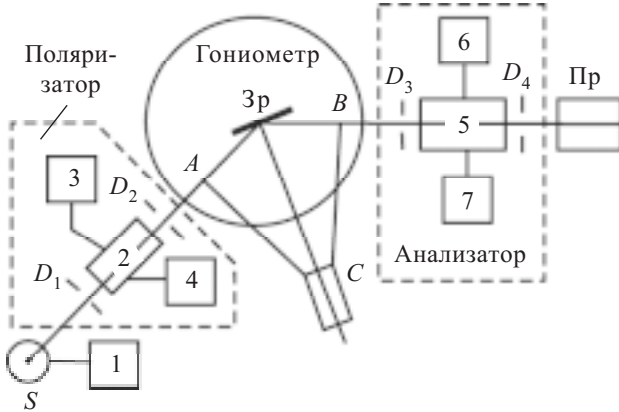


Рис. 1. Блок-схема фотометрического эллипсометра: *S* — источник света; 1 — стабилизированный источник питания; 2, 5 — поляризационное устройство; 3, 6 — устройство поворота; 4, 7 — механизм юстировки; D_1 — D_4 — ограничительные диафрагмы; Z_p — столик для образца; C — муфта; AC , BC — штанги гониометра; Pr — приемник световой энергии

вокруг направления распространения светового пучка и измерения азимута ψ_p , и механизмом юстировки 4 поляризатора.

Блок анализатора поляризации отраженной световой волны также содержит призму Глана 5, устройство поворота 6 и механизм юстировки 7 поляризатора.

Гониометр представляет собой механизм измерения угла падения с угловыми делениями до $0,5'$ с двумя плечами, на которых монтируются блоки поляризатора и анализатора, источник света, коллимационная система. На оси гониометра устанавливается столик Z_p с платформой для образца, снабженный механизмом поворота образца в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также механизмом поступательного перемещения платформы перпендикулярно ее поверхности.

Механизм изменения угла падения имеет две штанги одинаковой длины (AC и BC), закрепленные одним концом в точках A и B на плечах гониометра на одинаковых расстояниях от его центра. Вторым концом штанги прикреплены к муфте C , которая может свободно перемещаться вдоль штанги Z_pC , установленной по биссектрисе угла между плечами. Конец Z_p жестко прикреплен к столику для образца, а конец C — свободный.

На плечах гониометра устанавливается система ограничительных диафрагм D_1, \dots, D_4 , образующая коллиматор светового пучка.

Приемник световой энергии содержит электронный усилитель со стабилизированным источником питания. Спектральная чувствительность приемного элемента соответствует спектру излучения примененного источника света.

С целью повышения точности определения эллипсометрических параметров авторы некоторым образом усовершенствовали метод Битти. В частности, предлагается последовательно устанавливать азимуты анализатора $\psi_a = 0, 45, -45$ и 90° , а также эквивалентные им азимуты $\psi_a + 180^\circ$, измерить соответствующие

интенсивности, усреднить их значения и вычислить эллипсометрические параметры по (1) и (2). Значение $\cos \Delta$ определяют также по формуле

$$\cos \Delta = \frac{I_{45} - I_{-45}}{2\sqrt{I_0 I_{90}}}, \quad (3)$$

а разность фаз Δ находят как среднее арифметическое от найденных из выражений (2) и (3).

При исследовании и контроле поверхностной структуры эллипсометрические параметры следует измерять вблизи главного угла падения (при котором, по определению, $\cos \Delta = 0$), где они наиболее чувствительны к особенностям строения отражательной системы. Поиск главного угла удобно выполнять с помощью параллелограммного механизма, который позволяет изменять угол падения вращением плеча с источником света, оставляя при этом неизменным ход отраженного луча. При различных значениях угла падения измеряют интенсивности I_{45} и I_{-45} , пока не выполнится условие $I_{45} = I_{-45}$, согласно (3).

Исследовать пленочные структуры полупроводниковых и диэлектрических материалов таким способом невозможно, т. к. $\text{tg} \psi$ для них имеет величину, меньшую чувствительности прибора. Ситуацию можно исправить, если измерения проводить при азимуте поляризатора не 45° , как в традиционной схеме Битти, а при меньшем, так, чтобы увеличить p -компоненту электрического вектора.

В наших работах [3—5] были проанализированы погрешности метода Битти и найдены оптимальные азимуты поляризатора, значения которых зависят от измеряемой величины параметра $\text{tg} \psi$, т. е. от исследуемого объекта. В частности, значение оптимального азимута поляризатора $\text{tg} \psi_p$ лежит в пределах $(1-5)\text{tg} \psi$.

Перед измерениями прибор должен быть отъюстирован согласно [3].

Связь эллипсометрических параметров с параметрами системы

В основе работы предлагаемого прибора лежит теория взаимодействия электромагнитной волны с веществом. Эллипсометрические параметры связаны с параметрами отражающей системы через основное уравнение эллипсометрии [6, с. 43]

$$\text{tg} \psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}; \quad (4)$$

где $\Delta = \delta_p - \delta_s$;
 $\text{tg} \psi = |R_p / R_s|$;
 R_p и R_s — коэффициенты отражения системы в p - и s -плоскостях образца;
 i — мнимая единица.

Комплексные коэффициенты отражения R_p и R_s определяются строением отражающей системы и являются функциями оптических постоянных сред, из которых она состоит, толщины слоев, угла падения и длины волны света, геометрии границы раздела и т. п.

Рассмотрим двухслойную систему, поскольку такие пленочные структуры широко распространены в микро- и оптоэлектронике.

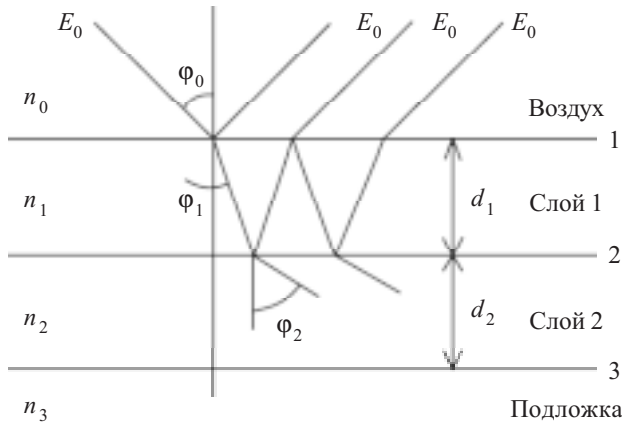


Рис. 2. Ход лучей в двухслойной системе

На рис. 2 показана схема отражения световой волны от двухслойной системы.

Уравнение эллипсометрии для двухслойной системы имеет вид [5—8]

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi \cdot e^{i \Delta} &= \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i \delta_1} + r_{1p} r_{2p} r_{3p} e^{-i \delta_2} + r_{3p} e^{-i(\delta_1 + \delta_2)}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i \delta_1} + r_{2p} r_{3p} e^{-i \delta_2} + r_{1p} r_{3p} e^{-i(\delta_1 + \delta_2)}} \times \\ &\times \frac{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i \delta_1} + r_{2s} r_{3s} e^{-i \delta_2} + r_{1s} r_{3s} e^{-i(\delta_1 + \delta_2)}}{r_{1s} + r_{2s} e^{-i \delta_1} + r_{1s} r_{2s} r_{3s} e^{-i \delta_2} + r_{3s} e^{-i(\delta_1 + \delta_2)}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь r_1, r_2 и r_3 — коэффициенты Френеля отражения на поверхностях 1, 2 и 3 (см. рис. 2), которые можно вычислить по формулам

$$r_{1p} = \frac{n_1 \cos \varphi_0 - n_0 \cos \varphi_1}{n_1 \cos \varphi_0 + n_0 \cos \varphi_1}; \quad r_{1s} = \frac{n_0 \cos \varphi_0 - n_1 \cos \varphi_1}{n_0 \cos \varphi_0 + n_1 \cos \varphi_1}; \quad (6)$$

$$r_{2p} = \frac{n_2 \cos \varphi_1 - n_1 \cos \varphi_2}{n_2 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_2}; \quad r_{2s} = \frac{n_1 \cos \varphi_1 - n_2 \cos \varphi_2}{n_1 \cos \varphi_1 + n_2 \cos \varphi_2}; \quad (7)$$

$$r_{3p} = \frac{n_3 \cos \varphi_2 - n_2 \cos \varphi_3}{n_3 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_3}; \quad r_{3s} = \frac{n_2 \cos \varphi_2 - n_3 \cos \varphi_3}{n_3 \cos \varphi_2 + n_3 \cos \varphi_3}, \quad (8)$$

а разности фаз δ_1 и δ_2 , которые образуются в первом и втором слоях, вычисляют по формулам

$$\delta_1 = \frac{4\pi d_1}{\lambda} n_1 \cos \varphi_1; \quad \delta_2 = \frac{4\pi d_2}{\lambda} n_2 \cos \varphi_2, \quad (9)$$

где n_0, \dots, n_2 — оптические постоянные соответствующего слоя; λ — длина волны падающего излучения.

При интерпретации эллипсометрических данных приходится решать как прямую задачу эллипсометрии, когда по известным характеристикам отражательной системы вычисляют эллипсометрические параметры отраженной световой волны, так и обратную, когда по измеренным значениям поляризационных характеристик отраженной волны находят параметры исследуемой системы.

Метод диаграмм для определения параметров пленки

Впервые такой метод был использован в [9] для анализа системы «прозрачный слой — поглощающая подложка» на примере монокристаллического крем-

ния с оксидной пленкой на нем. Вычисления эллипсометрических параметров проводят для фиксированного угла падения по уравнениям (5)—(8), варьируя одну из характеристик системы (например толщину слоя или его показатель преломления и пр.) при фиксированных значениях остальных. Полученные значения откладывают на номограмме, которая в итоге будет представлять собой семейство кривых, каждой из которых соответствуют определенные характеристики системы при изменяющейся одной из них.

В качестве декартовых координат можно использовать любые эллипсометрические параметры, которые можно измерить. Например, в фотометрической эллипсометрии, где измеряют $\cos \Delta$ и $\operatorname{tg} \psi$, именно эти величины используют для построения декартовых диаграмм.

В эллипсометрии пленок, когда определяемыми характеристиками системы являются оптические постоянные и толщина пленки, на такой номограмме удобно приводить кривые, которые получены при варьировании толщины пленки и неизменных оптических характеристиках. Ортогональными к ним являются кривые, полученные при варьировании оптических характеристик при постоянной толщине.

Пример таких номограмм приведен на рис. 3. Здесь видно, что все кривые начинаются из общей точки, которой соответствует нулевая толщина пленки и значения оптических постоянных подложки, свободной от пленки (точка 0). Плотность кривых вблизи начальной точки высокая, поэтому точность определения параметров пленки здесь меньше, чем вдали от нее.

Согласно уравнению эллипсометрии (4), которое содержит мнимые экспоненты с показателями (9), эллипсометрические параметры $\cos \Delta$ и $\operatorname{tg} \psi$ являются периодическими функциями толщины. В случае прозрачных пленок при значениях толщины больше половины периода эллипсометрические парамет-

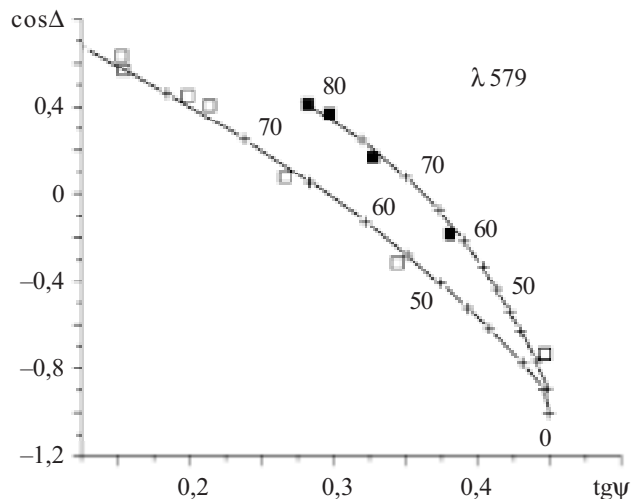


Рис. 3. Эллипсометрические параметры $\cos \Delta$ и $\operatorname{tg} \psi$ пленки CdTe, вычисленные при угле падения $\varphi=60^\circ$ для $n_1=2,015, k_1=0,39$ (верхняя кривая) и $n_1=2,2, k_1=0,35$ (нижняя кривая). (На расчетных кривых приведены значения толщины пленки в нм)

■, □ — экспериментальные данные

ры будут ложиться на кривую, полученную для первого полупериода, возвращаясь в начальную точку через полный период.

На рис. 3 представлены также экспериментальные результаты, полученные на разных участках пленки. Сопоставление их с расчетными кривыми позволяет судить о толщине пленки на этих участках.

В некоторых эллипсометрических методах, в том числе фотометрических, измеряемыми величинами являются другие параметры, например главный угол Φ (угол падения, при котором $\cos\Delta=0$) и эллиптичность (значение $\text{tg}\psi$ при главном угле). В этом случае экспериментальные данные представляют на номограммах, где по осям откладывают значение главного угла и эллиптичности. Эллипсометрическая функция вблизи главного угла наиболее чувствительна к деталям строения отражательной системы. Кроме того, при определении главного угла в процессе обработки данных происходит усреднение эллипсометрических параметров, поэтому точность их определения увеличивается.

Пример таких номограмм, вычисленных для системы «прозрачная пленка — оптическое стекло К8» приведен на рис. 4.

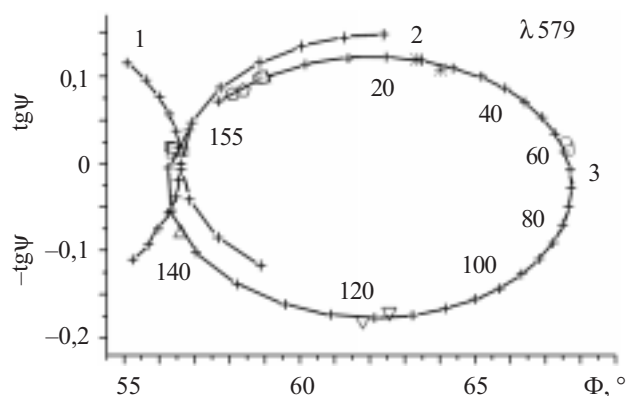


Рис. 4. Эллипсометрические параметры $\text{tg}\psi$ и Φ пленки HfO_2 , вычисленные для однослойной (1 и 2) и двухслойной (3) моделей. Параметры расчета: 1 — $n_1=1,3$; 2 — $n_1=2,0$; 3 — $n_1=1,825$, $d_1=15$ нм, $n_2=2,0$ (На кривой 3 показана толщина внутреннего слоя d_2 в нм) Символы — экспериментальные данные.

Каждая кривая постоянного значения показателя преломления (ППП) начинается от угла Брюстера подложки, которому соответствует нулевое значение толщины пленки. С ростом толщины кривая ППП разворачивается либо вправо от угла Брюстера, в сторону больших углов, либо влево от него, в сторону меньших углов, в зависимости от соотношения между значениями показателей преломления пленки n_1 и подложки n_2 . Так, для пленок, оптически более плотных, чем подложка ($n_1 > n_2$), значения главного угла превышают угол Брюстера, в то время как для оптически менее плотных пленок главные углы уменьшаются, по сравнению с углом Брюстера. Вследствие периодической зависимости эллипсометрических параметров от толщины пленки, для прозрачных пленок во втором полупериоде изменения толщины значения параметров будут ложиться на кривую ППП пер-

вого полупериода, возвращаясь с ростом толщины в исходную точку (угол Брюстера) при толщине пленки, равной периоду.

Метод номограмм применяется для определения характеристик исследуемой системы, изменяющихся при воздействии на нее различных физических и технологических факторов в процессах, например адсорбции на поверхности металлов и диэлектриков, окисления, взаимодействия поверхности с агрессивными средами и пр. Нанося экспериментальные точки, полученные в процессе эллипсометрических измерений, на предварительно построенную номограмму, можно наблюдать за характером изменений, которые происходят в системе. Достаточно густая сетка кривых обеспечивает также определение соответствующих параметров системы.

Нахождение главного угла и эллиптичности

При вычислении номограммы возникает задача нахождения главного угла из уравнения эллипсометрии, т. е. необходимо решить прямую задачу эллипсометрии относительно Φ и $\text{tg}\psi$.

Алгоритм, согласно которому была создана автоматизированная программа определения главного угла, приведен в [10].

По определению, главный угол — это такой угол падения луча, при котором разность фаз Δ равна -90° . Задача его поиска сводится к нахождению корня уравнения

$$F(\phi) = \cos \Delta = \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0. \quad (10)$$

Здесь X и Y — соответственно действительная и мнимая части уравнения эллипсометрии (4), а именно $X = \text{tg}\psi \cos \Delta$, $Y = \text{tg}\psi \sin \Delta$.

Так как X и Y — действительные числа, а Δ изменяется от $-\pi$ до 0 в пределах углов падения $0-90^\circ$, корень уравнения (10) всегда существует и находит его методом деления отрезка пополам.

Действительная и мнимая части уравнения эллипсометрии зависят от параметров системы, например, в случае двухслойной системы они заданы уравнениями (5)–(9).

Итерационный метод определения двух параметров системы

После выполнения эллипсометрических измерений необходимо решить обратную задачу эллипсометрии — по измеренным параметрам вычислить характеристики системы.

Уравнение эллипсометрии в большинстве случаев является нелинейным и трансцендентным относительно параметров отражательной системы, и в общем случае не существует аналитических выражений, которые связывали бы характеристики системы с измеренными значениями эллипсометрических параметров. Поэтому приходится использовать методы вычислительной математики.

В [11, 12] изложен алгоритм нахождения показателя преломления и толщины пленки на подложке с известными оптическими постоянными, основанный

на итерационном методе Ньютона решения системы двух уравнений. Мы расширили этот метод для автоматизированного нахождения любых двух неизвестных параметров отражательной системы по результатам измерения эллипсометрических параметров. Изложим общую схему работы соответствующей программы.

Обозначим действительную и мнимую части уравнения эллипсометрии (4) однослойной системы соответственно X и Y , тогда искомые эллипсометрические параметры будут иметь вид

$$Z = \operatorname{tg}\psi = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad U = \cos \Delta = X / Z, \quad (11)$$

где X и Y вычисляются через оптические постоянные системы и толщину слоя по (6)–(8).

Измеренные значения эллипсометрических параметров обозначим как $T = \operatorname{tg}\psi$ и $C = \cos \Delta$, а параметры, которые необходимо определить, обозначим как a и b .

Тогда решению относительно a и b подлежит система

$$\begin{cases} T - Z(a, b) = 0, \\ C - U(a, b) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Разложив функции Z и U в ряд Тейлора, эту систему, которая является нелинейной и трансцендентной относительно a и b , в итерационном методе Ньютона представляют в виде

$$\begin{cases} T - Z(a_0, b_0) = \frac{\partial Z}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial Z}{\partial b} \Delta b, \\ C - U(a_0, b_0) = \frac{\partial U}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial U}{\partial b} \Delta b, \end{cases} \quad (13)$$

где a_0 и b_0 — приближенные значения корней системы (12); функции Z и U , а также их производные по определяемым параметрам, вычисляются по уравнению эллипсометрии для этого приближенного корня.

Теперь необходимо решить систему (13), которая содержит два линейных уравнения первого порядка относительно неизвестных поправок Δa и Δb к приближенным корням a_0 и b_0 . Эти поправки находят методом Крамера по определителю системы и определителям неизвестных, потом формируют следующее приближение согласно схеме

$$a_{i+1} = a_i + \Delta a, \quad b_{i+1} = b_i + \Delta b$$

и вычисляют новые значения поправок до тех пор, пока они не станут меньше заранее заданной малой величины, обусловленной погрешностью эксперимента.

Вычисление функций $Z(a_i, b_i)$ и $U(a_i, b_i)$, а также их производных, выполняет специальная подпрограмма, которая содержит уравнение эллипсометрии (5) вместе с коэффициентами Френеля (6)–(8) для обеих границ деления. Производные, которые входят в систему (13), вычисляются численным дифференцированием уравнения эллипсометрии.

Входными величинами являются оптические постоянные подложки, длина световой волны, угол падения, измеренные значения эллипсометрических параметров $\cos \Delta$ и $\operatorname{tg}\psi$, погрешности вычисления показателя преломления и толщины, которые ограничи-

вают необходимое количество итераций, величины дискретности показателя преломления и толщины, необходимые для численного дифференцирования, приближенные первичные значения параметров слоя.

Выходными величинами являются искомые параметры, конечные значения поправок Δa и Δb , количество итераций. Для контроля выводятся также конечные значения функций Z и U .

В качестве приближенных значений искомых параметров a_0 и b_0 берут их ожидаемые значения.

При нахождении толщины следует принимать во внимание то, что эллипсометрические параметры являются периодическими функциями толщины пленки с периодом

$$d_i = \frac{\lambda}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}}. \quad (14)$$

В качестве приближенной толщины d_0 избирают произвольное ее значение в пределах десятка нанометров, лежащее в первой половине первого периода. После итерирования программа выдает уточненную толщину d_{\min} , наименьшую из возможных. Тогда любое ее значение для данной пары $\cos \Delta$ и $\operatorname{tg}\psi$ укладываются в формулу

$$d_i = d_{\min} + m d_p, \quad \text{где } m = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

В связи с этим существует проблема однозначного определения толщины, если она больше нескольких периодов. Поэтому измерения следует проводить, как минимум, на двух спектральных линиях, длины волн которых значительно отличаются одна от другой [11, 12]. Тогда для каждой из них по формуле (15) можно вычислить ряды возможных значений толщины пленки и, сравнив их между собой, найти те, что совпадают друг с другом в пределах погрешности. Также истинное значение толщины можно найти, проведя измерения, по крайней мере, при двух углах падения, и вычислив, опять же, ряды возможных значений толщины для них. Однако первый метод более точен.

По изложенной выше схеме разработаны автоматизированные программы для определения: 1) эллипсометрических параметров двухслойной системы; 2) главного угла падения; 3) показателя преломления и толщины прозрачной пленки; 4) показателя преломления и показателя поглощения подложки; 5) показателя преломления и показателя поглощения пленки. Программы объединены в один пакет общей интерфейсной оболочкой, а выбор нужной осуществляется пользователем.

Наличие такого пакета программ позволяет разрабатывать методы определения более чем двух неизвестных параметров исследуемой системы.

Нахождение оптических постоянных и толщины поглощающих пленок

Авторами разработано несколько методов определения трех и четырех параметров отражательной системы. Продемонстрируем их суть на примере определения показателя преломления n_2 и показателя поглощения k_2 пленки, а также ее толщины на нескольких участках.

Метод может быть реализован для обчета данных, полученных для одной пленки на нескольких участках с неизвестной толщиной или для нескольких пленок неизвестной толщины, нанесенных на одинаковые подложки с известными значениями оптических постоянных — показателя преломления n_3 и показателя поглощения k_3 .

Метод включает в себя вычислительную и графическую процедуры и заключается в том, что по измеренной паре эллипсометрических параметров с помощью описанной выше итерационной программы находят оптические постоянные пленки n_2 и k_2 при нескольких значениях толщины, выбранных произвольно в окрестности ожидаемых значений. Потом полученные пары значений оптических постоянных наносят на диаграмму, где по вертикальной оси откладывают показатель преломления n_2 , а по горизонтальной — показатель поглощения k_2 . В результате получают для каждого участка определенную кривую, которая объединяет полученные точки и вдоль которой изменяется толщина пленки. Таких кривых окажется столько, сколько исследовано участков. Если оптические постоянные пленки одинаковы на всех участках, то ясно, что полученные кривые пересекутся в одной точке, которой будет соответствовать пара значений оптических постоянных, общих для всех кривых. Положение точки пересечения на каждой из кривых даст толщину пленки на соответствующих участках.

Для иллюстрации метода можно рассмотреть однослойную систему с такими же оптическими постоянными как и система «пленка теллурида кадмия на смешанных кристаллах CdHgTe» ($n_3=3,51$ $k_3=1,488$, $n_2=2,7$ $k_2=0,4$). Ее эллипсометрические параметры Φ и $\text{tg}\psi$ были вычислены для трех значений толщины: 60 (участок 1), 80 (участок 2) и 100 нм (участок 3). Полученные пары значений Φ и $\text{tg}\psi$ использовали вместо экспериментальных и при помощи автоматизированной программы, изложенной выше, находили оптические постоянные пленки n_2 и k_2 для определенного массива значений толщины, который содержал действительную толщину пленки. Например, для участка 1 толщиной 60 нм этот массив охватывал значения от 50 до 70 нм с шагом 2 нм.

На рис. 5 представлены результаты расчетов в виде трех толщинных кривых. Здесь видно, что кривые действительно пересекаются в одной точке, координаты которой совпадают с оптическими постоянными пленки n_2 и k_2 , заданными в начале вычислений, при выбранных значениях толщины участков.

Детальный анализ показал, что в некоторых случаях кривые возможных решений могут не пересекаться, а касаться друг друга в одной точке.

В некоторых случаях для определенной пары эллипсометрических параметров может существовать несколько возможных решений относительно оптических постоянных пленки.

Следовательно, проводя поиск решений с помощью автоматизированной программы, нужно, варьируя начальные значения оптических постоянных в определенных границах, пытаться выявить все возможные решения. Истинное решение отличается от

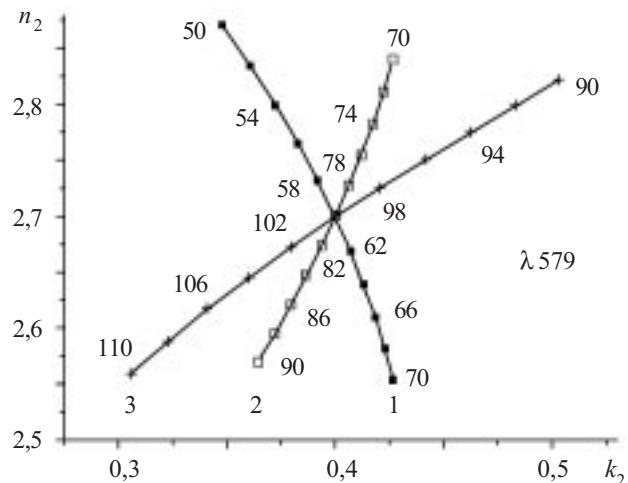


Рис. 5. Кривые возможных решений относительно оптических постоянных пленки, полученные для трех участков при варьировании ее толщины (числа возле засечек)

ложных тем, что толщинные кривые ложных решений расположены в разных участках номограммы и не имеют общей точки пересечения. В данном модельном эксперименте мы получали до трех решений на каждом из участков.

Наличие погрешности эксперимента приводит к тому, что толщинные кривые, полученные при автоматизированной обработке данных, смещены друг относительно друга и не пересекаются в одной точке на диаграмме определяемых величин, а сходятся в более или менее локальной области, в соответствии с допущенной погрешностью. В этом случае наилучшее решение для оптических постоянных исследуемой системы будет отвечать этой области схождения толщинных кривых.

На основе изложенного выше алгоритма были разработаны методы определения следующих параметров пленок: 1) показателя преломления и показателя поглощения и толщины пленки; 2) показателя преломления n_1 , n_2 и толщины d_1 и d_2 двухслойной пленки; 3) толщины пленки и показателей преломления волн различной длины. Эти методы могут использоваться для исследования однородности пленочных структур.

Исследование однородности пленочных структур

Однородность пленки по площади исследуют, измеряя эллипсометрические параметры на разных участках ее поверхности. По измеренным значениям эллипсометрических параметров с помощью описанных выше автоматизированных программ находят оптические константы и толщину пленки на каждом участке. Для иллюстрации данного метода приведем результаты исследования однородности двух образцов пленок CdTe, которые были получены методом «горячей стенки» на кремнии с помощью эпитаксиальной установки в вакууме $\approx 0,3$ мПа. Температура подложки составляла 50—80°C, толщина пленок зависела от времени осаждения.

Эллипсометрические измерения выполняли при фиксированном угле падения $\varphi=60^\circ$ на разных участ-

ках площади образцов. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Теоретические кривые для обеих пленок хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными на разных участках. Можно сделать вывод, что оптические постоянные обеих пленок не изменяются по площади — $n_1=2,2$, $k_1=0,35$ для одной, $n_1=2,015$, $k_1=0,39$ для другой, а толщина первой изменяется от 55 до 78 нм, второй — от 62 до 80 нм.

Прибор вместе с разработанными методами обработки экспериментальных результатов позволяет также выявить и исследовать неоднородность пленок по их толщине.

На рис. 4 показаны результаты эллипсометрических измерений, проведенных на диэлектрических пленках HfO_2 , нанесенных на оптическое стекло К8.

Пленки HfO_2 получены распылением материала электронным пучком на установке УВН-60 при давлении в камере 0,26 мПа. Температура подложки составляла 160°C, ток луча — 250 мА при ускоряющем напряжении 6 кВ.

Расположение точек на диаграмме измеренных величин в модели однородной пленки нельзя описать одним согласованным набором параметров. Другими словами, значения показателя преломления являются индивидуальными для каждого образца, и поэтому иногда полученные значения не соответствуют реальным.

Например, эллипсометрические параметры одного из образцов, отмеченные на рис. 4 квадратиками, ложатся на кривую 1, вычисленную для показателя преломления 1,3. Параметры другого образца, отмеченные треугольниками, не согласуются ни с кривой 1, ни с 2, а вычисления при использовании однослойной модели дали результат больше 3. В то же время известно, что показатель преломления кристаллической двуокиси гафния в массивном состоянии близок к 2,15. Все это свидетельствует о неадекватности модели однородной пленки к исследованным образцам.

Совокупность полученных для HfO_2 экспериментальных данных хорошо описывается моделью двухслойной пленки (кривая 3 на рис. 4). Такие результаты получены для следующих данных.

Пленка состоит из двух слоев — внешнего, с меньшим показателем преломления ($n_1=1,825$) и толщиной 15 нм, и внутреннего, оптически более плотного ($n_2=2,0$), толщина которого разная для разных образцов.

Такие результаты согласуются со столбиковой структурой пленок, полученных напылением электронным пучком. При этом внутренний слой отвечает собственно столбикам, а внешний — их вершинам, которые сужаются кверху. При такой структуре показатель преломления внешнего слоя должен быть меньше, чем внутреннего, ибо плотность упаковки столбиков вблизи поверхности меньше, чем в глубине пленки.

Выводы

Благодаря тому, что отраженная световая волна формируется в тонком приповерхностном слое исследуемого вещества, отражательный эллипсометри-

ческий метод имеет высокую чувствительность к особенностям строения и параметрам вещества в области формирования отраженной волны.

Эллипсометрический прибор контроля, построенный по усовершенствованной схеме метода Битти «поляризатор—образец—анализатор», может использоваться при исследованиях диэлектрических и полупроводниковых объектов. Для увеличения точности в таком приборе, в отличие от классического, поляризатор должен быть установлен под углом, меньшим 45°. Измерения должны выполняться при оптимальном угле падения и максимальном наборе азимутов анализатора 0, 45, 90, -45° и диаметрально противоположных им.

Для определения по измеренным эллипсометрическими параметрам показателя преломления и толщины пленок может быть применена автоматизированная программа, основанная на итерационном методе решения уравнения эллипсометрии, а для общего наблюдения за процессами, происходящими в пленке (пленках), может применяться наглядный метод диаграмм измеренных величин.

Проведенные исследования показали применимость прибора и методов расчета для исследования однородности пленок как по их площади, так и по толщине.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Beattie J. R., Conn G. K. T. Optical constants of metals in the infra-red. Principles of measurements // *Phil. Mag.*— 1955.— Vol. 46, N 373.— P. 222—234.
2. Beattie J. R. Optical constants of metals in the infra-red — experimental methods // *Phil. Mag.*— 1955.— Vol. 46, N 375.— P. 235—245.
3. Одарич В. А. Измерение малых величин эллипсометрических параметров фотоэлектрическим методом // *Заводская лаб.*— 1977.— Т. 43, № 9.— С. 1093—1095.
4. Одарич В. А. Применение метода Битти и Конна для измерения оптических постоянных n и k полупроводников в области собственного поглощения // *Ж. прикл. спектроскопии.*— 1970.— Т. 12, вып. 1.— С. 164—167.
5. Поперенко Л. В., Сташук В. С., Шайкевич І. А., Одарич В. А. Діагностика поверхні поляризованим світлом.— К.: ВПЦ Київський університет, 2007.
6. Горшков М. М. Эллипсометрия.— М.: Сов. радио, 1974.
7. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет.— М.: Мир, 1981.
8. Основы эллипсометрии / Под ред. А. В. Ржанова.— Новосибирск.: Наука, 1979.
9. Archer R. J. Determination of the properties of films on silicon by the method of ellipsometry // *J. Opt. Soc. Amer.*— 1962.— Vol. 52, N 9.— P. 970—977.
10. Одарич В. А., Москаленко Т. П., Ципенюк Р. С. Визначення параметрів відбивної системи методом еліпсометрії головного кута. Пряма задача еліпсометрії // *Вісник КУ. Фіз.-мат. науки.*— 1991.— Вып. 2.— С. 73—78.
11. Одарич В. А., Панасюк В. Й., Сташук В. С. Спектроэллипсометрические измерения показателя преломления и толщины слоев HfO_2 на оптическом стекле // *Ж. прикл. спектроскопии.*— 1992.— Т. 56, № 5—6.— С. 827—830.
12. Бятец М. А., Куц В. І., Одарич В. А., Панасюк В. Й. Еліпсометричні дослідження діелектричних шарів, напилених на кварцове скло // *Вісник КУ. Фіз.-мат. науки.*— 1992.— Вып. 7.— С. 7—12.