

Метод контроля оптических характеристик тонких прозрачных пленок с использованием угловой оптической рефлектометрии

© И.М. Алиев,² С.П. Зинченко,¹ А.П. Ковтун,¹ Г.Н. Толмачев,¹ А.В. Павленко^{1,2}

¹ Южный научный центр РАН,
344006 Ростов-на-Дону, Россия

² Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета,
344090 Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: kovtun.ap@mail.ru

(Поступило в Редакцию 28 ноября 2014 г.
В окончательной редакции 5 марта 2015 г.)

Предложен способ определения толщины и показателя преломления материала пленок на оптически однородной подложке, основанный на исследовании угловой зависимости интенсивности отраженного от пленки зондирующего излучения H -поляризации. Анализ показал, что в семействе кривых отражения для прозрачных пленок различной толщины, но с одинаковым показателем преломления существует угол, при котором они пересекаются в одной точке (вырождаются) и тангенс этого угла равен коэффициенту преломления материала пленки. Возможность применения данного метода демонстрируется на примере исследования серии пленок BSN/MgO(001).

В технологии напыления пленок различных функциональных материалов (диэлектрических, сегнетоэлектрических и пр.) практический интерес представляет система текущего контроля (in-situ) растущего оптически прозрачного слоя на некоторой (в общем случае многослойной) структуре. В работе [1] применительно к прозрачным пленкам демонстрируется высокая чувствительность кривых интенсивностей зеркального отражения зондирующего оптического излучения H -поляризации (в дальнейшем — кривых зеркального отражения) как к изменению оптических констант, так и к их толщине. В настоящее время заметные достижения в создании технических средств на базе оптической эллипсометрии применительно к in situ контролю полупроводниковых пленок (поглощающих) достигнуты в работе [2]. Однако для прозрачных пленочных структур метод эллипсометрии характеризуется резкой (скачкообразной) зависимостью эллипсометрических параметров. В настоящей работе предлагается метод, позволяющий использовать только одну длину волны зондирующего излучения H -поляризации для измерения не только коэффициента преломления материала пленок, но и их толщины.

Коэффициент зеркального отражения электромагнитной волны, $R(h)$, в рамках двухслойной модели определяется хорошо известной формулой (см., например, [3,4])

$$R(h) = |r(h)|^2 \equiv \left| \frac{r_{12} \exp(-2i\psi) + r_{23}}{\exp(-2i\psi) + r_{12}r_{23}} \right|^2. \quad (1)$$

В этой формуле r_{12} описывает амплитуду отражения света от границы раздела воздух (среда 1) — пленка (среда 2), r_{23} — амплитуду отражения волны от границы раздела пленка — подложка (среда 3). Толщина пленки h присутствует только в фазе ψ , которая от длины волны λ коэффициента преломления материала n_2 прозрачной

пленки и угла падения зондирующего излучения ϑ зависит известным образом:

$$\psi = 2\pi \frac{h}{\lambda} \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \vartheta}. \quad (2)$$

Для использования формул (1)–(2) требуется оптическая однородность по поверхности подложки (зависимость коэффициентов преломления и поглощения подложки определяется только одной координатой — z).

При интерпретации экспериментальных данных в рамках рассматриваемой модели важен факт, согласно которому амплитуда отражения r_{23} выражается через амплитуды $r_{13}(\vartheta)$ и $r_{12}(\vartheta)$. Из [3] эта амплитуда имеет вид

$$r_{23}(\vartheta) = \frac{r_{12}(\vartheta) - r_{13}(\vartheta)}{r_{12}(\vartheta)r_{13}(\vartheta) - 1}. \quad (3)$$

Исходя из (3) следует, что перед нанесением пленки на подложку необходимо проводить по кривым зеркального отражения исследование чистой подложки для установления функции $r_{13}(\vartheta)$. Амплитуду отражения от границы раздела 1–2 в формуле (3) запишем в обычном виде

$$r_{12}^{(H)}(\vartheta_2) = \frac{n_2^2 \cos \vartheta_2 - \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \vartheta_2}}{n_2^2 \cos \vartheta_2 + \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \vartheta_2}}. \quad (4)$$

Таким образом, с использованием формул (1)–(4) возможно проследить изменения амплитуды отражения $R(h)$ в зависимости от оптических параметров внешнего оптически однородного слоя — пленки в предположении, что оптические константы подложки в процессе напыления пленки остаются неизменными.

Хорошо известно, что восстановление коэффициента преломления n_2 из экспериментальной угловой зависимости зеркально отраженного излучения является задачей далеко неоднозначной. Для обоснованного выбора

решения в работе предлагается выбирать длину волны зондирующего излучения, которая соответствует окну прозрачности материала пленки.

Как и в работе [1], для решения задачи (1)–(4) нас будет интересовать случай *H*-поляризации (электрический вектор волны лежит в плоскости падения). Существенно, что в этом случае существует угол зеркального отражения ϑ_2 , при котором амплитуда отражения $r_{12}(\vartheta_2) = 0$ (явление Брюстера). Рассмотрим поведение амплитуды отражения $R(h)$ в окрестности угла Брюстера для границы раздела сред 1–2. Для прозрачного материала фаза ψ является величиной действительной. Из этого следует, что для семейства пленок, отличающихся только толщиной, коэффициент отражения при угле Брюстера границы раздела 1–2, описывается следующей формулой:

$$R(h) = |r(h)|^2 \equiv |r_{23} \exp(2i\psi)|^2 = |r_{23}|^2 \exp[-2\text{Im}(\psi)]. \quad (5)$$

Отсюда следует вывод, согласно которому в случае прозрачной пленки ($\text{Im}(\psi) = 0$) при угле ϑ_2 (угле Брюстера для границы раздела материал пленки–воздух) интенсивность зеркального отражения не зависит от толщины пленки. Следовательно, в семействе кривых отражений должна существовать точка вырождения по толщине пленки (кривые отражения должны пересекаться в одной точке). В дальнейшем этот угол будем называть углом вырождения, а точку пересечения кривых зеркального отражения — „узлом“. Существенно, что этот угол вырождения совпадает с углом Брюстера границы раздела 1–2 и тангенс угла вырождения равен коэффициенту преломления материала пленки. Таким образом, угол вырождения в серии кривых отражения дает в окне прозрачности материала строгое определение коэффициента преломления пленки: $n_2 = \text{tg } \vartheta_2$. Дей-

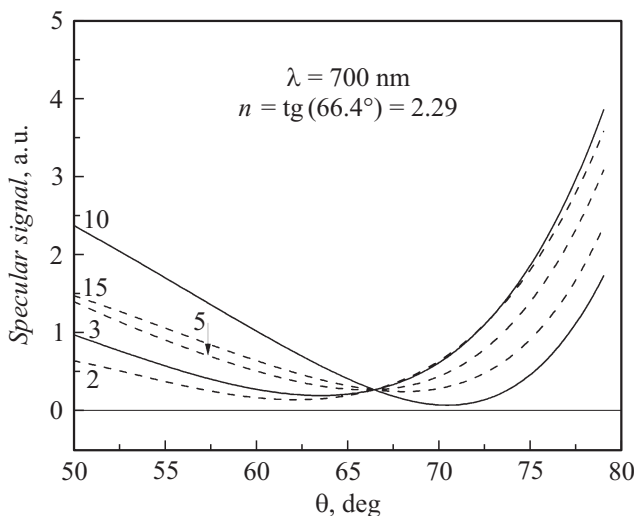


Рис. 1. Семейство кривых интенсивностей зеркального отражения излучения с длинами волн 700 нм от пленок BSN/MgO(001), полученных при различных временах напыления (цифры при кривых — время напыления в минутах).

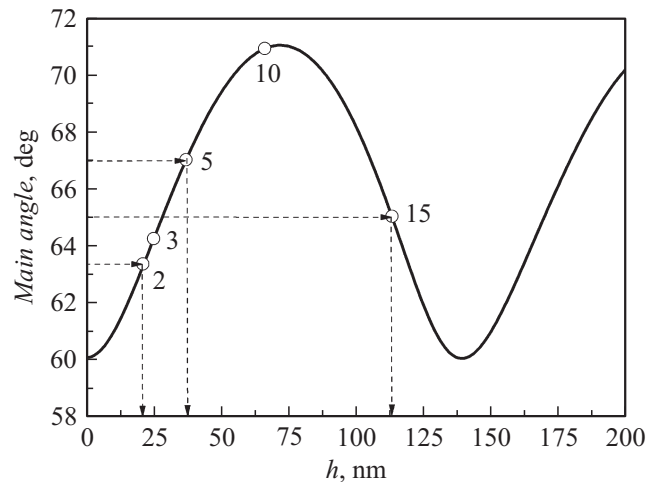


Рис. 2. Теоретическая зависимость основного угла отражения ϑ_{min} от толщины пленки. На эту зависимость нанесены экспериментально измеренные основные углы отражения (цифры на маркерах — время напыления в минутах).

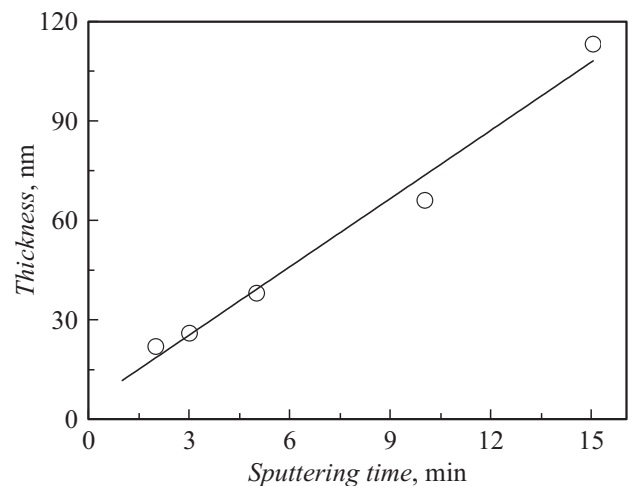


Рис. 3. Зависимость рассчитанной толщины пленки BSN/MgO(001) от времени напыления.

ствительно, интенсивность отраженного сигнала в узле определяется только подложкой, и сам факт вырождения кривых отражения от природы подложки не зависит.

На рис. 1–3 предложенный способ интерпретации кривых отражения иллюстрируется на серии пленок, полученных при нанесении твердого раствора $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (BSN) на подложку MgO(001) и отличающихся лишь временами напыления (или толщинами). На рис. 1 представлены угловые зависимости интенсивностей зеркального отражения излучения с длиной волны 700 нм. Видно, что в полученном семействе кривых отражения существует узел при угле вырождения $\vartheta_2 = 66.4^\circ$, а соответствующий коэффициент преломления материала пленки $n_2 = 2.296$ и достаточно хорошо согласовывается с литературными данными для монокристаллических образцов [5]. С учетом полученного

значения n_2 по формуле (4) рассчитываются амплитуды отражения $r_{12}(\vartheta)$ и $r_{13}(\vartheta)$ с заменой n_2 на n_3 . Подставляя (3) в (1), рассчитываем коэффициент отражения R как функцию угла ϑ и на полученной кривой находим угол, соответствующий минимуму. В дальнейшем этот угол, ϑ_{\min} , будем называть основным углом отражения (в металлооптике этот угол называется главным углом падения [6], а в оптике прозрачных материалов — углом Брюстера). Далее строим теоретическую зависимость основного угла отражения от толщины пленки (рис. 2). Эта кривая и позволяет по измеренным основным углам отражения каждой пленки оценивать их толщины и устанавливать зависимость толщины пленки от времени напыления (рис. 3).

Таким образом, описанный выше алгоритм позволяет определять показатель преломления материала сформированных структур и их толщины, необходимые в последующих применениях или исследованиях. Отметим, что метод может быть обобщен и на многослойные структуры, представляя подложку многослойной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15–08–05711 А).

Список литературы

- [1] Зинченко С.П., Ковтун А.П., Толмачев Г.Н. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 11. С. 128–133.
- [2] Швец В.А., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 11. С. 41–44.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М: Наука, 1982. 616 с.
- [4] Борн М., Вольф Э. Принципы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- [5] Кузьминов Ю.С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука, 1982. 400 с.
- [6] Поль Р.В. Оптика и атомная физика. М.: Наука, 1966. 552 с.