

И.В. Ивашкевич¹, В.В. Филиппов²

¹УО «Могилевский государственный университет
имени А.А. Кулешова», Могилев, Беларусь

²УО «Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники», Минск, Беларусь

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ КЛИНОВИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Введение

Прозрачные проводящие оксиды металлов являются перспективными тонкопленочными покрытиями в первую очередь в фотовольтаике. В солнечных ячейках прозрачные проводящие плёнки оксидов могут использоваться в качестве электродов и буферных слоёв между электродом и активным материалом ячейки [1-3]. В настоящее время разработано несколько методов формирования тонких пленок, среди которых наибольшее распространение получил метод ВЧ магнетронного распыления. При этом часто наблюдается разнотолщинность пленок по площади (неоднородность по толщине). Как правило, неоднородность можно считать локально клиновидной. Такой подход позволяет, в принципе, рассматривать произвольную зависимость толщины пленки от координат вдоль ее поверхности. Развитию как спектрофотометрических, так и спектроэллипсометрических методов корректного определения оптических характеристик пленок с рассматриваемой неоднородностью посвящен ряд работ [4-7]. Причем в методе эллипсометрии для нахождения оптических постоянных и толщины пленки предварительно необходимо определять матрицу Мюллера исследуемой отражающей системы при нескольких углах падения. При этом измеряемые эллипсометрические параметры зависят от размера освещаемого пятна и его ориентации относительно направления градиента толщины пленки. Все это значительно усложняет процедуру измерений и обработки измеренных данных. В настоящей работе показаны возможности определения клиновидности по измерениям в разнесенных точках клина и в предположении, что в них можно локально пренебречь клиновидностью пленки, а также применения специального программного приложения к спектроэллипсометру ES-2, которое позволяет довольно простым образом определять клиновидность и толщину пленки, на примере пленок оксида цинка, осажденных на кремниевые подложки методом ВЧ маг

нейтронного распыления в условиях скользящего углового осаждения (GLAD).

1. Эксперимент

На спектральном эллипсометре ES-2 были измерены спектры $\text{tg}\Psi(\lambda)$, $\text{cos}\Delta(\lambda)$ пленок ZnO на кремниевых подложках при угле падения излучения 70° в спектральном диапазоне 400 – 1000 нм. Измерения проводились в трех различных областях (A, B, C) поверхности пленки (рисунок 1). Причем в области C плоскость падения излучения поворачивалась на 90° относительно областей A и B. При этом локальность измерений изменялась с 2,00 мм до 5,00 мм.

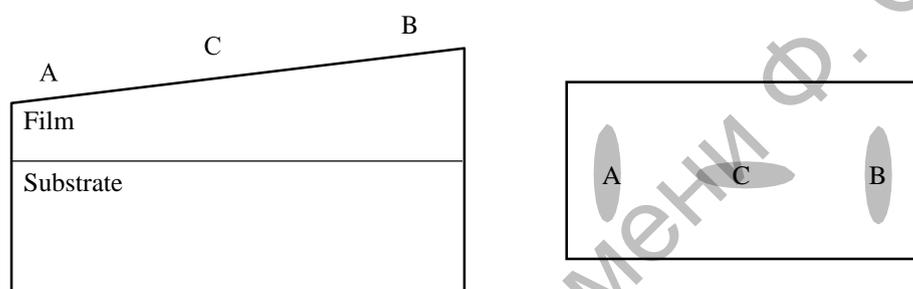


Рисунок 1 – Модель клиновидной пленки на подложке

На рисунке 2 представлены измеренные спектры одного из исследуемых образцов (кривые 1 – область A, 3 – область B, 4 – область C). Несовпадение спектров различных областей поверхности пленки говорит о том, что толщина пленок неоднородна вдоль образца.

2. Обсуждение результатов

Обратная задача спектральной эллипсометрии решалась в программном обеспечении эллипсометра ES-2. Неоднородность толщины d пленки ZnO учитывалась параметром dd , учитывающим изменение толщины пленки в площади светового пучка.

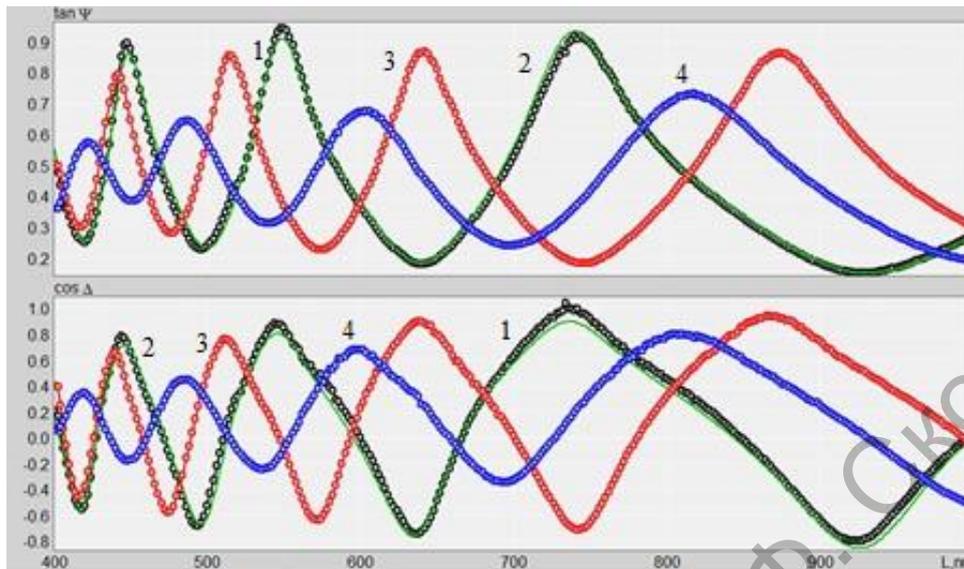


Рисунок 2 – Экспериментальные (1, 3, 4) и рассчитанные (2) спектры $\text{tg}\Psi(\lambda)$, $\text{cos}\Delta(\lambda)$

Оказалось, что структура пленок ZnO оптимально описывается двуслойной моделью (функционал невязки принимает минимальное значение): подложка – неоднородный слой ZnO (d , dd) – поверхностный слой (d_1), моделируемый бинарной смесью ZnO и воздуха в равных долях. Переходный слой между пленкой и подложкой не обнаруживается. Возможно, он имеет малую толщину, и его параметры не оказывают существенного влияния на измеряемые эллипсометрические параметры. Что говорит о хорошем качестве границ между пленкой и подложкой, в отличие от пленок ZnO, исследуемых в работе [8], сформированных методом ВЧ магнетронного распыления при нормальном падении частиц на кремниевые подложки. Рассчитанная толщина переходного слоя для тех пленок составляла около 20% толщины пленки. Геометрические параметры слоев модели для одного из исследуемых образцов представлены в таблице 1.

Из таблицы видно, что при одинаковой локальности измерений (области А и В) относительный параметр dd/d остается практически неизменным для любой точки поверхности неоднородной по толщине пленки. При этом на всей поверхности пленки есть поверхностный рыхлый слой с высоким содержанием воздуха в междендритных образованиях оксида цинка, толщина которого составляет около 4% толщины пленки.

Таблица 1 – Геометрические параметры слоев в оптической модели

Параметр	Область А	Область В	Область С
d , nm	540,5	648,9	601,8
dd , nm	39,3	48,0	83,5
d_1 , nm	24,5	20,6	20,5
dd/d	0,073	0,074	0,14

По модели Коши восстановлен ход дисперсионных кривых показателей преломления и поглощения пленок ZnO (рисунок 3), который хорошо коррелирует с данными, полученными в работе [9]. При этом полученные значения показателя преломления пленок ZnO оказались немного ниже (~ 5%) показателя преломления аналогичных пленок, осажденных на стеклянные подложки в тех же условиях [8].

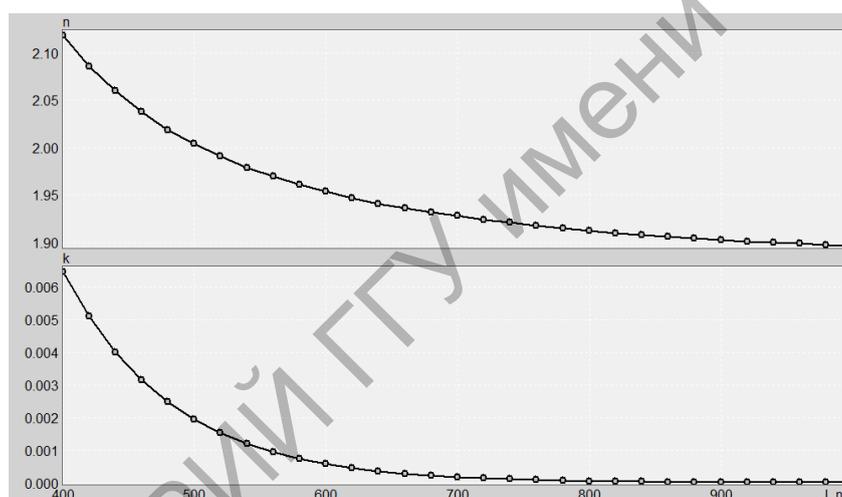


Рисунок 3 – Дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения пленок ZnO

Невязка решения обратной задачи во всех случаях оказалась менее 0,07, что не превышает погрешностей измерения (рисунок 2 кривые 1, 2).

Заключение

Таким образом, пленки оксида цинка, осажденные на кремниевые подложки, методом ВЧ магнетронного распыления по технологии GLAD оказались клиновидными, при этом неоднородность по толщине пленки можно описать параметром dd/d . Скользящее угловое осаждение пленок на кремниевые подложки улучшает их адгезию к подложке. На поверхности пленки существует пористый слой, кото

рый можно смоделировать бинарной смесью ZnO и воздуха в равных долях. Рассчитанный показатель преломления полученных пленок хорошо коррелирует с ранее полученными данными.

Литература

1. Tadatsugu, M. Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes / M. Tadatsugu // *Semiconductor Science and Technology*. – 2005. – Vol. 20 – P. 35–49.
2. Zhang, F. Recent development of the inverted configuration organic solar cells / F. Zhang, X. Xu, W. Tang // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2011. – Vol. 95 – P. 1785–1799.
3. Kim, S. H. Efficiency enhancement in polymer optoelectronic devices by introducing titanium sub-oxide layer / S. H. Kim, S. H. Park, K. Lee. // *Curr. Appl. Phys.* – 2010. – doi:10.1016/j.cap.2009.11.084.
4. Pisarkiewicz, T. Inhomogeneity of amorphous silicon thin films from optical transmission and reflection measurements / T. Pisarkiewicz, T. Stapinski, H. Czernastek, and P. Rava // *J. Non-Cryst Solids*. – 1991. – № 137–138. – P. 619–622.
5. Kushev, D. B. Transmittivity, reflectivities and absorptivities of a semiconductor film with a linear variation in thickness / D. B. Kushev, N. N. Zheleva // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1995. – Vol. 28. – № 6. – P. 1239–1243.
6. Филиппов, В.В. Учет клиновидности и неоднородности тонких слоев в обратной задаче спектрофотометрии на отражение / В.В. Филиппов, В.П. Кутаевич // *Оптика и спектроскопия*. – 2002. – Т. 92. – № 3. – С. 510 – 517.
7. Nečas, D. Ellipsometric characterisation of thin films non-uniform in thickness / D. Nečas, D. Franta, V. Buršikova, I. Ohlidal // *Thin Solid Films*. – 2011. – № 519. – P. 2715–2717.
8. Оптические характеристики пленок оксида цинка на стеклянных подложках / Н.И. Стаськов [и др.] // *ЖПС*. – 2018. – Т. 85. – Вып. 3. – С. 512–519.
9. Исследование структуры пленок ZnO и TiO_x методами эллипсометрии / И.В. Ивашкевич [и др.] // *Итоги научных исследований ученых МГУ имени А.А. Кулешова 2014 г.: сб. научн. ст. / под ред. Е.К. Сычовой*. – Могилев: МГУ имени А.А. Кулешова, 2015. – С. 43–47.