

И.В. Ивашкевич, Е.Г. Гарай, Е.В. Третьяк  
(Могилев, Беларусь)

## УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ ПО ТОЛЩИНЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК В СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

*Представлена математическая модель, позволяющая описать неоднородность по толщине пленок оксидов металлов на полупроводниковых подложках при их исследовании методом спектральной эллипсометрии.*

**Ключевые слова:** спектральная эллипсометрия, оптические характеристики, неоднородность по толщине, полупроводниковые пленки.

*The mathematical model is presented; it describes the heterogeneity in thickness of metal oxide films on semiconductor substrates in their study by spectral ellipsometry.*

**Keywords:** spectral ellipsometry, the optical constants, irregularity in thickness, semiconductor film.

В связи с развитием оптоэлектроники в последние десятилетия возрос интерес к тонкопленочным покрытиям на основе прозрачных проводящих оксидов металлов ( $ZnO$ ,  $SnO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $In_2O_3$ ), относящихся к классу широкозонных полупроводников [1]. Свойства и структура получаемых покрытий напрямую зависят от методов и условий их формирования. При этом часто наблюдается неравномерное распределение толщины пленки вдоль поверхности подложки.

В зависимости от сферы применения подобная неоднородность по толщине пленок воспринимается по-разному: и как нежелательное явление, служащее показателем того, что процесс формирования пленок не отлажен, и как ожидаемое – при получении наноструктурированных тонких пленок. В последнем случае специально используют скользящее угловое осаждение пленок на подложки, например, методом ВЧ магнетронного распыления. При этом во всех случаях возникает необходимость учета неоднородности по толщине получаемых пленок.

В работе [2] исследована возможность учета подобной неоднородности по толщине на примере пленок оксида цинка, осажденных на кремниевые подложки методом ВЧ магнетронного распыления в условиях скользящего углового осаждения, с применением программного обеспечения к спектроэллипсометру ES-2 [3], которое позволяет довольно простым образом определять клиновидность и толщину пленки. По измерениям спектров поляризационных углов  $tg\Psi(\lambda)$  и  $\cos\Delta(\lambda)$  в разнесенных точ-

ках клина было установлено, что данные пленки оксида цинка оказались клиновидными. При этом неоднородность толщины  $d$  пленки ZnO можно описать в достаточной мере некоторым параметром  $dd$ , учитывающим изменение толщины пленки в площади светового пучка.

Однако в силу ряда ограничений, наложенных разработчиками на вышеуказанное программное обеспечение, таких как невозможность варьирования моделей дисперсии оптических параметров исследуемых структур, отсутствие информации о методе расчета параметра  $dd$ , остается открытым вопрос о выборе математической модели для расчета спектров  $\text{tg}\Psi(\lambda)$  и  $\cos\Delta(\lambda)$  неоднородных по толщине пленок на подложках.

В данной работе описывается модель, учитывающая влияние неоднородности по толщине полупроводниковых пленок на подложках на спектры поляризационных углов  $\text{tg}\Psi(\lambda)$  и  $\cos\Delta(\lambda)$ , измеряемые на спектральном эллипсометре ES-2 с бинарной модуляцией состояния поляризации, в спектральном диапазоне 400-1000 нм.

Эллипсометр ES-2 имеет конфигурацию поляризатор-образец-анализатор. На вход фотодетектора прибора поступает интенсивность [3]

$$I = I_0(\sin^2 A \sin^2 P + \cos^2 A \cos^2 P \text{tg}^2 \Psi + 0.5 \sin 2A \sin 2P \cos \Delta \text{tg} \Psi), \quad (1)$$

где  $I_0$  – некоторый коэффициент,  $P$  и  $A$  – азимуты поляризатора и анализатора,  $\text{tg}\Psi$  и  $\cos\Delta$  – поляризационные углы, выражаемые через амплитудные коэффициенты отражения  $R_p$  и  $R_s$ , которые в свою очередь определяются параметрами выбранной модели исследуемой структуры.

Для учета неоднородности по толщине исследуемых пленок использовалась модель линейного клина на полубесконечной подложке (рис. 1). Клин пленки характеризуется средней толщиной  $d$  в пределах области освещения образца  $l$  и отклонением толщины от среднего значения в пределах апертуры пучка света  $\Delta d$ . При этом  $\alpha$  – угловая толщина клина.

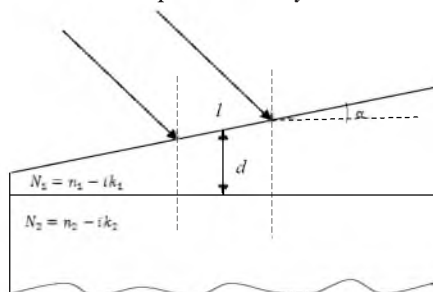


Рис. 1. Однослойная модель клиновидной пленки  $N_1$  на полубесконечной подложке  $N_2$

Величины коэффициентов отражения  $R_p$  и  $R_s$  для данной модели в области освещения образца  $l$  определяли как среднее значение, разбивая эту область на достаточно большое число промежутков, считая, что в каждой из них можно локально пренебречь неоднородностью по толщине.

На рисунке 2 представлены рассчитанные спектры  $\text{tg}\Psi(\lambda)$  и  $\cos\Delta(\lambda)$  при угле падения  $70^\circ$  и толщине клина  $600 \text{ нм}$  для различных значений отклонения толщины от среднего значения  $\Delta d$  (кривые 1 –  $\Delta d = 0 \text{ нм}$ , 2 –  $\Delta d = 30 \text{ нм}$ , 3 –  $\Delta d = 60 \text{ нм}$ , 4 –  $\Delta d = 120 \text{ нм}$ , 5 –  $\Delta d = 180 \text{ нм}$ ).

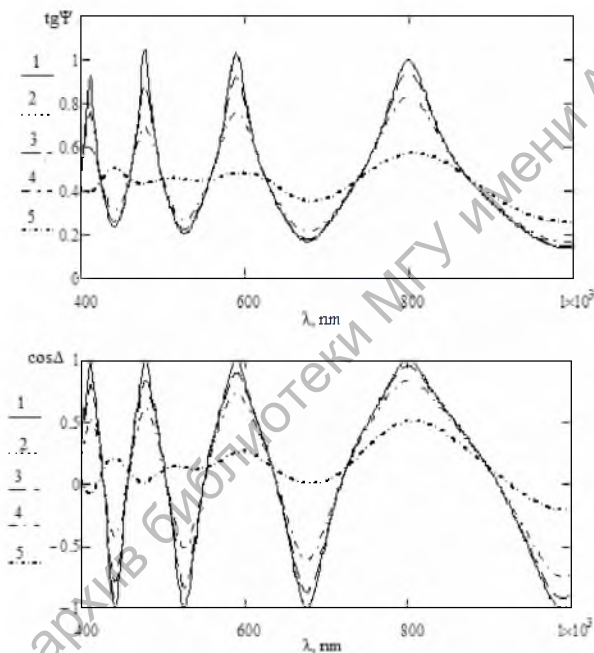


Рис. 2. Рассчитанные спектры  $\text{tg}\Psi(\lambda)$  и  $\cos\Delta(\lambda)$

Анализ полученных спектров показывает, что клиновидность пленок  $\Delta d \sim 10\%$  не приводит к изменению положения экстремумов в спектрах  $\text{tg}\Psi(\lambda)$  и  $\cos\Delta(\lambda)$ , причем на спектры  $\cos\Delta(\lambda)$  она практически не оказывает никакого влияния. При больших значениях клиновидности вид обоих спектров существенно меняется и положение интерференционных экстремумов уже не несет информации о средней оптической толщине пленки.

### **Литература:**

1. Вавилов, В.С. Особенности физики широкозонных полупроводников и их практических применений / В.С. Вавилов // УФН. – 1994. – Т. 164. – № 3. – С. 287–296.
2. Ивашкевич, И.В. Спектральная эллипсометрия клиновидных полупроводниковых пленок на кремниевых подложках / И.В. Ивашкевич, В.В. Филиппов // Проблемы взаимодействия излучения с веществом [Электронный ресурс] : V Международная научная конференция, посвящ. акад. Б.В. Бокупо (Гомель, 14–16 ноября 2018 г.) : материалы : в 2 ч. – Ч. 2. – Электронные тестовые данные (10,6 МБ). – Гомель : ГТУ им. Ф. Скорины, 2018. – С. 104–109.
3. Спектральная эллипсометрия многослойных гетероструктур ZnS/ZnSe / В.И. Ковалев [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2002. – Т. 69, № 2. – С. 258–263.