

Н.И. Стаськов<sup>1</sup>, Л.И. Сотская<sup>2</sup>,  
В.В. Филиппов<sup>3</sup>, Б.Г. Шулицкий<sup>3</sup>, И.А. Кашко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>УО «Могилёвский государственный университет  
им. А.А. Кулешова», Могилев, Беларусь

<sup>2</sup>ГУВПО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь

<sup>3</sup>УО «Белорусский университет информатики и радиоэлектроники»,  
Минск, Беларусь

## СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИНОВИДНЫХ ПЛЕНОК НА СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖКАХ

### Введение

Известно [1], что фазовая толщина диэлектрической пленки  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} hn \cos \beta$  зависит от угла преломления света в пленку  $\beta$ , длины волны  $\lambda$  и ее оптической толщины  $hn$ , которая в свою очередь зависит от геометрической толщины  $h$  и показателя преломления  $n$ . Равномерная монохроматическая окраска пленок указывает на постоянство их параметров.

Известны два подхода к определению оптических и геометрических параметров оптически однородных клиновидных пленок. В работах [2, 3] предложено использование для этой цели огибающих минимумов и максимумов спектров отражения [2] или спектров пропускания [3]. Второй подход к проблеме исследования клиновидных пленок [4–6] основан на измерениях с помощью спектрального эллипсометра с фазовой модуляцией сигналов, по которым определяют элементы матрицы Мюллера. Это позволяет рассчитать степень деполяризации света, вызванную клиновидностью объекта, и определить его характеристики. Такой подход требует проведения довольно большого числа дополнительных измерений.

Средняя толщина  $\bar{h}$  и клиновидность  $\Delta h$  пленки, определенные вышеуказанными методами спектрофотометрии или эллипсометрии, имеют смысл лишь при заданной апертуре падающего на клиновидную пленку пучка света и для определенного места измерения спектров, поэтому не являются универсальными характеристиками пленки.

## 1. Комбинированный спектрофотометрический метод

В данной работе обсуждаются результаты определения геометрических параметров, показателей преломления  $n(\lambda)$  и поглощения  $k(\lambda)$  клиновидных пленок оксида цинка (ZnO) комбинированным спектрофотометрическим методом, основанным на измерениях спектров пропускательной способности  $T(\lambda)$  и отношения отражательных способностей  $\psi = \text{atg}[R_p(\lambda)/R_s(\lambda)]^{0.5}$ , в приближении локальной однородности.

Мы смоделировали поверхность клиновидной пленки набором трех (А, С, В) плоских ступенек, каждая из которых параллельна поверхности стеклянной подложки. Расчеты  $T(\lambda)$  и  $\psi(\lambda)$  выполнены для нормального и наклонного падения света на соответствующую ступеньку. Спектры оптических характеристик  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  модельной пленки были заданы дисперсионными функциями

$$n_f(E) = n_\infty + [B(E - E_j) + C] \left[ (E - E_j)^2 + \Gamma_j^2 \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$k_f(E) = \begin{cases} f_j (E - E_g)^2 \left[ (E - E_j)^2 + \Gamma_j^2 \right]^{-1}, & E > E_g, \\ 0, & E < E_g. \end{cases} \quad (2)$$

Где  $B = f_j \Gamma_j^{-1} \left[ \Gamma_j^2 - (E_j - E_g)^2 \right]$ ,  $C = 2f_j \Gamma_j (E_j - E_g)$ ,  $E$  – энергия фотона в эВ. Значения параметров  $n_\infty$ ,  $E_j$ ,  $f_j$ ,  $\Gamma_j$ , и  $E_g$  для ряда материалов брались из программного обеспечения DeltaPsi2 к эллипсометру UVISEL 2 (HORIBA). По спектрам  $\psi(\lambda)$  в области полосы собственного поглощения широкозонных полупроводников можно зафиксировать оптическую неоднородность пленок.

Пленки ZnO формировались методом ВЧ магнетронного распыления на подложках К8 из трёхдюймовой мишени ZnO (чистота 99,95%). Образцы крепились к столику, нормаль к которому отклонена от оси магнетрона на 20 градусов. Давление в камере 0,939Па, мощность разряда 300Вт. Температура подложки 30° С. Длительность напыления 10 мин. На поверхности пленки виден радужный спектр, полосы которого располагались параллельно ребру клина.

Спектры пропускательных способностей  $T(\lambda)$  образцов (рисунок 1а, кривые 1, 2) измеряли на спектрофотометре Cary-500 при угле падения 0° в диапазоне от 300 до 700 нм. Спектры эллипсометрических углов  $\psi(\lambda)$  образца измеряли при углах падения  $\varphi$  равных 50°, 55° и 60° в диапазоне от 250 до 700 нм на спектральном эллипсометре

UVISEL 2 (HORIBA). Кривые 1 и 2 (рисунок 1б,  $\varphi=55^\circ$ ) соответствуют участкам А и В, а кривая 5 – середине клина (С).

## 2. Обсуждение результатов

Поведение кривых (1, 2, 5) на рисунке 1 б в области от 250 до 385 нм свидетельствует об оптической однородности клиновидной пленки ZnO. Методом наименьших квадратов с помощью разработанного программного обеспечения по всем пяти измеренным спектрам (рис. 1 а, б) решалась обратная задача спектрофотометрии – определялись спектры оптических характеристик  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  пленки и ее толщины в тех местах, где измерялись спектры  $T(\lambda)$  и  $\psi(\lambda)$ . Толщина пленки, соответствующая спектрам пропускания оказалась равной  $h_A=278.7\text{нм}$  и  $h_B=299.0\text{нм}$  ( $\Delta h=20.3\text{нм}$ ), а в тех местах, где измерялись спектры  $\psi(\lambda)$ , –  $h_A=288.4\text{нм}$ ,  $h_B=306.2\text{нм}$  ( $\Delta h=17.8\text{нм}$ ) и  $h_C=297.6\text{нм}$ . Средняя толщина клина в этом случае ( $297.3\text{нм}$ ) удовлетворительно согласуется с величиной  $h_C$ . К тому же, клиновидность пленки, определенная как разность  $h_B - h_A$  по спектрам пропускания и отражения, практически одинаковая  $\Delta h=(19\pm 1)\text{нм}$ .

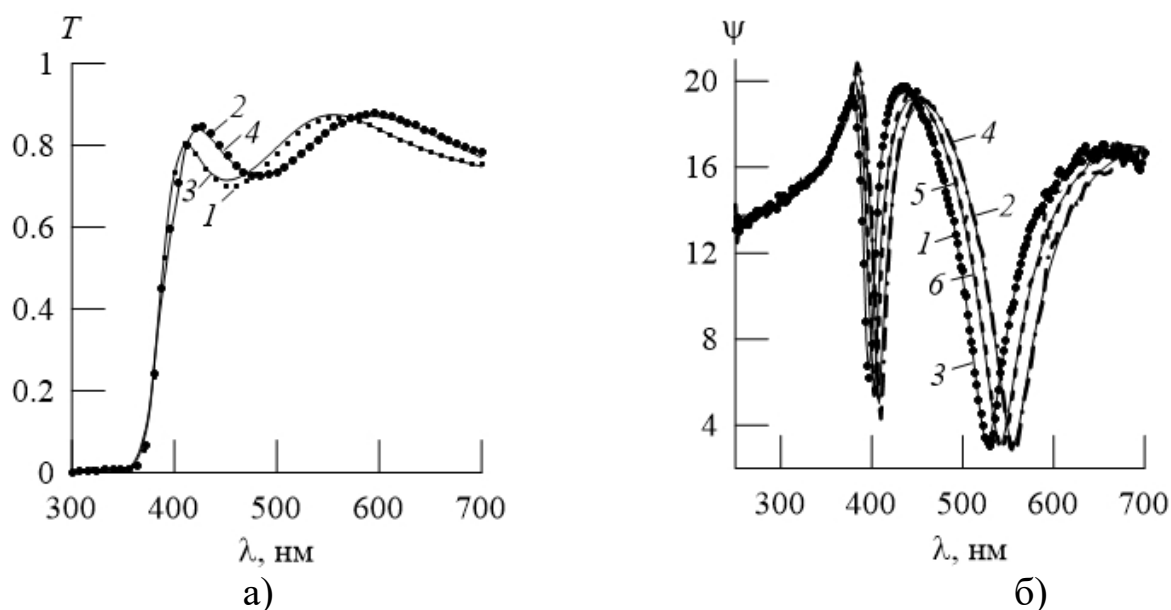


Рисунок 1 – Измеренные (1, 2, 5) и рассчитанные (3, 4, 6) спектры пропускательных способностей (а) и эллипсометрических углов (б) пленки ZnO

Численно рассчитанные по измеренным спектрам комбинированным методом оптические характеристики клиновидной пленки ZnO приведены на рисунке 2 а, б (кривые 1). Кривые 2 приведены в работе



[7]. С помощью программного обеспечения DeltaPsi2 к эллипсометру Horiba UVISEL по измеренным спектрам  $\psi(\lambda)$  и  $\Delta(\lambda)$  мы рассчитали параметры дисперсионных формул (1, 2)  $n_\infty = 1.883$ ,  $E_g = 2.811$  эВ,  $f_j = 0.112$ ,  $E_j = 3.501$  эВ,  $\Gamma_j = 0.351$  эВ и определили  $k(\lambda)$  (а) и  $n(\lambda)$  (б) (кривые 3).

Поведение кривых на рисунке 2 указывает на сложный характер полосы поглощения оксида цинка. Наличие двух максимумов, которые соответствуют длинам волн 305 нм и 339 нм (кривая 1), позволяет предположить, что в области от 250 до 380 нм находятся, как минимум, две полосы поглощения. Возможно, с одной стороны, это вызвано тем, что пленки оксида цинка при ВЧ магнетронном напылении являются аморфно-кристаллическими, а с другой стороны, на экспериментальные спектры  $T(\lambda)$  и  $\psi(\lambda)$  оказывают влияние поверхностные слои пленок оксида цинка.

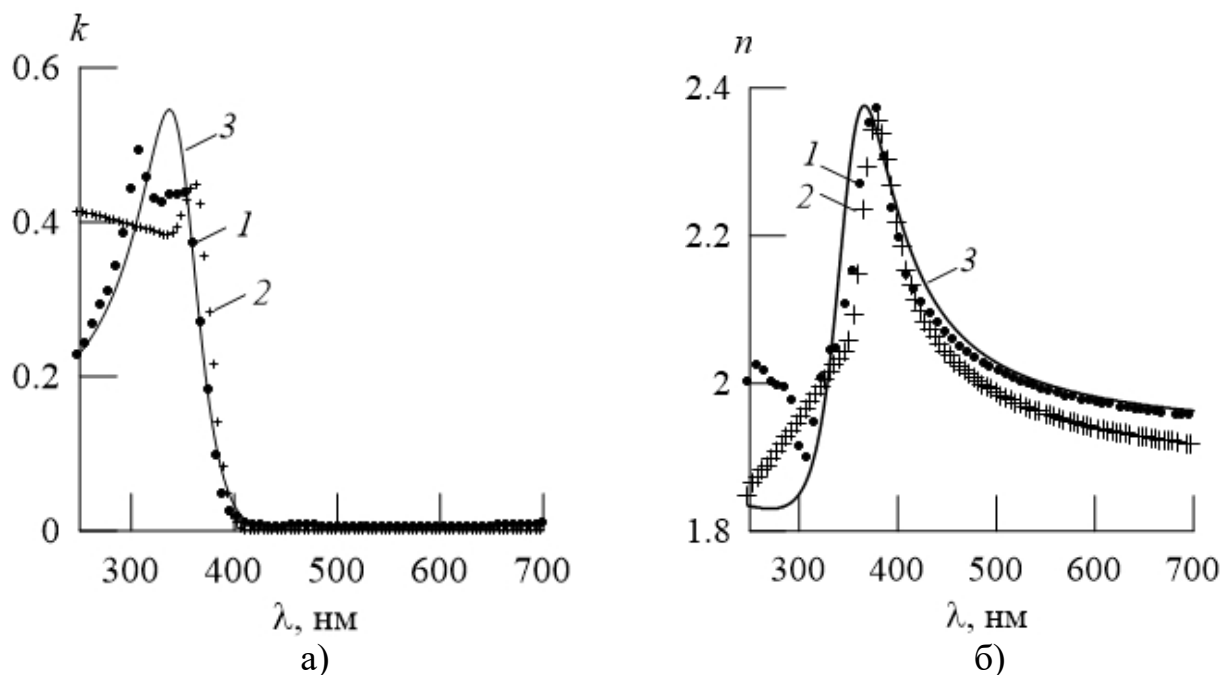


Рисунок 2 – Спектры показателей поглощения (а) и преломления (б) пленки ZnO. 1 – рассчитаны по  $T(\lambda)$  и  $\psi(\lambda)$ , 2 – из работы [7], 3 – рассчитаны по дисперсионным формулам (1) и (2).

### Заключение

Приведенные данные показывают:

- по спектрам  $\psi(\lambda)$ , измеренным в области полосы собственного поглощения, можно установить оптическую однородность клиновидных пленок широкозонного полупроводника;



- по спектрам пропускательных и отношению отражательных способностей, измеренным на краях оптически однородного клина, можно получить устойчивое решение обратной задачи спектрофотометрии – определить среднюю толщину, клиновидность пленок и спектры показателей преломления  $n(\lambda)$  и поглощения  $k(\lambda)$ ;

- оптические характеристики клиновидной пленки в области от 380 до 700 нм удовлетворительно согласуются с таковыми для плоской пленки ZnO [8].

- наличие двух максимумов в спектре  $k(\lambda)$ , которые приходятся на длины волн 305 нм и 339 нм, позволяет предположить, что в области от 250 до 380 нм находятся, как минимум, две полосы поглощения оксида цинка.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ Республики Беларусь “Фотоника, опто- и микроэлектроника 1.3.03” (2016—2017 гг.) и «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» №20161337 от 06.05.2016.

### Литература

1. Борн, М. Основы оптики: Пер. с англ. / М. Борн, Э. Вольф. – М: Наука, 1970. – 856 с.
2. Filippov, V.V. Account for the Wedgeness and Inhomogeneity of Thin Layers in the Inverse Problem of Spectrophotometry on Reflection / V.V. Filippov, V.P. Kutavichus // Optics and Spectroscopy. – 2002. – Vol. 92, № 3. – P. 465–472.
3. González-Leal, J.-M. Influence of substrate absorption on the optical and geometrical characterization of thin dielectric films / J.-M. González-Leal [et al.] // Appl. Opt. – 2002. – Vol. 41, № 34. – P. 7300–7308.
4. Ivan Ohlídal Characterization of non-uniform diamond-like carbon films by spectroscopic ellipsometry / Ivan Ohlídal, David Nečas, Daniel Franta, Vilma Buršíková // Diamond & Related Materials. – 2009. – Vol. 18. – P. 364–367.
5. David Nečas Ellipsometric characterisation of thin films non-uniform in thickness / David Nečas [et al.] // Thin Solid Films. – 2011. – Vol. 519. – P. 2715–2717.
6. Nerbø, I. S. Characterization of nanostructured GaSb: comparison between large-area optical and local direct microscopic techniques / I.S. Nerbø [et al.] // Appl. Opt. – 2008. – Vol. 47, № 28. – P. 5130–5139.
7. Treharne, R.E. Optical Design and Fabrication of Fully Sputtered CdTe/CdS Solar Cells / R.E. Treharne, A. Seymour-Pierce, K. Durose // Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – Vol. 286. – P. 1–8.

8. Staskov, N.I. Optical characteristics of zinc oxide films on class substrates / N.I. Staskov [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. – 2018. – Vol. 85, № 4. – P. 710-716.

**Н.И. Стаськов<sup>1</sup>, П.А. Холов<sup>2</sup>, Л.И. Сотская<sup>3</sup>,  
Н.В. Гапоненко<sup>2</sup>, Н.А. Крекотень<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>УО «Могилёвский государственный университет  
им. А.А. Кулешова», Могилев, Беларусь

<sup>2</sup>УО «Белорусский университет информатики и радиоэлектроники»,  
Минск, Беларусь

<sup>3</sup>ГУВПО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь

<sup>4</sup>Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл»,  
Минск, Беларусь

## **ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ НА КВАРЦЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ**

### **Введение**

Титанат бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) является сегнетоэлектрическим материалом, который имеет перовскитную структуру. Пленки титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) представляют интерес для микроэлектроники благодаря высокой диэлектрической проницаемости и спонтанной электрической поляризации. Ранее было показано, что такие пленки, обладая сравнительно высоким показателем преломления, могут быть использованы в сочетании с оксидом кремния для синтеза одномерных фотонных кристаллов [1, 2]. Оптические характеристики ( $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $N=n-ik$  – показатели преломления  $n$  и поглощения  $k$ ) пленок  $\text{BaTiO}_3$  зависят от технологии получения, толщины, материала подложки и температуры термообработки. Для определения таких характеристик используют методы спектрофотометрии и эллипсометрии. Выбирается определенная электродинамическая модель отражающей системы, задаются дисперсионные функции или табличные значения показателей преломления и поглощения материалов и с помощью программного обеспечения решается обратная оптическая задача. Считается [3], что спектральная эллипсометрия является наиболее чувствительным методом исследования оптических и геометрических параметров наноразмерных пленочных структур.

В данной работе обсуждаются результаты определения геометрических и оптических характеристик пленок титаната бария, которые