

Н.И. Стаськов¹, Л.И. Сотская²,
В.В. Филиппов³, Б.Г. Шулицкий³, И.А. Кашко³

¹УО «Могилёвский государственный университет
им. А.А. Кулешова», Могилев, Беларусь

²ГУВПО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь

³УО «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 β , длины волны λ 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 депolarизации света, вызванную клиновидностью объекта, и определить его характеристики. Такой подход требует проведения довольно большого числа дополнительных измерений.

Средняя толщина \bar{h} и клиновидность Δh 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_∞ , E_j , f_j , Γ_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 φ 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 (297.3нм) 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 $\Delta h=(19\pm 1)\text{нм}$.

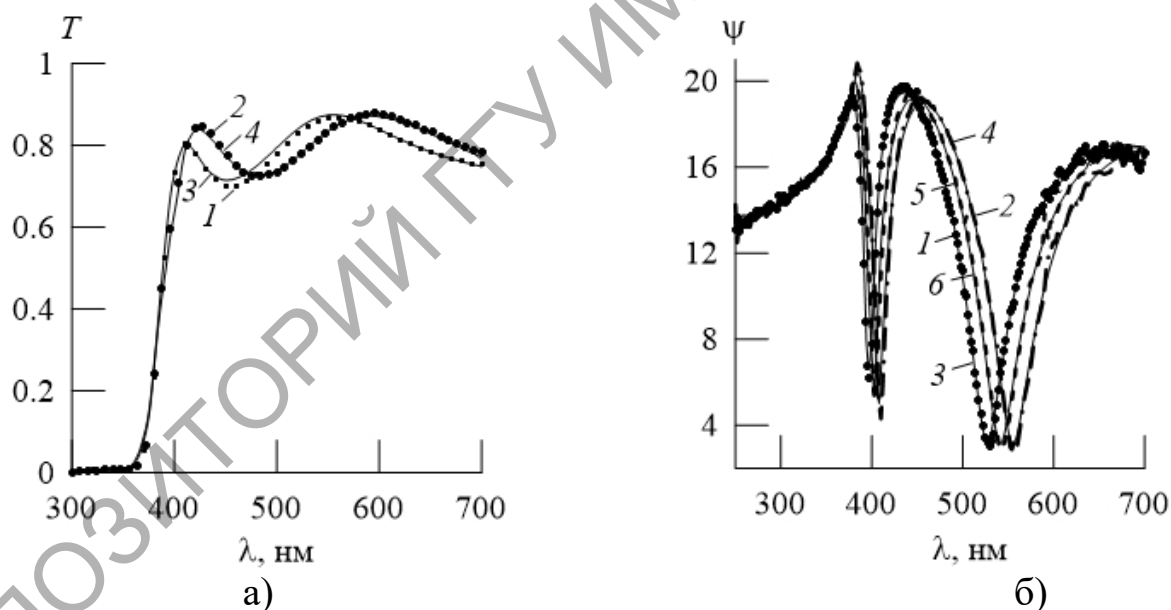


Рисунок 1 – Измеренные (1, 2, 5) и рассчитанные (3, 4, 6) спектры пропускательных способностей (а) и эллипсометрических углов (б) пленки ZnO

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.

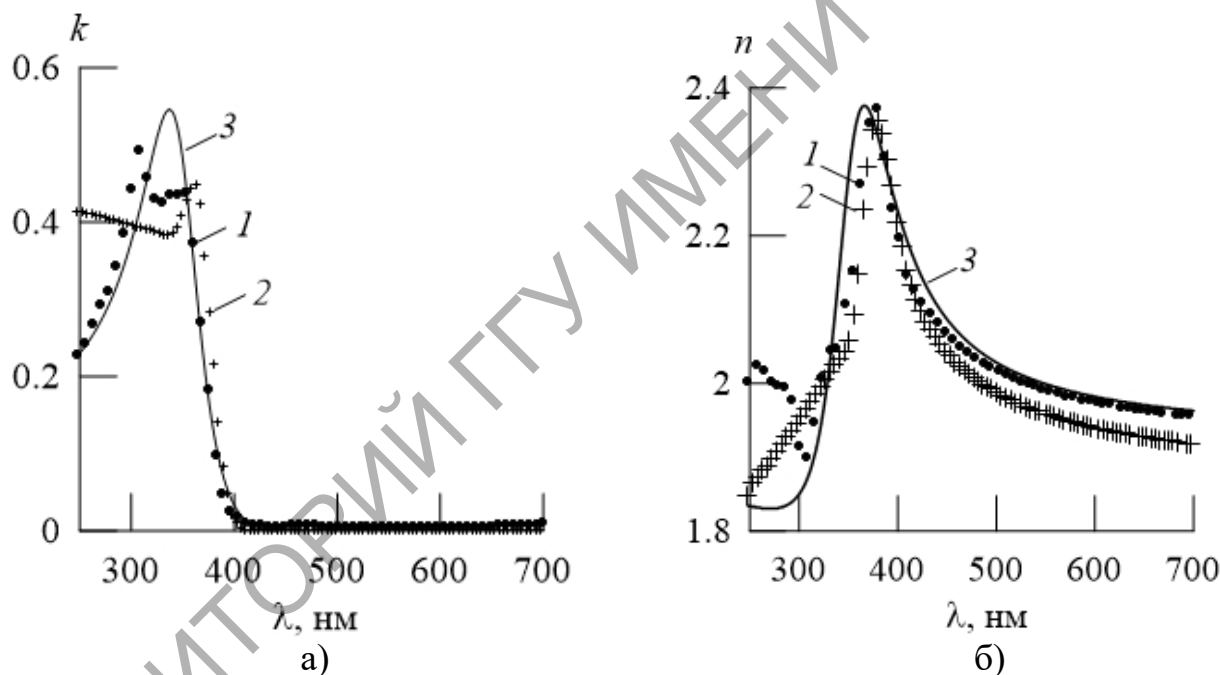


Рисунок 2 – Спектры показателей поглощения (а) и преломления (б) пленки ZnO. 1 – рассчитаны по $T(\lambda)$ и $\psi(\lambda)$, 2 – из работы [7], 3 – рассчитаны по дисперсионным формулам (1) и (2).

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 glass substrates / N.I. Staskov [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. – 2018. – Vol. 85, № 4. – P. 710-716.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ