

УДК 621.372.8, 535

Стаськов Н. И.<sup>1</sup>, Лашковская Е. И.<sup>2</sup>, Гапоненко Н. В.<sup>2</sup>, Корнилова Ю. Д.<sup>2</sup>,  
Омельченко А. А.<sup>3</sup>, Пилипенко В. А.<sup>3</sup>, Чудаков Е. А.<sup>1</sup>, Сотский А. Б.<sup>1</sup>, Сотская Л. И.<sup>4</sup>,  
Бойко А. А.<sup>5</sup>, Семченко А. В.<sup>6</sup>

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭРБИЯ ПО ТОЛЩИНЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова, Могилев, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Белмикросистемы НТЦ Филиал ОАО Интеграл, Минск, Беларусь

<sup>4</sup>Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

<sup>5</sup>Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь

<sup>6</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Беларусь

В данной работе представлены результаты оптического анализа однослойных пленок титаната бария, легированных эрбием, сформированных центрифугированием с окончательной термообработкой при температуре 450°C.

Легированные лантаноидами пленки титаната бария, сформированные золь-гель методом с различными режимами термообработки, представляют интерес для разработки канальных волноводных структур [1], оптических микрорезонаторов и люминесцентных покрытий [2, 3]. Цель данной работы – определение оптических характеристик однослойных пленок BaTiO<sub>3</sub>:Er, сформированных центрифугированием с окончательной термообработкой при 450°C.

На подложки из монокристаллического кремния золь-гель технологией наносили однослойные пленки титаната бария (BaTiO<sub>3</sub>) и пленки BaTiO<sub>3</sub>, легированные Er (BaTiO<sub>3</sub>:Er). Длительность отжига пленок при температуре 450°C – 30 мин. Золь титаната бария готовили на основе уксусной кислоты (CH<sub>3</sub>COOH), ацетилацетона (CH<sub>3</sub>-CO-CH<sub>2</sub>-CO-CH<sub>3</sub>), изопропоксида титана (Ti(OC<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sub>4</sub>) и ацетата бария (Ba(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>). Количества изопропоксида титана и ацетата бария было выбрано таким образом, чтобы соотношение Ti/Ba соответствовало стехиометрическому составу титаната бария в плёнке. Для формирования золя, содержащего эрбий, к раствору добавляли гидрат ацетата эрбия (Er(CH<sub>3</sub>COO)<sub>3</sub>·xH<sub>2</sub>O). Концентрации BaTiO<sub>3</sub> и Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в золях составляли 60,0 мг/мл и 1,5 мг/мл соответственно.

Для расчета параметров электродинамических и дисперсионных моделей пленок использовали программное обеспечение DeltaPsi2, установленное на спектральном эллипсометре UVISEL2 (HORIBA, Франция). Эллипсометрические характеристикам Is и Ic (рис. 1а, 2а) измеряли в спектральной области от 200нм (6.2eV) до 800нм (1.55eV) при углах падения 64, 67, 70 и 73°.

В области прозрачности кварцевых подложек (от 225 нм до 800 нм) спектры  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  ( $N = n - ik$ ) пленок BaTiO<sub>3</sub> (T=450°C) удачно ( $\chi^2=0.073$ ) аппроксимированы [4] дисперсионными функциями новых аморфных материалов с одним осциллятором (NAM)

$$n(\omega) = n_{\infty} + [B(\omega - \omega_j) + C] \left[ (\omega - \omega_j)^2 + \Gamma_j^2 \right]^{-1};$$

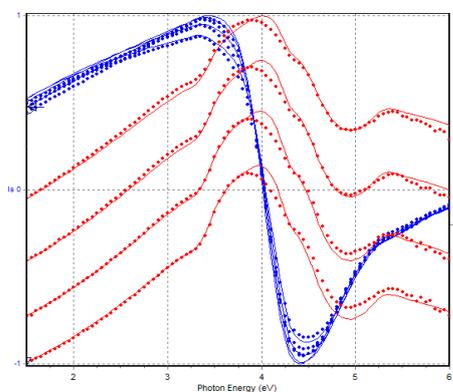
$$k(\omega) = \begin{cases} f_j (\omega - \omega_g)^2 \left[ (\omega - \omega_j)^2 + \Gamma_j^2 \right]^{-1}, & \omega > \omega_g; \\ 0, & \omega \leq \omega_g \end{cases};$$

$$B = f_j \Gamma_j^{-1} \left[ \Gamma_j^2 - (\omega_j - \omega_g)^2 \right];$$

$$C = 2f_j \Gamma_j (\omega_j - \omega_g).$$

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Эти формулы содержат параметр  $\omega_g$  – ширина запрещенной зоны. Предполагается, что при энергии фотона  $\omega > \omega_g$  пленка поглощает свет. Область прозрачности пленки определяется условием  $\omega \leq \omega_g$ . Край полосы поглощения находят по формуле  $\lambda_g = 1240\omega_g^{-1}$  ( $\lambda$  в нм, если  $\omega$  в эВ). Вышеприведенные формулы получены из уравнений Форухи-Блумера. Индекс  $j=1,2,3$  указывает на возможность моделирования сред в виде набора осцилляторов с разными характеристиками. С помощью эффективной среды Бруггемана был учтен поверхностный шероховатый слой (рисунок 1b) на пленке, рассчитана ( $\chi^2=5.24$ ) толщина пленки ( $L_1 = 34.1nm$ ), толщина шероховатого слоя  $L_2 = 18.4nm$  и пять параметров ( $n_\infty$ ,  $\omega_j$ ,  $f_j$ ,  $\Gamma_j$ ,  $\omega_g$ ) функции NAM. В шероховатом слое содержится 10.7% BaTiO<sub>3</sub>. Наибольшее отличие (рисунок 1a) измеренных и рассчитанных параметров приходится на область полосы собственного поглощения BaTiO<sub>3</sub>. На рисунке 1c приведены результаты расчетов восьми параметров функции NAM ( $\chi^2=2.94$ ) с двумя осцилляторами. Толщина пленки в этом случае практически не изменилась ( $L_1 = 35.8nm$ ).



(a)

$\chi^2$ minimization on Is,Ic		
$I_s = \text{Sin}(2\Psi) \times \text{Sin}(\Delta)$ , $I_c = \text{Sin}(2\Psi) \times \text{Cos}(\Delta)$		
$\chi^2 = 5.236626$		
Iterations Number = 25		
Parameters		
1) L1 Thickness [Å]	=	341.415 ± 1.566
2) L2 Thickness [Å]	=	183.782 ± 36.784
3) L2 % BaTiO3_nam.dsp	=	10.73 ± 2.40
4) BaTiO3_nam n∞	=	1.8476050 ± 0.0074
5) BaTiO3_nam ωg	=	3.7400450 ± 0.0208
6) BaTiO3_nam fj	=	0.2496136 ± 0.0074
7) BaTiO3_nam ωj	=	4.6149820 ± 0.0180
8) BaTiO3_nam Γj	=	1.0364800 ± 0.0162

(b)

$\chi^2$ minimization on Is,Ic		
$I_s = \text{Sin}(2\Psi) \times \text{Sin}(\Delta)$ , $I_c = \text{Sin}(2\Psi) \times \text{Cos}(\Delta)$		
$\chi^2 = 2.939478$		
Iterations Number = 33		
Parameters		
1) L1 Thickness [Å]	=	357.970
2) L1 T % BaTiO3_nam.dsp	=	100.00
3) BaTiO3_nam n∞	=	1.8639040
4) BaTiO3_nam ωg	=	3.9430720
5) BaTiO3_nam f1	=	0.0617865
6) BaTiO3_nam ω1	=	3.9239840
7) BaTiO3_nam Γ1	=	-0.4317386
8) BaTiO3_nam f2	=	0.2988822
9) BaTiO3_nam ω2	=	4.6101440
10) BaTiO3_nam Γ2	=	0.9056448

(c)

Рисунок 1 – (a) – Рассчитанные и измеренные эллипсометрические параметры Is, Ic пленки BaTiO<sub>3</sub>:Er; (b) – функция NAM с одним осциллятором; (c) – функция NAM с двумя осцилляторами

На рисунке 2a представлены измеренные и рассчитанные ( $\chi^2=1.65$ ) эллипсометрические характеристикам Is и Ic градиентной пленки BaTiO<sub>3</sub>:Er с линейной зависимостью диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon(L_1) = N^2(L_1)$ ) от толщины пленки, которая отсчитывается от границы раздела (Т) шероховатый слой – пленка до границы раздела(В) пленка – подложка. Толщина пленки в пределах погрешностей остается прежней ( $L_1 = (35.5 \pm 2.3)nm$ ).

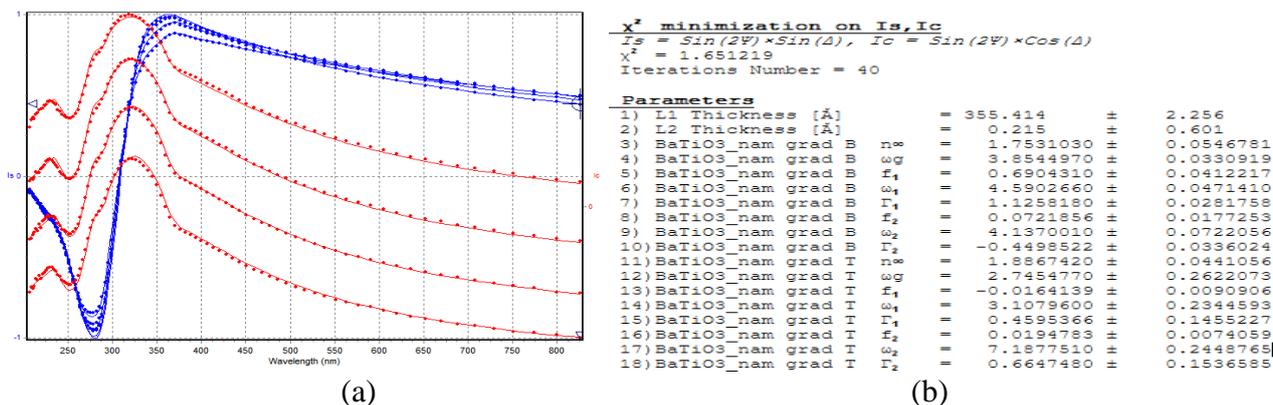


Рисунок 2. (a) – рассчитанные и измеренные эллипсометрические параметры  $I_s, I_c$  пленки  $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ ; (b) – функция NAM с двумя осцилляторами для градиентной пленки; T– верх пленки; B – низ пленки.

Полученные параметры электродинамических и дисперсионных моделей позволяют определить оптические характеристики пленки  $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$  и предположить, что Er выталкивается в приповерхностный слой пленки. Ширина запрещенной зоны этого слоя  $2.75\text{eV}$ . Ширина запрещенной зоны более глубинного слоя ( $3.85\text{eV}$ ) близка к ширине запрещенной зоны чистого  $\text{BaTiO}_3$  ( $3.63\text{eV}$ ) [4].

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».

#### Список литературы

1. Petraru A., Schubert J., Schmid M., Buchal Ch. Ferroelectric  $\text{BaTiO}_3$  thin-film optical waveguide modulators // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 81, N 8. – P. 1375 (3 pages).
2. Lashkovskaya E. I., Gaponenko N. V., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Andreev B. A., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Martynov I. L., Chistyakov A. A., Kargin N. I., Labunov V. A., Raichenok T. F., Tikhomirov S. A., Timoshenko V. Yu. Optical properties and upconversion luminescence of  $\text{BaTiO}_3$  xerogel structures doped with erbium and ytterbium // Gels. — 2022. — Vol. 8, N 6. — P. 347 (15 pages).
3. Gaponenko N. V., Staskov N. I., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Karnilava Yu. D., Lashkovskaya E. I., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Martynov I. L., Chistyakov A. A., Kargin N. I., Labunov V. A., Radyush Yu. V., Chubenko E. B., Timoshenko V. Yu. Upconversion luminescence from sol-gel-derived erbium- and ytterbium-doped  $\text{BaTiO}_3$  film structures and the target form // Photonics. — 2023. — Vol. 10, N 4. — P. 359 (12 pages).
4. Staskov N. I., Sotsky A. B., Miheev S. S., Gaponenko N. V., Kholov P. A., Raichenok T. F. Optical characteristics of annealed barium titanate films formed by the sol-gel method // J. Appl. Spectrosc. – 2021. – Vol. 87, N 6. – P. 1050 – 1056.