

**Н.И. Стаськов¹, П.А. Холов², Л.И. Сотская³,
Н.В. Гапоненко², Н.А. Крекотень⁴**

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

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

³ГУВПО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь

⁴Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл»,
Минск, Беларусь

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ НА КВАРЦЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Введение

Титанат бария (BaTiO_3) является сегнетоэлектрическим материалом, который имеет перовскитную структуру. Пленки титаната бария (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 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

были получены на кварцевых подложках золь-гель технологией, комбинированным спектрофотометрическим методом, основанным на измерениях спектров пропускательной способности $T(\lambda)$ и отношения отражательных способностей $R_p(\lambda)/R_s(\lambda) = [\text{tg}\psi(\lambda)]^2$.

1. Определения геометрических и оптических характеристик пленок титаната бария

Для формирования пленок титаната бария использовались разработанные золи на основе $\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$ и $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$. Методом центрифугирования с последующей сушкой и термообработкой при 450°C были сформированы пленки на кварцевых подложках. Методом растровой электронной микроскопии на установке Hitachi S-4800 установлено, что пленки являются рентгеноаморфными. Спектры пропускательных способностей $T(\lambda)$ пленок (рисунок 1, кривая 1) измеряли на спектрофотометре Cary-500 при угле падения 0° в диапазоне от 200 нм (6,2 эВ) до 800 нм (1,5 эВ). Спектры эллипсометрических углов $\psi(\lambda)$ (рис. 2) и $\Delta(\lambda)$ этого образца измеряли при углах падения 52° (кривая 1) и 55° (кривая 2) на спектральном эллипсометре UVISEL 2 (HORIBA). Для определения оптических характеристик подложек измеряли спектры ее эллипсометрических углов $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ до нанесения пленки.

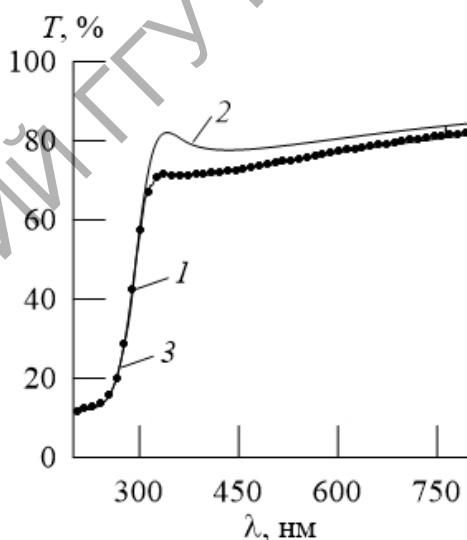


Рисунок 1 – Измеренные (1) и рассчитанные (2, 3) спектры $T(\lambda)$ пленки BaTiO_3 на кварцевой подложке

2. Обсуждение результатов

Дисперсионную зависимость показателей преломления и поглощения BaTiO_3 от энергии фотона E определили по формулам

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

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

$$B = f_j \Gamma_j^{-1} \left[\Gamma_j^2 - (E_j - E_g)^2 \right], \quad C = 2f_j \Gamma_j (E_j - E_g).$$

$E = 1240\lambda^{-1}$ – энергия фотона в электронвольтах (длина волны λ берется в нанометрах), которые использовали для определения оптических характеристик SrTiO₃ [4]. Для этого с помощью программного обеспечения DeltaPsi2 спектрального эллипсометра по измеренным спектрам $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ пленки на подложке рассчитали пять параметров: $n_\infty = 1,823$; $E_j = 4,370$ эВ; $f_j = 0,262$; $\Gamma_j = 0,892$ эВ; $E_g = 3,420$ эВ и толщину пленки 62.9 нм. При этом невязка соответствующих измеренных и рассчитанных спектров $\chi^2 = 1,67$. Большая величина χ^2 обусловлена несоответствием модели (1) дисперсионным функциям реальной пленки в области края полосы поглощения BaTiO₃ (рисунок 2, кривые 1 и 3, 2 и 4).

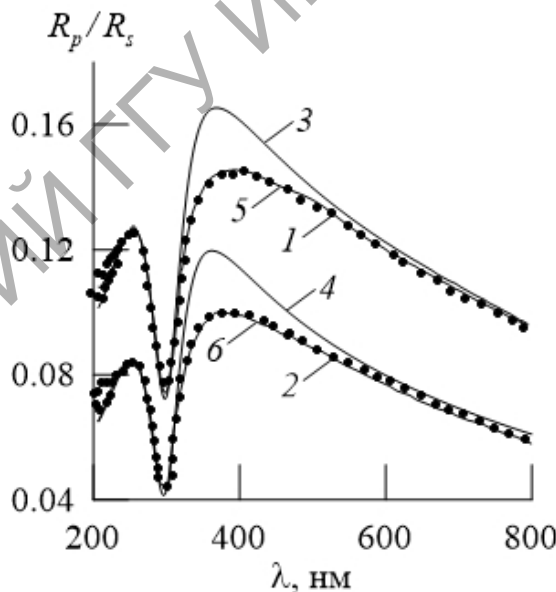


Рисунок 2 – Измеренные (1, 2) и рассчитанные (3 – 6) спектры $R_p(\lambda)/R_s(\lambda)$ пленки BaTiO₃ на кварцевой подложке при углах падения 52° (1, 3, 5) и 55° (2, 4, 6)

К тому же в этой спектральной области нет соответствия между измеренными и рассчитанными спектрами $T(\lambda)$ (рисунок 1, кривые 1 и 2). Функции $n(\lambda)$ (кривая 1) и $k(\lambda)$ (кривая 2) приведены на рисунке 3.

Расчет спектров $T(\lambda)$ проводили по формулам для пленки на подложке из работы [5]. Дисперсионная модель (1) предполагает, что BaTiO_3 при $\lambda > 1240/E_g$ является не поглощающим материалом ($k(\lambda)=0$) (рисунок 3, кривая 2), а его прозрачность определяется лишь спектром $n(\lambda)$ (кривая 1). Нами разработана специальное программное обеспечение, позволяющее, не прибегая к каким либо моделям на прямую по измеренным спектрофотометрическим величинам $T(\lambda)$ и $\psi(\lambda)$ на основании формул для электродинамической модели пленка – подложка методом наименьших квадратов рассчитывать спектры $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ и толщину пленки. Спектры $n(\lambda)$ (кривая 3), $k(\lambda)$ (кривая 4) исследуемой пленки, определенные комбинированным спектрофотометрическим методом, приведены на рисунке 3.

На рисунках 1 и 2 приведены рассчитанные по кривым (1, 2, рисунок 3) спектры $T(E)$ (кривая 3) и $\psi(E)$ (кривые 5, 6). В этом случае наименьшая невязка рассчитанных и измеренных спектров $\chi^2=0,08$.

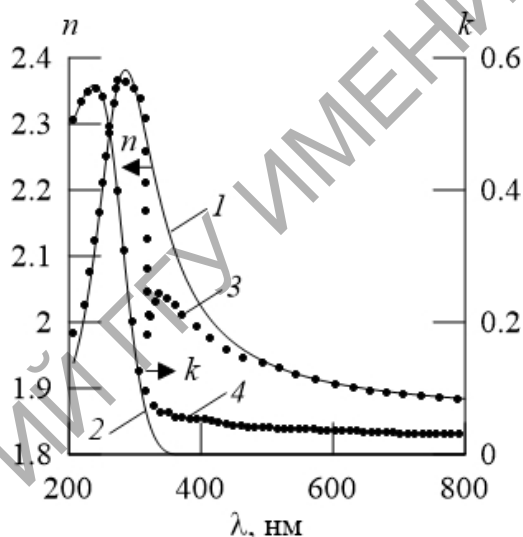


Рисунок 3 – Спектры $n(\lambda)$ (1, 3), $k(\lambda)$ (2, 4) пленки титаната бария

Заключение

После расчета спектра коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)=4\pi k(\lambda)/\lambda$ появляется возможность на основании экстраполяции Тауца $(\alpha(\lambda)E)^{0.5}=B(E-E_g)$ определить ширину запрещенной энергетической зоны BaTiO_3 . В этом выражении B – постоянная. Пересечение линейного участка зависимостей $(\alpha(\lambda)E)^{0.5}$ с осью E дает оценку $E_g=3,6$ эВ.

Величина степени при определении функций Тауца указывает, что поглощение света вызвано не прямозонными переходами электронов в BaTiO_3 . Наличие длинноволнового "хвоста" Урбаха на спектре $k(\lambda)$ может быть связано не только с электронными уровнями в запрещен-

ной зоне, но и с неоднородностями структуры пленок, которые приводят к рассеянию света.

Таким образом, комбинированный метод, включающий спектрофотометрические и эллипсометрические измерения, позволяет определить основные оптические характеристики пленок BaTiO₃.

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. Холов, П.А. Золь-гель синтез и перспективы применения пленок титаната бария / П.А. Холов, М.В. Руденко, Н.В. Гапоненко // Доклады БГУИР. – 2017. – №4(106). – С. 32–36.

2. Manasa, S. Effect of heat treatment on the optical properties of sol-gel derived, fully dielectric solar control coatings on glass / S. Manasa, R. Subasri // J. Coat. Technol. Res. – 2016. – Vol.13 (4). – P. 623–628.

3. Аззам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Аззам, Н. Башара: перевод с англ. под ред. А.В. Ржанова, К.К. Свиташева. – М.: Изд-во «Мир», 1981. – 582 с.

4. Оптические характеристики пленок титаната стронция, полученных золь-гель методом / Н.И. Стаськов [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125, вып. 4. – С. 473–478.

5. 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.

Д.С. Тарасов, М.П. Самцов, А.А. Луговский, А.С. Сташевский
НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

ГЕНЕРАЦИЯ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВЫМИ КРАСИТЕЛЯМИ С ОБЪЕМНЫМИ ЗАМЕСТИТЕЛЯМИ

Введение

Катионные полиметиновые красители (ПК) благодаря большому разнообразию фотофизических процессов с их участием нашли широкое распространение в ряде областей человеческой деятельности [1].