

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ  
В АНИЗОТРОПНЫХ НАНОМАТЕРИАЛАХ С КВАЗИНУЛЕВОЙ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ**

© 2016 г. К.К. АЛТУНИН

ФГБОУ ВО "Ульяновский государственный педагогический  
университет имени И. Н. Ульянова"  
e-mail: kostya\_altunin@mail.ru

Оптические эффекты в анизотропных наноматериалах исследуем в данной статье на основе классических формул для амплитуд отражённой и прошедшей внутрь подстилающей среды волн. В классических формулах оптические свойства слоя характеризуются комплексным показателем преломления нанокompозитной плёнки и показателями преломления обрамляющих сред.

Амплитуду  $s$ -поляризованной волны, отраженной от нанокompозитной плёнки, находящейся на поверхности полубесконечной оптической среды с комплексным показателем преломления  $n_3 + i\kappa_3$  вычислим по классической формуле [1]:

$$r_1^s = E_0^s \frac{r_{12}^s + r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}. \quad (1)$$

Амплитуду  $s$ -поляризованной волны, прошедшей через нанокompозитную плёнку в среду 3, определим как

$$t_1^s = E_0^s \frac{t_{12}^s t_{23}^s \exp(i\phi_1)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}. \quad (2)$$

где  $E_0^s$  - амплитуда  $s$ -поляризованной внешней волны,

$$\phi_1 = k_0 d_2 (n_2 + i\kappa_2) \cos \theta_2. \quad (3)$$

$k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  - длина волны падающего излучения,  $d_2$  - толщина нанокompозитной плёнки,  $\theta_1$  - угол падения внешней оптической волны,  $\theta_2$  - угол преломления в среде 2,  $\theta_3$  - угол преломления в среде 3,  $r_{12}^s$  и  $r_{23}^s$  - френелевские коэффициенты отражения на границах 1-2 и 2-3 соответственно,  $t_{12}^s$  и  $t_{23}^s$  - френелевские коэффициенты пропускания оптического излучения на границах 1-2 и 2-3 соответственно,

$$r_{ik}^s = \frac{(n_i + i\kappa_i) \cos \theta_i - (n_k + i\kappa_k) \cos \theta_k}{(n_i + i\kappa_i) \cos \theta_i + (n_k + i\kappa_k) \cos \theta_k}, \quad (4)$$

$$t_{ik}^s = \frac{2(n_i + i\kappa_i) \cos \theta_i}{(n_i + i\kappa_i) \cos \theta_i + (n_k + i\kappa_k) \cos \theta_k}, \quad (5)$$

$i, k$  - индексы, нумерующие среду. Связь между углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  определим из равенства

$$(n_2 + i\kappa_2) \sin \theta_2 = \sin \theta_1, \quad (6)$$

которое может быть реализовано в различных физических ситуациях.

Поле в нанокompозитной плёнке складывается из преломлённой волны на границе сред 1 и 2 (амплитуда  $E_1^s$ ) и волны, отражённой от границы 2-3 (амплитуда  $E_2^s$ ). Из граничных условий определим поле на границе 1-2

$$E_1^s = E_0^s \frac{t_{12}^s}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}, \quad (7)$$

а также напряжённость электрического поля внутри нанокompозитной плёнки вблизи границы 2-3,

$$E_2^s = E_0^s \frac{t_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}. \quad (8)$$

Предположим, что выполняется следующее равенство

$$r_{23}^s \exp(2i\phi_1) = -r_{12}^s, \quad (9)$$

Это равенство может быть реализовано, если показатель преломления пленки обращается в нуль, то есть  $n_2 = \kappa_2 = 0$ . Тогда из формулы (2) при  $n_2 = \kappa_2 = 0$  получим равенство [2]:

$$t_1^s = E_0^s \exp(i\phi_1), \quad (10)$$

которое выполняется при любых углах падения внешнего излучения на композитную плёнку, находящуюся на подложке. Пропускательная способность слоя 2-3 равна

$$T_1 = \frac{n_3 \cos \theta_3 |t_1^s|^2}{n_1 \cos \theta_1 |E_0^s|^2}. \quad (12)$$

Применяя методы компьютерного моделирования, найдём следующие зависимости отражательной способности и пропускательной способности как функции длины волны внешнего оптического излучения. Составлена компьютерная программа для расчёта оптического отражения и пропускания нанокompозитной плёнки, расположенной на различных подложках. На рис. 1-17 представлены результаты численных расчётов. Из графиков видно, что можно управлять значениями оптического отражения и пропускания нанокompозитной плёнки при помощи изменения параметров нанокompозита таких, как радиус наночастиц серебра и фактор заполнения наночастицами нанокompозитной плёнки.

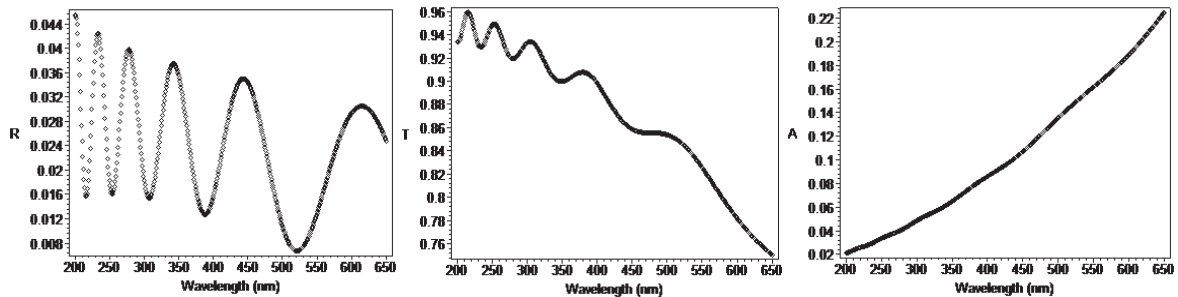


Рис. 1. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (б) и поглощательной способности (в) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 2\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из стекла.

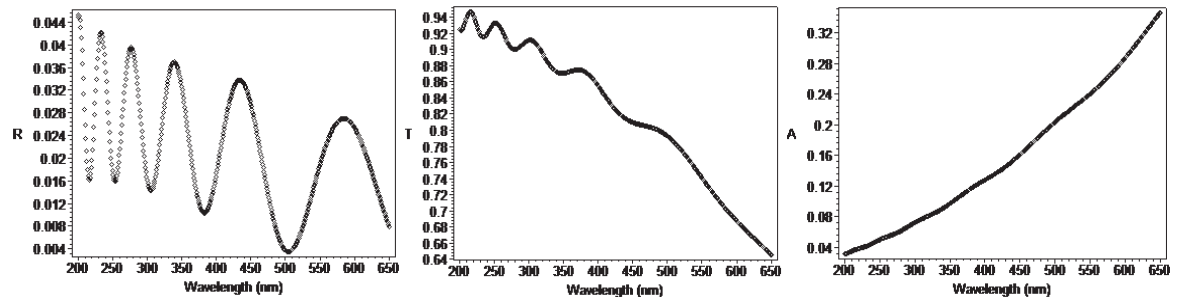


Рис. 2. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (б) и поглощательной способности (в) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 3\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из стекла.

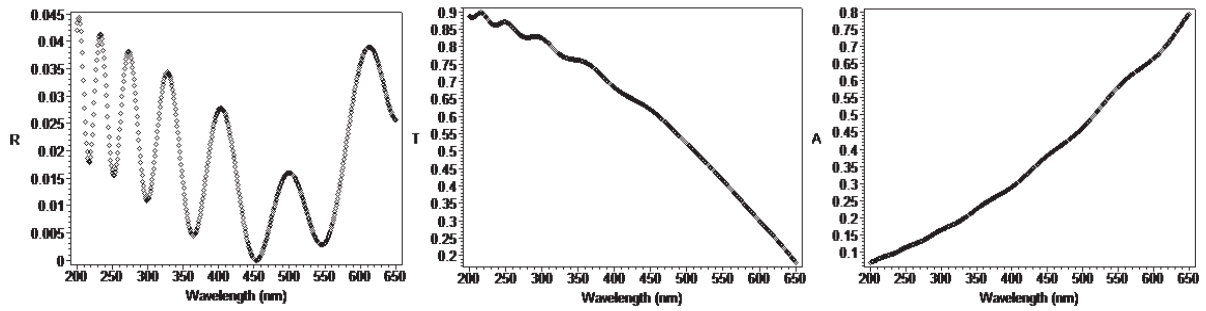


Рис. 3. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 7\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из стекла.

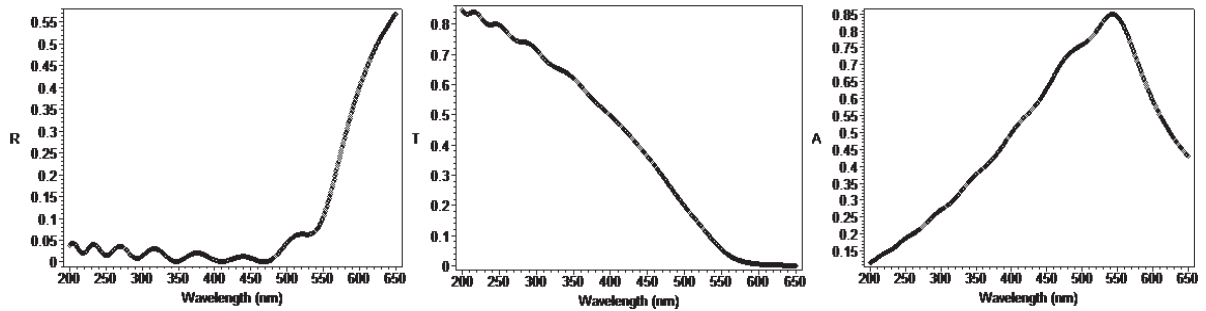


Рис. 4. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 12\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из стекла.

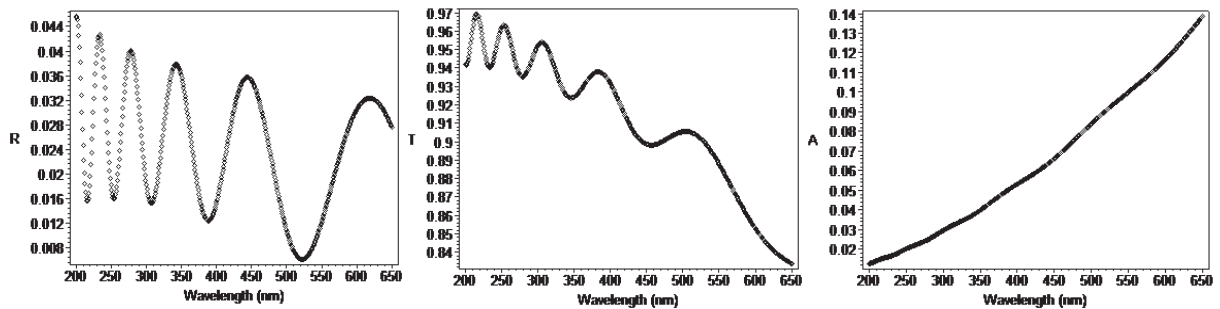


Рис. 5. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 2\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 4.5$  нм, расположенными на подложке из стекла.

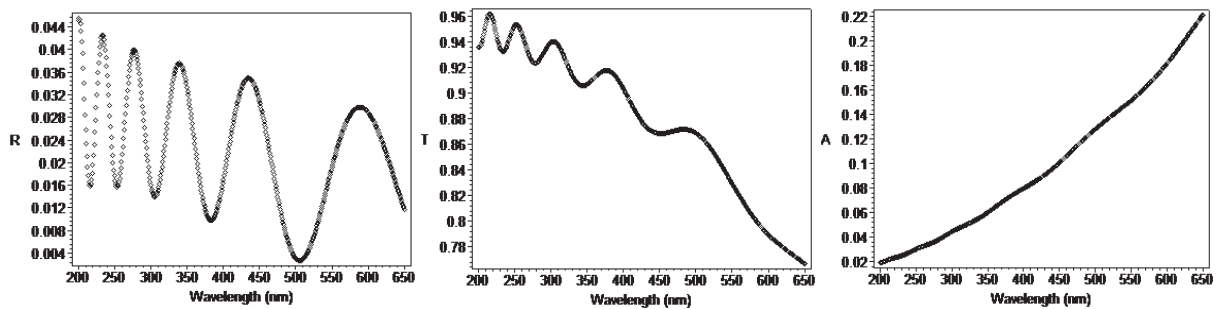


Рис. 6. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 3\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 4.5$  нм, расположенными на подложке из стекла.

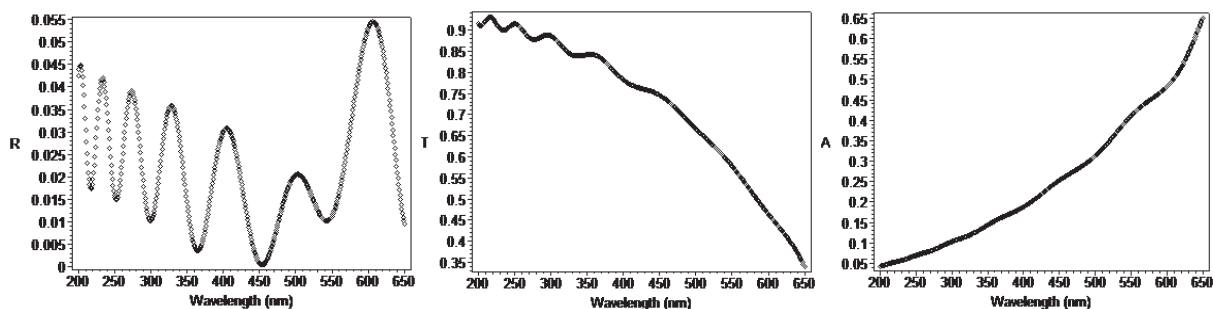


Рис. 7. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 7\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 4.5$  нм, расположенными на подложке из стекла.

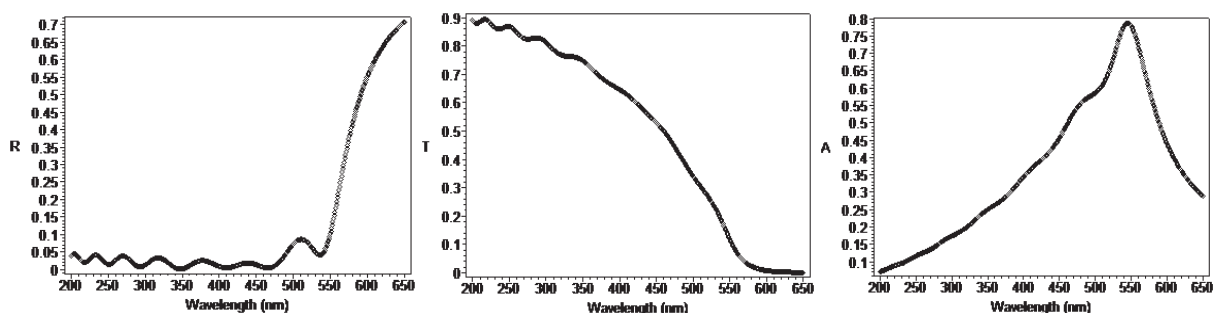


Рис. 8. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 12\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 4.5$  нм, расположенными на подложке из стекла.

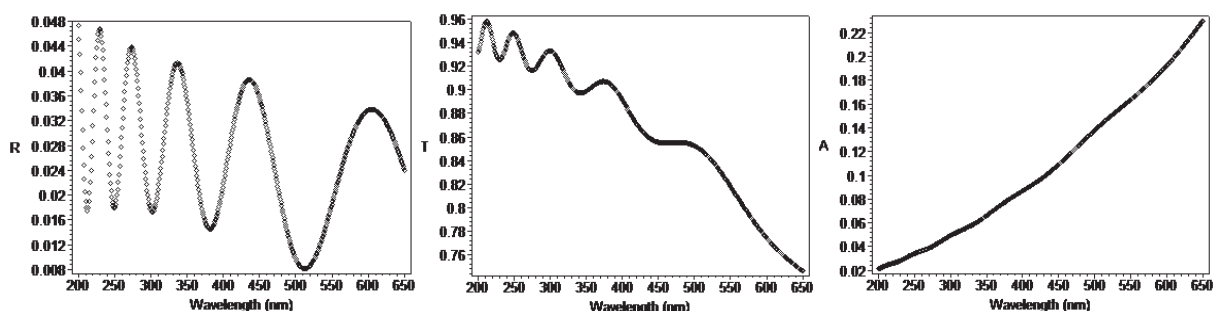


Рис. 9. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 15^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 2\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из стекла.

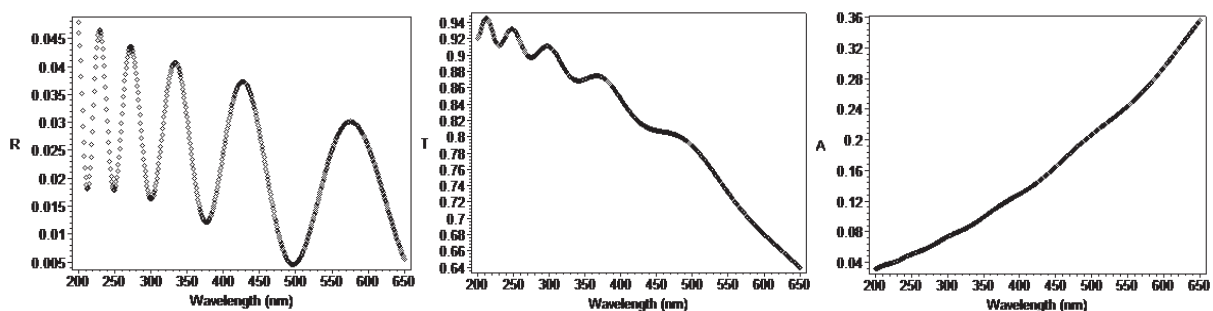


Рис. 10. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 15^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 3\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из стекла.

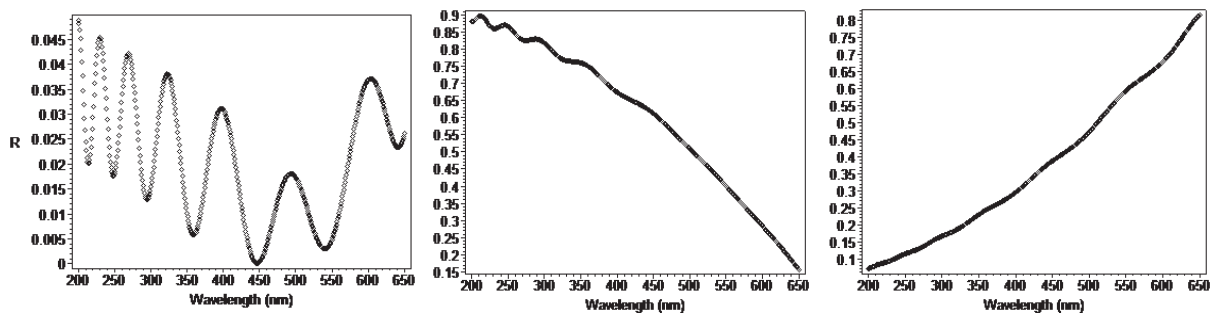


Рис. 11. Зависимости отражательной способности (a), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (c) от длины волны излучения при  $\theta = 15^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 7\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из стекла.

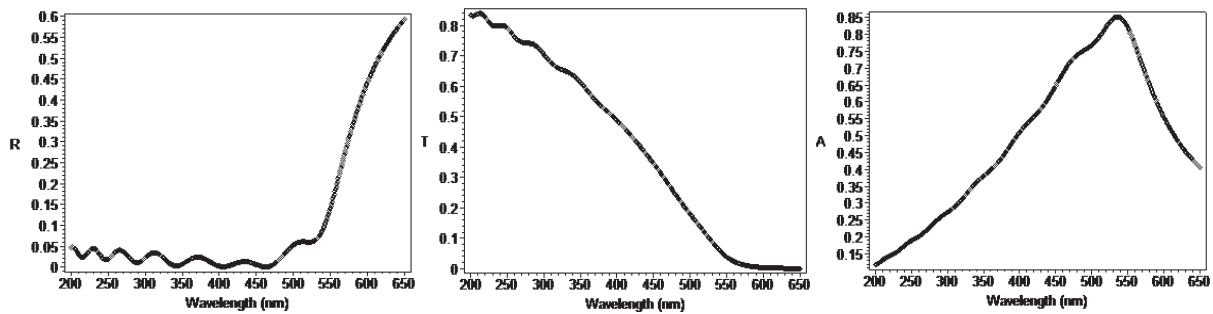


Рис. 12. Зависимости отражательной способности (a), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (c) от длины волны излучения при  $\theta = 15^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 12\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из стекла.

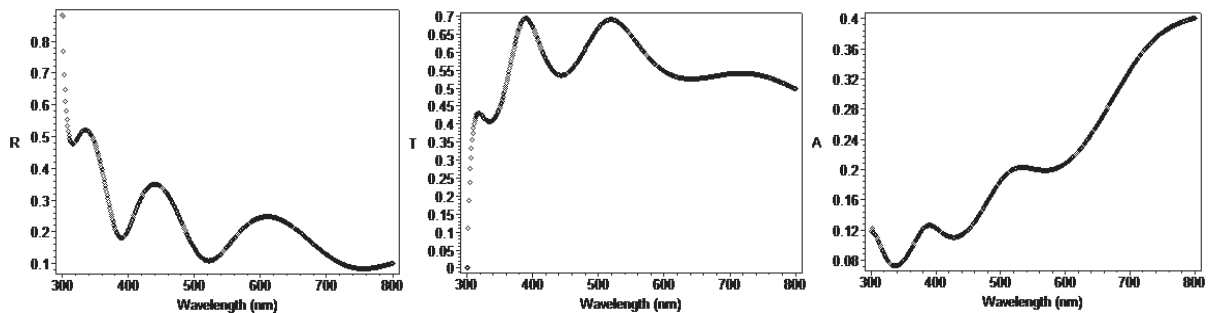


Рис. 13. Зависимости отражательной способности (a), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (c) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 2\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из кремния.

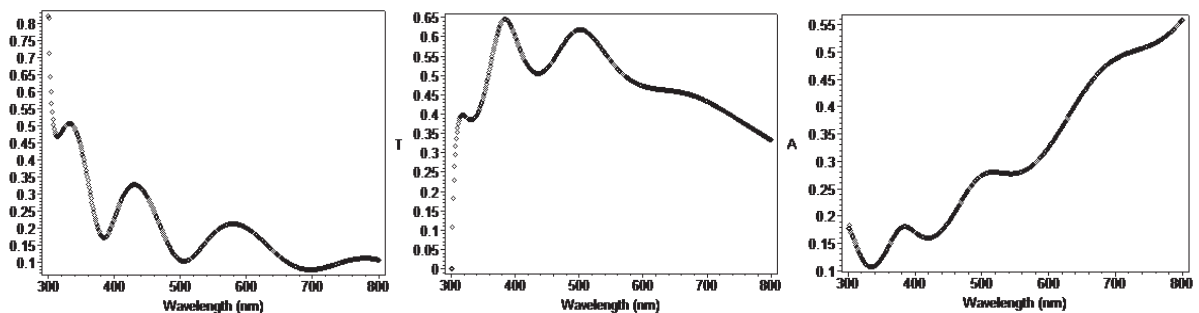


Рис. 14. Зависимости отражательной способности (a), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (c) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 3\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из кремния.

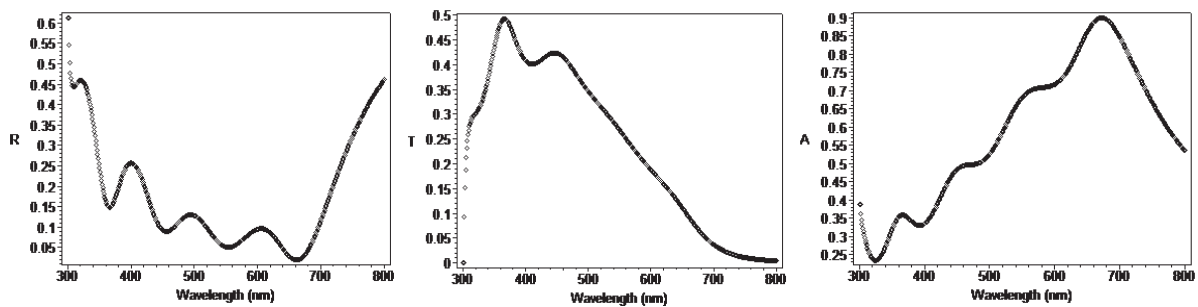


Рис. 15. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 7\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из кремния.

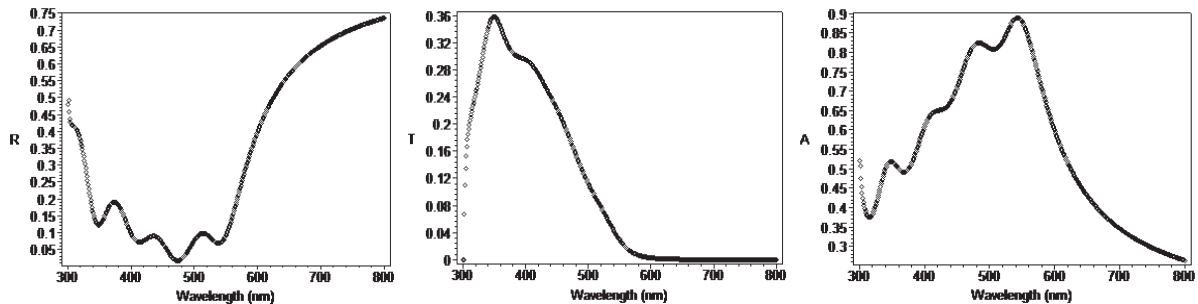


Рис. 16. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения при  $\theta = 0^\circ$  для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 12\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из кремния.

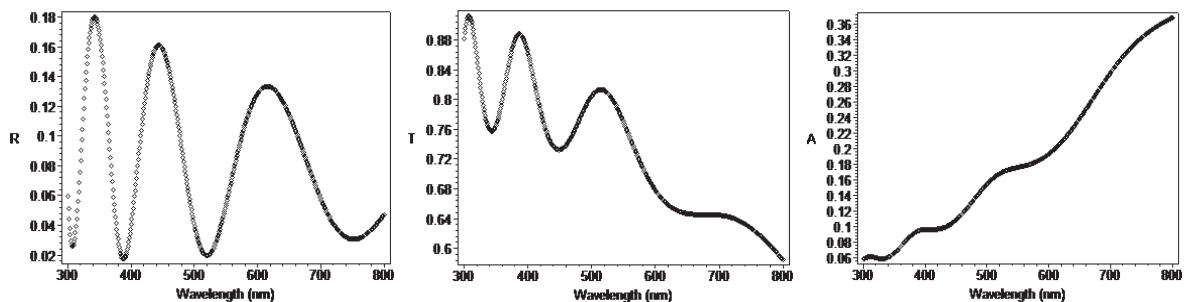


Рис. 17. Зависимости отражательной способности (а), пропускательной способности (b) и поглощательной способности (с) от длины волны излучения для нанокompозитной плёнки толщиной  $d = 500$  нм из полиметилметакрилата (PMMA) с весовым содержанием  $f = 2\%$  наночастиц серебра радиусом  $a = 2.25$  нм, расположенными на подложке из  $\text{TiO}_2$ .

Наноматериалы (PMMA+Ag) обладают большей прозрачностью, чем плёнки PMMA без наночастиц серебра, и обеспечивают оптическое просветление поверхностей композитных сред. Исследования оптического пропускания (PMMA+Ag) плёнок различной толщины показывают, что (PMMA+Ag) наноматериалы обладают пониженным оптическим отражением и малым поглощением при достижении квази нулевых значений показателя преломления. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых антиотражающих покрытий из нанокompозитных материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматгиз, 2001. 656 с.
2. Гадомский О.Н., Алтунин К.К., Ушаков Н.М. Идеальное оптическое просветление композитных плёнок, активированных сферическими наночастицами. // Письма в ЖЭТФ 2009. Т. 90, N.4, с. 273-278. [JETP Letters, 2009, Vol. 90, N.4, pp. 251-256].