

УДК 535.36

Мискевич А. А., Лойко В. А., Лойко Н. А., Базылевич В. А., Нестерович Д. Е.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОНОСЛОЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ НА ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА СРЕДОЙ, В КОТОРОЙ ОНИ РАСПРЕДЕЛЕНЫ

Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

Разработан метод описания оптических свойств системы «монослой сферических частиц в поглощающей среде» при падении под произвольным углом плоской волны с произвольной поляризацией, учитывающий многократное рассеяние волн. Исследовано влияние параметров монослоя (размера, показателя преломления, типа пространственной упорядоченности частиц и фактора заполнения монослоя) на поглощение света средой, в которой он расположен. Показано, что, используя частично упорядоченный монослой частиц, можно увеличить коэффициент поглощения среды более чем в 3 раза в требуемом интервале длин волн по сравнению с однородным слоем среды той же толщины. Используя сильно упорядоченный монослой это увеличение может быть больше 20 в узких спектральных интервалах, соответствующих «решёточным резонансам».

Предложенный нами в работах [1-4] метод описания оптических свойств монослоя сферических частиц (светопоглощающих или непоглощающих) в *непоглощающей* среде развит на случай описания рассеивающих и поглощающих свойств системы «монослой сферических частиц в *поглощающей* среде» при падении под произвольным углом плоской волны с произвольной поляризацией (Рис. 1). Он учитывает многократное рассеяние волн, основан на использовании квазикристаллического приближения (ККП), приближения среднего поля и мультипольного разложения полей и функции Грина по векторным сферическим волновым функциям.

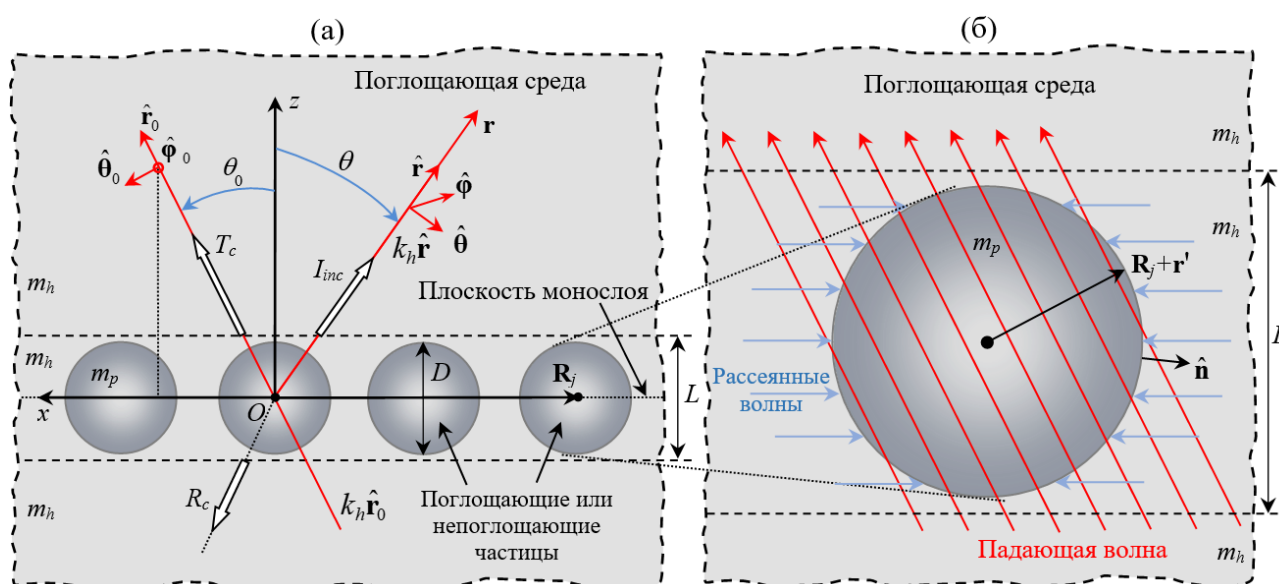


Рисунок 1 – Схематическое изображение: (а) монослоя однородных сферических частиц в однородной поглощающей среде (матрице) и геометрии освещения и регистрации рассеянного излучения (вид вдоль плоскости монослоя), (б) отдельной частицы монослоя, находящейся в «эффективном» поле, образованном падающей волной и волнами, рассеянными всеми частицами монослоя. m_h и m_p – комплексные показатели преломления среды и частиц, \mathbf{R}_j и $\mathbf{R}_j + \mathbf{r}'$ – радиус-векторы центра и элементарной площадки на поверхности j -й частицы относительно начала координат O , находящегося в центре произвольно выбранной частицы, $\hat{\mathbf{r}}_0, \hat{\boldsymbol{\theta}}_0, \hat{\boldsymbol{\phi}}_0$ и $\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\boldsymbol{\phi}}$ – единичные векторы, определяемые направлением волнового вектора падающей, $k_h \hat{\mathbf{r}}_0$, и рассеянной, $k_h \hat{\mathbf{r}}$, волн, θ_0 и θ – полярные углы волнового вектора падающей и рассеянной волн, \mathbf{r} – радиус-вектор точки наблюдения, T_c и R_c – коэффициенты когерентного пропускания и отражения системы, состоящей из монослоя частиц с диаметром D и слоя матрицы с толщиной L . I_{inc} – интенсивность некогерентно рассеянного излучения.

Секция 1. Прикладные проблемы оптики и спектроскопии

Получены формулы для описания углового распределения рассеянного излучения $I_{inc}^{rd}(\hat{\mathbf{r}}) = I_{inc,0}^{rd}(\hat{\mathbf{r}})e^{-2xq\beta_h(1/\mu_0+1/|\mu|)}$, коэффициентов когерентного пропускания $T_c = T_{c,0} e^{-4xq\beta_h/\mu_0}$ и отражения $R_c = R_{c,0}e^{-4xq\beta_h/\mu_0}$, некогерентного рассеяния $F_{inc} = \int d\varphi \int I_{inc}^{rd}(\hat{\mathbf{r}}) \sin\theta d\theta$, поглощения $A=1-T_c-R_c-F_{inc}$ слоя среды толщины L (Рис. 1), содержащего монослой, где

$$I_{inc,0}^{rd}(\mathbf{r}) = \frac{16\pi\eta S_2 SE_0^2}{x^2(1+\beta_h^2)r^2} \left\{ \left[\sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \alpha_{ml} \left[i\varepsilon_\varphi \sin(m\varphi) a_{ml}(\mu) + \varepsilon_\theta \cos(m\varphi) b_{ml}^+(\mu) \right] \right]^2 + \left[\sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \alpha_{ml} \left[i\varepsilon_\theta \sin(m\varphi) c_{ml}(\mu) + \varepsilon_\varphi \cos(m\varphi) d_{ml}^+(\mu) \right] \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

$$T_{c,0} = \left| \varepsilon_\theta \left\{ 1 - \frac{8\pi\eta}{x^2(1+i\beta_h)^2 \mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \alpha_{ml} \left[m\pi_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlM}^{(o)} + \tau_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlE}^{(e)} \right] \right\} \right|^2 + \left| \varepsilon_\varphi \left\{ 1 - \frac{8\pi\eta}{x^2(1+i\beta_h)^2 \mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \alpha_{ml} \left[m\pi_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlE}^{(o)} + \tau_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlM}^{(e)} \right] \right\} \right|^2, \quad (2)$$

$$R_{c,0} = \left| \frac{\varepsilon_\theta 8\pi\eta}{x^2(1+i\beta_h)^2 \mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l (-1)^{l-m} \alpha_{ml} \left[m\pi_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlM}^{(o)} - \tau_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlE}^{(e)} \right] \right|^2 + \left| \frac{\varepsilon_\varphi 8\pi\eta}{x^2(1+i\beta_h)^2 \mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l (-1)^{l-m} \alpha_{ml} \left[m\pi_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlE}^{(o)} - \tau_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlM}^{(e)} \right] \right|^2, \quad (3)$$

а также коэффициента поглощения частиц A_p монослоя

$$A_p = -\frac{2\eta n_h e^{-2x\beta_h q / \cos\theta_0}}{x^2 \cos\theta_0} \operatorname{Re} \left[\frac{i}{m_p} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{l(l+1)(l+m)!}{(2l+1)(l-m)!} \left\{ \left[\left| a_{mlM}^{(e)} \right|^2 (1+\delta_{0m}) + \left| a_{mlM}^{(o)} \right|^2 (1-\delta_{0m}) \right] \tilde{\psi}_l \tilde{\psi}_l'^* \right\} \right. \\ \left. - \left[\left| a_{mlE}^{(e)} \right|^2 (1+\delta_{0m}) + \left| a_{mlE}^{(o)} \right|^2 (1-\delta_{0m}) \right] \tilde{\psi}_l^* \tilde{\psi}_l' \right\} \right] \quad (4)$$

и среды $A_h = A - A_p$, в которой они расположены. В (1)-(4) $q=L/D$, $\mu=\cos\theta$, $\mu_0=\cos\theta_0$, $\beta_h=\kappa h/n_h$, η – фактор заполнения монослоя, $x=\pi D n_h/\lambda$ – параметр дифракции частицы, λ и ε_θ , ε_φ – длина и компоненты вектора поляризации падающей волны, $r=|\mathbf{r}|$, S_2 и S – структурный фактор и площадь монослоя, “видимая” приёмником, $\pi_l^{(m)}$, $\tau_l^{(m)}$ – угловые функции, ψ_l , $\tilde{\psi}_l$ – функции Риккати-Бесселя, коэффициенты $a_{ml}(\mu)$, $c_{ml}(\mu)$, $b_{ml}^+(\mu)$, $d_{ml}^+(\mu)$ и $a_{mlM(E)}^{(e,o)}$ находятся через коэффициенты $d_{mlM(E)}^{(e,o)}$ [5], входящие в (2), (3).

При разработке и оптимизации устройств на основе слоёв частиц часто требуется увеличить поглощение света средой (матрицей) либо в широком диапазоне длин волн, например, в солнечных элементах, либо в относительно узком спектральном интервале, например, в химических фотореакторах, где важно максимизировать использование падающего света в полосе поглощения фотосенсибилизатора. На основе полученных выражений нами проведён анализ коэффициента поглощения A_h слабопоглощающей среды с комплексным показателем преломления $m_h=1.343+0.001i$ при разных параметрах монослоя с целью увеличения поглощения света средой в области полосы поглощения ($\lambda \approx 0.660$ мкм) фотосенсибилизатора Methylene Blue (MB), используемого в фотокаталитических реакциях.

На Рис. 2 приведены результаты расчета коэффициента поглощения среды A_h , содержащей монослой частиц, а также коэффициента поглощения A_h^{et} однородного слоя среды той же толщины и отношения A_h/A_h^{et} для разных материалов частиц. Показаны зависимости для параметров монослоя, при которых в полосе поглощения MB имеют место максимумы A_h и A_h/A_h^{et} . Из Рисунков 2а,б видно, что при достаточно большом контрасте m_p и m_h эти максимумы реализуются в достаточно узком диапазоне диаметров частиц ($0.25 \text{ мкм} \leq D \leq 0.36 \text{ мкм}$) и факторов заполнения монослоя ($0.3 \leq \eta \leq 0.5$) и имеют достаточно близкие значения. Из Рис. 2б видно, что отношение A_h/A_h^{et} в области максимума близко для большинства рассмотренных систем, кроме случаев $m_p=m_{Al}$ и $m_p=m_{Al_2O_3}$, что может быть обусловлено большим значением κ_{Al} и малым $n_{Al_2O_3}$, соответственно. Анализ результатов расчётов показывает:

(i) использование монослоёв диэлектрических непоглощающих частиц с малым показателем преломления (Al_2O_3 , SiO_2) практически не даёт увеличения ($m_p=m_{\text{Al}_2\text{O}_3}$) либо уменьшает ($m_p=m_{\text{SiO}_2}$) A_h и A_h / A_h^{et} , (ii) использование сильно упорядоченных монослоёв (Рис. 2в,г) позволяет получить большие значения A_h и A_h / A_h^{et} в узких интервалах длин волн, соответствующих «решётчным резонансам», которые значительно превышают соответствующие значения для частично упорядоченных систем, A_h^{po} , A_h^{po} / A_h^{et} , показанных пунктирными линиями.

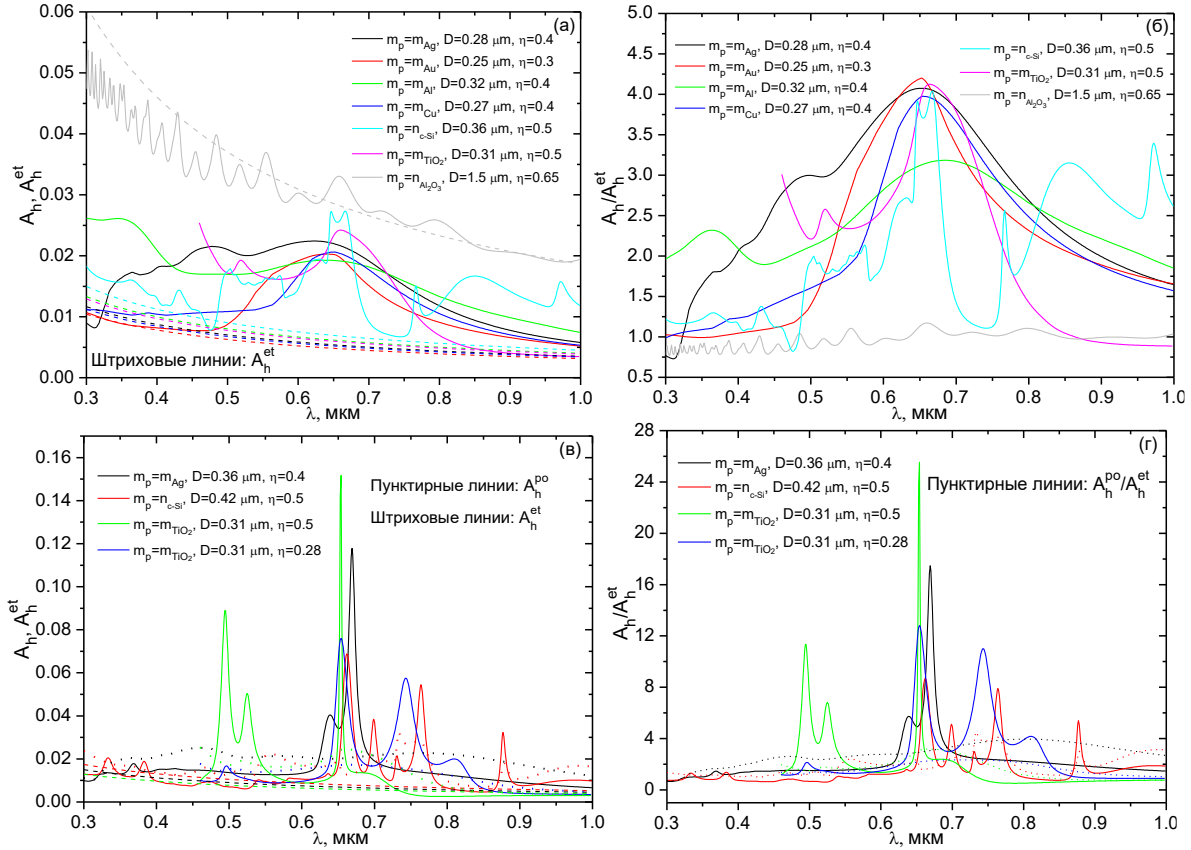


Рисунок 2 – Спектральные зависимости (а, в) коэффициентов A_h , A_h^{et} , (б, г) отношений A_h / A_h^{et} системы, состоящей из (а, б) частично упорядоченного монослоя и (в, г) упорядоченного монослоя с неидеальной треугольной решёткой из сферических частиц в среде с $m_h=1.343+0.001i$. $m_p=m_{\text{Ag}}$, $m_p=m_{\text{Au}}$, $m_p=m_{\text{Cu}}$, $m_p=m_{\text{Al}}$, $m_p=m_{\text{c-Si}}$, $m_p=n\text{-TiO}_2$, $m_p=n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $\theta_0=0^\circ$, $L=D$.

Результаты работы могут быть использованы для разработки и оптимизации устройств на основе монослоёв частиц: химических фотореакторов, солнечных элементов, светодиодов и т.д.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект Ф23КИ-020).

Список литературы

1. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, Incoherent component of light scattered by a monolayer of spherical particles: analysis of angular distribution and absorption of light, *JOSA A* 35, 108–118 (2018).
2. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, Scattering and Absorption of Light by a Monolayer of Spherical Particles under Oblique Illumination, *JETP* 131, 227-243 (2020).
3. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, Polarization of light scattered by a two-dimensional array of dielectric spherical particles, *JOSA B* 38(9), C22-C32 (2021).
4. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, “Absorption of diffuse light by 2D arrays of spherical particles,” *J. Quant. Spectr. Rad. Transf.* 289, 108291-1-9 (2022).
5. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, Optical characteristics of a monolayer of identical spherical particles in an absorbing host medium, *JOSA A* 40, 682-691 (2023).