

Как видно из представленных результатов, при увеличении времени термической обработки стекла, возрастает часть ионов тулия в кристаллической фазе, при этом возрастает и часть ионов тулия, которая сосредоточена в рассеивающих (непрозрачных) областях стекломатериала. Таким образом, нами предложен спектроскопический метод определения относительного содержания ионов тулия в стеклянной и кристаллической фазах в оксифторидных стеклокерамиках.

УДК 535.3

РАСЧЕТ ФАКТОРОВ ЭФФЕКТИВНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ, РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВОДЯНЫХ КАПЕЛЬ

Бобученко Д.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Известно, что облака и туманы в нижних слоях состоят из мельчайших капель жидкой воды, а в верхних слоях из кристаллов водяного льда. Для дистанционного зондирования атмосферы и исследования климата и других приложений требуются точные знания ослабления, рассеяния и поглощения совокупностью сферических капель.

Факторы эффективности ослабления Q_{ext} , рассеяния Q_{sca} , поглощения Q_{abs} , и обратного рассеяния Q_b излучения системой частиц, с учетом их распределения по размерам, рассчитывались по формулам:

$$Q_{ext} = \int_0^{\infty} \frac{C_{ext}(r)}{\pi r^2} f(r) dr, \quad (1)$$

$$Q_{sca} = \int_0^{\infty} \frac{C_{sca}(r)}{\pi r^2} f(r) dr, \quad (2)$$

$$Q_{abs} = \int_0^{\infty} \frac{C_{abs}(r)}{\pi r^2} f(r) dr, \quad (3)$$

$$Q_b = \int_0^{\infty} \frac{C_b(r)}{\pi r^2} f(r) dr. \quad (4)$$

В этих формулах r – радиус сферической капли, $f(r)$ – функция распределения капель по размерам, C_{ext} , C_{sca} , C_{abs} , C_b – сечения ослабления, рассеяния, поглощения и обратного рассеяния одной капли.

Предполагалось, что спектр капель по размерам описывается нормальным распределением (распределения Гаусса):

$$f(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(r-r_0)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (5)$$

где r_0 – математическое ожидание (среднее значение), σ – среднеквадратичное отклонение (σ^2 – дисперсия).

Литература

1. Вилейшикова Е.В. Ур-конверсионная люминесценция оксифторидной стеклокерамики с нанокристаллами $PbF_2:(Yb^{3+}, Eu^{3+}, RE^{3+})$ ($RE = Tm, Ho$ или Er) / Е.В. Вилейшикова, П.А. Лойко, Г.Е. Рачковская и др. // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т 83, № 5. – С. 677–685.

2. Yin J.G. Transition Intensities and Excited State Relaxation Dynamics of Tm^{3+} in $Tm:PbF_2$ Crystal / J.G. Yin, Y. Hang, X.H. He, et al // Laser Physics. – 2012. – Vol. 22, No. 3. – Pp. 609–613.

Сечения ослабления C_{ext} , рассеяния C_{sca} , поглощения C_{abs} , обратного рассеяния C_b излучения одной капли определялись по суммированием по рядам [1]:

$$C_{ext} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) Re(a_n + b_n), \quad (6)$$

$$C_{sca} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (7)$$

$$C_{abs} = C_{ext} - C_{sca}, \quad (8)$$

$$C_b = \frac{\pi}{k^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(-1)^n (a_n - b_n) \right|^2, \quad (9)$$

где $k=2\pi/\lambda$, λ – длина волны излучения. В свою очередь коэффициенты a_n , b_n в рядах определялись по формулам:

$$a_n = \frac{\left[\frac{D_n(mx)}{m} + \frac{n}{x} \right] \Psi_n(x) - \Psi_{n-1}(x)}{\left[\frac{D_n(mx)}{m} + \frac{n}{x} \right] \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)}, \quad (10)$$

$$b_n = \frac{\left[mD_n(mx) + \frac{n}{x} \right] \Psi_n(x) - \Psi_{n-1}(x)}{\left[mD_n(mx) + \frac{n}{x} \right] \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)}. \quad (11)$$

В этих выражениях m – относительный комплексный показатель преломления ($m=m_r+im_{im}$), $x = k r$ – безразмерная величина называемая параметром дифракции, функции $\Psi_n(x)$, $\xi_n(x)$ – Риккати-Бесселя, $D_n(y) = \frac{d}{dy} \ln \Psi_n$. Для получения точных результатов, расчет D_n проводился по обратной рекурсии с удвоенной точностью:

$$D_{n-1}(y) = \frac{n}{y} - \frac{1}{D_n(y) + \frac{n}{y}}, \quad (12)$$

$$D_{max} = 0.0 + i0.0. \quad (13)$$

Расчет $\Psi_n(x), \xi_n(x)$ осуществлялся по прямой рекурсии:

$$\Psi_{n+1}(x) = \frac{2n+1}{x} \Psi_n(x) - \Psi_{n-1}(x), \quad (14)$$

$$\Psi_{-1}(x) = \cos x, \quad \Psi_0(x) = \sin x, \quad (15)$$

$$\xi_{-1}(x) = \cos x + i \sin x; \quad (16)$$

$$\xi_0(x) = \sin x - i \cos x. \quad (17)$$

Для выполнения расчетов создана компьютерная программа на языке Python с применением пакетов numpy, scipy, matplotlib, предназначенных для решения научных и математических проблем.

Водяные капли образуются при подъеме теплых слоев воздуха, которые, адиабатически расширяясь, охлаждаются, и находящийся в воздухе водяной пар, достигнув некоторого пересыщения, конденсируется на многочисленных ядрах конденсации. Спектр размеров капель облака зависит от различных условий этих процессов, и различен не только для разных типов облаков, но для облаков одного и того же типа [2]. Большая часть капель имеет радиус 2 до 70 мкм. Вода в каплях не является абсолютно чистой, и может поглощать излучение, поэтому комплексный показатель преломления воды, применяемый в расчетах, принимался равным $m = 1,333 + i \cdot 0,1$.

Расчеты проводились для длины волны 1,064 мкм, так как при зондировании атмосферы часто используются Nd YAG лазеры с такой длиной волны.

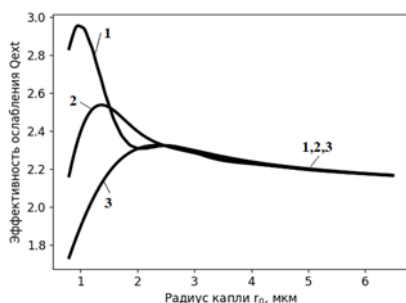


Рисунок 1 – Зависимость фактора эффективности ослабления от радиуса капли, для одной (1); при $\sigma=1,0$ (2); 2,5 (3)

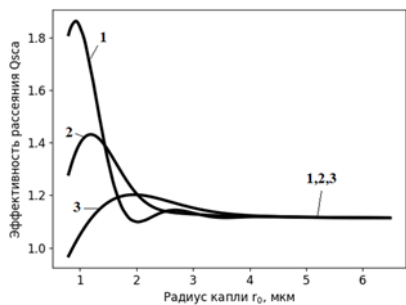


Рисунок 2 – Зависимость фактора эффективности рассеяния от радиуса капли, для одной (1); при $\sigma=1,0$ (2); 2,5 (3)

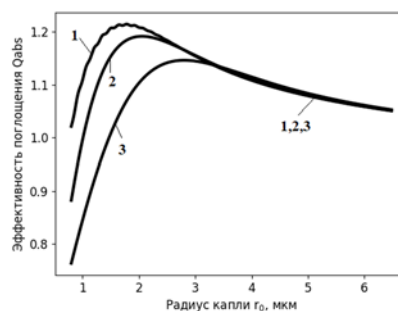


Рисунок 3 – Зависимость фактора эффективности поглощения от радиуса капли, для одной (1); при $\sigma=1,0$ (2); 2,5 (3)

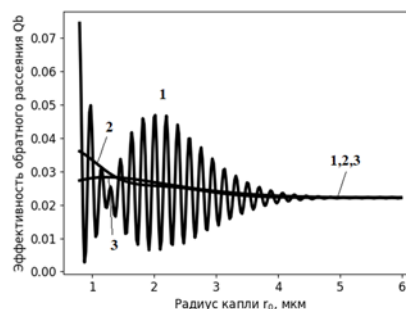


Рисунок 4 – Зависимость фактора эффективности обратного рассеяния от радиуса капли, для одной (1); при $\sigma = 1,0$ (2); 2,5 (3)

Результаты расчетов представлены на рисунках. При r_0 больше 6 мкм приведенные характеристики рассеяния для одной капли и для спектра капель практически совпадают. Для одиночной сферической капли при параметрах дифракции меньше 20 характерно наличие регулярно расположенных резких максимумов и минимумов, называемых «интерференционной структурой». Учет спектра капель по размерам сглаживает эти пики. Кроме того, учет распределения капель по размерам и величина среднеквадратичного отклонения σ («ширина» спектра распределения) также существенно изменяют величины характеристик рассеяния по сравнению с тем, если бы частицы имели одинаковый размер. Эффективности ослабления и рассеяния для капель $r_0 < 3$ мкм становятся тем меньше, чем больше σ , поскольку увеличивается доля малых капель, которые имеют меньшие значения эффективностей. По этой же причине уменьшается эффективность поглощения. Эффективность обратного рассеяния становится значительно более гладкой, отсутствуют характерные для одиночных капель осцилляции.

В целом, результаты работы показали существенную роль учета распределения капель по размерам при анализе характеристик рассеяния излучения.

Литература

1. Борен К., Хафман Д.Р. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.
2. Л.Дж.Баттан. Человек будет изменять погоду. Л.: Гидромет, 1965.