

ПЛАВЛЕННЫЙ КВАРЦ – КОМПОЗИТНЫЙ НАНОСТРУКТУРНЫЙ  
МАТЕРИАЛ

© 2009 г. В. К. Милославский, Е. Д. Маковецкий, Л. А. Агеев, К. С. Белошенко

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61077 Харьков, Украина

E-mail: Vladimir.K.Miloslavsky@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 26.03.2009 г.

Предложен и осуществлен способ расчета показателя преломления оптического плавленого кварца с помощью модели эффективной диэлектрической проницаемости композитных однородных сред. При расчете использовались табличные данные показателя преломления кристаллического  $\alpha$ -кварца и соотношение плотностей кварцевого стекла и  $\alpha$ -кварца. Предположено, что плавленый кварц содержит поры нанометрового размера с фактором заполнения стекла  $q$ , погруженные в матрицу с плотностью, отличающейся от плотности  $\alpha$ -кварца в  $k$  раз, где  $k$  чуть меньше 1. Установлено, что модель Максвелла Гарнетта позволяет вычислить показатель преломления кварцевого стекла и его дисперсию в области прозрачности ( $404 \text{ нм} \leq \lambda \leq 671 \text{ нм}$ ) с отклонением менее 0.0002 от табличных значений. Согласие между расчетными и экспериментальными значениями достигнуто при  $q = 0.155$  и  $k = 0.986$ .

PACS: 42.25. Bs, 78.20. Ci

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием физики и технологии наноструктур, созданием композитных сред на их основе и их практическом применении возникла потребность более детального изучения оптических и других физических свойств материалов, содержащих наночастицы, т.е. частицы радиусом  $a \ll \lambda$ . Для расчета оптических характеристик сред, содержащих наночастицы, применяются модели оптически однородной среды [1, 2], обладающей эффективной диэлектрической проницаемостью (ЭДП). Величина ЭДП и ее дисперсия зависят от диэлектрической проницаемости наночастиц  $\varepsilon_1$ , от формы наночастиц, от  $\varepsilon_2$  – диэлектрической проницаемости матрицы, т.е. среды, окружающей наночастицы, и от фактора заполнения композитной среды наночастицами  $q = Nv$ , где  $N$  – концентрация частиц,  $v$  – их средний объем. В последнее время появилось большое количество публикаций, посвященных различным методам приготовления наноструктур и изучению их оптических свойств с помощью моделей ЭДП (см. обзоры [3, 4]). В качестве матриц используются прозрачные среды, в частности, плавленый кварц и кварцевые пленки, приготовленные различными способами. Наночастицами являются частицы металлов или полупроводников. Следует сказать, что плотность оптически однородного плавленого кварца и его показатель преломления (ПП) существенно меньше, чем плотность и ПП кристаллического  $\alpha$ -кварца, что указывает на заметную пористость кварцевого стекла. При этом как плотности, так и ПП квар-

цевого стекла и  $\alpha$ -кварца измерены при комнатной температуре с высокой точностью. Все сказанное создает предпосылки для точного вычисления ПП кварцевого стекла на основе данных по плотностям стекла и  $\alpha$ -кварца и ПП кристаллического кварца с использованием моделей ЭДП. Решению этой задачи посвящена настоящая статья.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ ЭДП

Проблема оптических свойств композитных сред с наночастицами является частью проблемы свойств смесей веществ с различными диэлектрическими проницаемостями. Интерес к оптике смесей возник давно. Еще Ньютон предложил простую формулу для описания ЭДП смеси двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_{\text{ef}} = \varepsilon_1 q + \varepsilon_2 (1 - q), \quad (1)$$

где для прозрачных изотропных сред  $\varepsilon_1 = n_1^2$  и  $\varepsilon_2 = n_2^2$ , а  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сред. Однако в конце XIX столетия Клазиусом и Моссоци предложена новая формула для статической диэлектрической проницаемости смеси [5], использующая понятие рефракции. Сходная формула для оптического диапазона частот была предложена независимо Лоренцем и Лорентцем [5]:

$$\frac{\varepsilon_{\text{ef}} - 1}{\varepsilon_{\text{ef}} + 2} = \frac{\varepsilon_1 - 1}{\varepsilon_1 + 2} q + \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2 + 2} (1 - q). \quad (2)$$

Вывод формулы (2) основан на предположении, что на молекулу, находящуюся в центре полый сферы, действует электрическое поле  $E'$ , отличающееся от поля вне сферы  $E$ :

$$E' = E + 4\pi P/3, \quad (3)$$

где  $P$  – поляризация среды, окружающей молекулу,  $P = \chi E$ ,  $\chi$  – восприимчивость. Сфера на самом деле также заполнена молекулами, но действие их поля на центральную молекулу такое же, как и у полый сферы. Для смеси газов (2) формула сводится к (1). Формула (2) успешно применяется для определения  $\varepsilon_{ef}$  жидких и твердых растворов при заданной молярной концентрации смеси.

Следующий шаг в теории композитной однофазной среды был сделан Максвеллом Гарнеттом (1904 г.) в связи с описанием оптических свойств коллоидных растворов металлов в диэлектрической матрице и гранулярных металлических пленок [6]. Предложенная им формула имеет вид

$$(\varepsilon_{ef} - \varepsilon_2)/(\varepsilon_{ef} + 2\varepsilon_2) = q(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2). \quad (4)$$

Здесь  $\varepsilon_1 = \varepsilon_1' - i\varepsilon_1''$  – комплексная диэлектрическая проницаемость металла,  $\varepsilon_2$  относится к матрице. Формула (4) выведена в предположении сферической формы металлической частицы и малости ее радиуса ( $a \ll \lambda$ ). При выводе формулы (4) также использована формула (3) для поля, действующего на частицу. Экспериментальная проверка формулы (4) была впервые проведена в работе [7], посвященной изучению спектров поглощения и структуры тонких пленок Ag методом электронной микроскопии.

Авторы [7] указывают на хорошее качественное согласие между опытными данными по поглощению пленок Ag различной толщины и расчетными частотными зависимостями  $\varepsilon_{ef}''$  во всем интервале  $q$ . Основным результатом этих опытов является обнаружение в спектре поглощения пленок полосы плазменного резонанса, местоположение и низкочастотный сдвиг которой (с ростом  $q$ ) предсказываются формулой (4).

Однако в монографии [8] и последующих работах [9] высказано сомнение в корректности использования формулы (4) для описания спектров тонких металлических пленок, так как эта формула выведена для трехмерного коллоида. Кроме того, вызывает сомнение применимость формулы (4) во всем интервале  $q$  даже в трехмерном случае, так как при  $q > 0.8$  рассчитанная по (4) резонансная полоса неоправданно сужается. В работах [10, 11] предложен второй вариант формулы (4), в котором  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  меняются местами: при  $q > 0.8$  металл становится матрицей, а диэлектрик образует наночастицы.

Интервал  $q$  от 0.2 до 0.8 вызывает в теории ЭДП наибольшие трудности (перколяционный случай), так как понятие матрицы, окружающей

наночастицу, теряет смысл. Для этого интервала предложен ряд формул, среди которых выделим формулу, предложенную Бруггеманом [12]:

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{ef}}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{ef}} q + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{ef}}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_{ef}} (1 - q) = 0. \quad (5)$$

Эта формула выведена в предположении, что среднее поле, действующее на частицу сферической формы, равно

$$E = qE_1 + (1 - q)E_2,$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – поля, действующие на электроны и ионы внутри каждой частицы. В более поздних работах предложены другие варианты формул для  $\varepsilon_{ef}$  в указанном интервале  $q$  [1, 3, 13–15].

Следует отметить, что все приведенные формулы имеют интерполяционный характер, т.е.  $\varepsilon_{ef} = \varepsilon_2$  при  $q = 0$  и  $\varepsilon_{ef} = \varepsilon_1$  при  $q = 1$ . Все формулы, кроме (1), обладают различной нелинейной зависимостью  $\varepsilon_{ef}$  от  $q$ . Формулы (4), (5) выведены для случая сферических частиц малого радиуса, в ряде работ приведен вывод аналогичных формул для частиц сфероидальной формы [2, 3]. При радиусе  $a > 10$  нм понятие ЭДП теряется, и при экспериментальном изучении коэффициента экстинкции следует учитывать вклад светорассеяния, рассчитываемого по теории Ми [16].

#### ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭДП ДЛЯ РАСЧЕТА ПП КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

Плавленный и кристаллический кварц получил широкое практическое применение в различных областях науки и техники, в связи с чем изучению физических свойств кварца посвящено огромное число работ. Удачное сочетание механических, тепловых и оптических свойств плавленного кварца определило его широкое использование в спектроскопии, волоконной оптике, в последнее время – для изготовления композитных материалов.

Оптические постоянные кварца измерены в широком диапазоне длин волн, и с высокой точностью измерен ПП в области прозрачности, простирающейся от 180 нм до 2.7 мкм. Данные по ПП кристаллического кварца и кварцевого стекла приведены в различных справочниках (например, [17, 18]). Кристаллический кварц имеет ромбоэдрическую решетку (кристаллический класс 32) и в двулучепреломлении проявляет себя как положительный одноосный кристалл с главными показателями преломления  $n_e = 1.5534$  и  $n_o = 1.5443$  при  $\lambda = 589.3$  нм и комнатной температуре. Кварцевое стекло оптически изотропно и имеет существенно меньший ПП  $n = 1.4585$  при той же длине волны. Следует отметить, что значение ПП стекла очень слабо зависит от способа его приготовления [19], и по различным оценкам от-

**Таблица 1.** Сравнение ПП, рассчитанных по ПП кристаллического кварца с использованием формул Ньютона (1), Максвелл Гарнетта (4), Бругемана (5) и Лоренц-Лорентца (2), с табличными значениями для кварцевого стекла

| $\lambda$ , нм     | 670.8         | 656.3         | 643.8         | 589.3         | 546.1         | 508.6         | 486.1         | 480.0         | 404.7         |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| (1)                | 1.4669        | 1.4673        | 1.4676        | 1.4694        | 1.4711        | 1.4729        | 1.4742        | 1.4745        | 1.4808        |
| Табличное значение | <b>1.4561</b> | <b>1.4564</b> | <b>1.4568</b> | <b>1.4585</b> | <b>1.4602</b> | <b>1.4619</b> | <b>1.4632</b> | <b>1.4636</b> | <b>1.4697</b> |
| (4)                | 1.4516        | 1.4519        | 1.4522        | 1.4539        | 1.4555        | 1.4572        | 1.4585        | 1.4588        | 1.4648        |
| (5)                | 1.4499        | 1.4503        | 1.4506        | 1.4523        | 1.4539        | 1.4556        | 1.4568        | 1.4571        | 1.4631        |
| (2)                | 1.4383        | 1.4386        | 1.4389        | 1.4404        | 1.4419        | 1.4435        | 1.4446        | 1.4449        | 1.4504        |

клонение от приведенного значения не превосходит 0.0002.

Существует несколько разновидностей кварцевых стекол, определяемых технологией их приготовления. В спектроскопии наиболее часто используются стекла марки КУ [18, 20], в которых отсутствует полоса поглощения при 240 нм и имеет место высокая прозрачность в УФ диапазоне спектра с пропусканием 90% в пластинах толщиной 1 см (при  $\lambda = 200$  нм).

Кристаллический кварц имеет несколько модификаций [19, 21], устойчивых при различных температурах и отличающихся по плотностям и точечным группам симметрии их кристаллических решеток. При комнатной температуре наиболее устойчив  $\alpha$ -кварц с вышеприведенными данными по структуре и ПП. Плотность  $\alpha$ -кварца измерена с высокой точностью и равна 2.6487 г/см<sup>3</sup>. Устойчивые модификации при более высоких температурах, а именно тридимит ( $T \geq 870^\circ\text{C}$ ) и кристобалит ( $T \geq 1470^\circ\text{C}$ ) имеют меньшую плотность – 2.27 и 2.32 г/см<sup>3</sup> соответственно. Плотность кварцевого стекла меньше, чем плотность кристаллических модификаций – 2.202 г/см<sup>3</sup>. В работе [22, 23] установлена зависимость ПП различных модификаций и кварцевого стекла от их плотности – с ростом плотности ПП монотонно и нелинейно возрастает.

Плотность кварцевого стекла, меньшая чем плотности различных модификаций кристаллического кварца, указывает на образование в стекле полостей (пустот). Свидетельством возникновения пустот является высокая проницаемость стекла для легких газов (Н, Не, Хе [19]), а также проникновение в стекло ионов благородных металлов при их ионной [4, 24] и лазерной [25] имплантации. Соотношение плотностей плавленого и кристаллического кварца дает возможность независимого определения фактора заполнения стекла пустотами  $q$ . Этот фактор заполнения далее можно использовать при вычислении  $\epsilon_{\text{ef}}$  и ПП на основании известных моделей ЭДП и предполагаемом значении  $\epsilon_2$  матрицы, окружающей пустоты.

Для расчета  $q$  мы использовали плотности стекла и  $\alpha$ -кварца, измеренные с высокой точностью. Предполагалось, что плотность матрицы в кварцевом стекле равна плотности кристалла. Тогда плотность стекла  $\rho_{\text{gl}} = \rho_{\text{cr}}(1 - q)$ , где  $\rho_{\text{gl}} = 2.202$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho_{\text{cr}} = 2.6487$  г/см<sup>3</sup>. Отсюда  $q = 0.168$ . Так как кварцевое стекло изотропно, значение  $\epsilon_2$  в формулах (1), (2), (4), (5) можно рассчитать как среднее значение главных диэлектрических проницаемостей кристаллического кварца

$$\epsilon_2 = (2n_o^2 + n_e^2)/3 = 2.3943$$

для  $\lambda = 589.3$  нм. На основании этого значения и  $q$ , найденного по плотности, были вычислены  $\epsilon_{\text{ef}}$  и ПП стекла с использованием различных моделей ЭДП. Оказалось, что наилучшее согласие с табличным значением  $n_{\text{gl}}$  дает формула (4). Так, для  $\lambda = 589.3$  нм вычисленное значение  $n_{\text{gl}} = \epsilon_{\text{ef}}^{1/2} = 1.4539$ , что отличается от табличного значения 1.4585 на 0.0046. Другие модели дают существенно большее отклонение от табличной величины (табл. 1).

Как видно из сопоставления расчетных и экспериментальных значений  $n_{\text{gl}}$ , различие на 0.005 выходит за пределы точности измерения  $n_{\text{gl}}$  (ошибка не более 0.0002). Из этого мы сделали вывод, что высказанные выше простые предположения относительно  $\epsilon_2$  матрицы и ее плотности требуют дальнейшей корректировки. Естественно предположить, что плотность матрицы, окружающей поры, из-за наличия в ней топологического беспорядка [26] несколько ниже, чем  $\rho_{\text{cr}}$  [27], т.е.  $\rho_{\text{M}} = \kappa \rho_{\text{cr}}$ , где коэффициент  $\kappa$  меньше 1. Отсюда следует, что

$$\rho_{\text{gl}}/\rho_{\text{cr}} = \kappa(1 - q) = 0.832, \quad (6)$$

где новый фактор заполнения стекла порами отличается от ранее вычисленного  $q = 0.168$ . Здесь

$$1 - q = \rho_{\text{gl}}/\rho_{\text{M}}, \quad q < 0.168.$$

Уменьшение  $\rho_{\text{M}}$  влечет за собой уменьшение ПП и  $\epsilon_2$  матрицы. Оценка нового значения  $\epsilon_2$  вызывает некоторые трудности из-за существования различных вариантов расчета.

**Таблица 2.** Сравнение ПП, рассчитанных по ПП кристаллического кварца с использованием формулы (4) и различных  $\kappa$ , с табличными значениями для кварцевого стекла

| $\lambda$ , нм     | 670.8         | 656.3         | 643.8         | 589.3         | 546.1         | 508.6         | 486.1         | 480.0         | 404.7         |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\kappa = 0.98$    | 1.4582        | 1.4585        | 1.4590        | 1.4606        | 1.4622        | 1.4641        | 1.4654        | 1.4657        | 1.4718        |
| Табличное значение | <b>1.4561</b> | <b>1.4564</b> | <b>1.4568</b> | <b>1.4585</b> | <b>1.4602</b> | <b>1.4619</b> | <b>1.4632</b> | <b>1.4636</b> | <b>1.4697</b> |
| $\kappa = 0.986$   | 1.4561        | 1.4564        | 1.4569        | 1.4585        | 1.4601        | 1.4619        | 1.4632        | 1.4635        | 1.4696        |
| $\kappa = 1$       | 1.4516        | 1.4519        | 1.4522        | 1.4539        | 1.4555        | 1.4572        | 1.4585        | 1.4588        | 1.4648        |

При проверке различных вариантов расчета было обнаружено, что с экспериментальными данными лучше всего согласуется расчет, основанный на уменьшении ПП необыкновенного луча в матрице по сравнению с  $n_e$  кристаллического кварца. В таком приближении величина  $\kappa$  и  $\varepsilon_2$  находится из уравнений

$$(n_e'^2 - 1)/(n_e^2 - 1) = \kappa, \tag{7a}$$

$$\varepsilon_2 = (2n_o^2 + n_e'^2)/3. \tag{7б}$$

Так как ПП необыкновенной волны изменяется в пределах  $n_e \leq n_e' \leq n_o$ , варьируя  $n_e'$  в этих пределах, мы находим  $\kappa$  и  $\varepsilon_2$  и на основании формулы (6) находим новое значение  $q$ . Так, например, при  $n_e' = n_o$  получаем  $\kappa = 0.9801$  и  $\varepsilon_2 = n_o^2$ . Формула (6) дает  $q = 0.1517$ , и уравнение (4) дает ПП стекла  $n_{gl} = 1.4606$  ( $\lambda = 589.3$  нм), что на 0.0021 больше, чем табличная величина. Наилучший результат достигнут при  $\kappa = 0.9862$ ,  $\varepsilon_2 = 2.3876$  и  $n_e' = 1.5452$ . При этом  $q = 0.1564$ . По формуле Максвелла Гарнетта при  $\lambda = 589.3$  нм получаем  $n_{gl} = 1.4585$ , что в пределах ошибок согласуется с табличным значением. Это согласие проверено при вычислении  $n_{gl}$  для всех длин волн в интервале  $404 \text{ нм} \leq \lambda \leq 671 \text{ нм}$  с учетом дисперсии ПП  $n_o$  и  $n_e$  кристаллического кварца. Как видно из табл. 2 и рисунка, хорошее согласие расчета и эксперимента наблюдается во всем интервале  $\lambda$ . Это является свидетельством отсутствия зависимости констант  $\kappa$  и  $q$  от  $\lambda$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПП КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

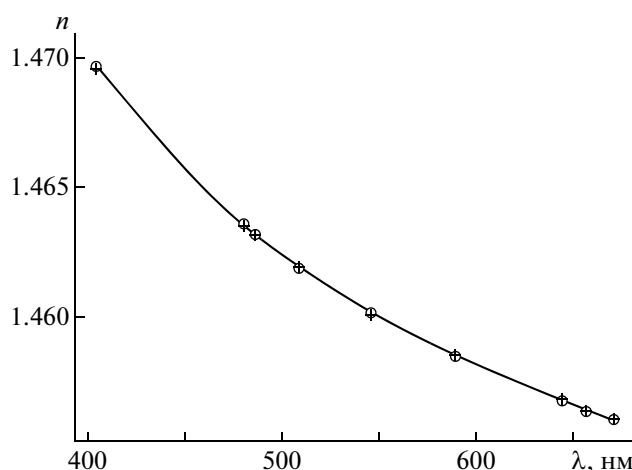
Из приведенного расчета ПП стекла следует, что для описания его отличия от ПП кристалла применима модель ЭДП, предложенная Максвеллом Гарнеттом (формула (4)). Следует сказать, что модель Бруггемана (формула (5)) также дает значения  $n_{gl}$ , близкие к экспериментальным. Этот результат не удивителен, так как при малых  $q$  при разложении  $\varepsilon_{ef}$  в степенной ряд по  $q$  обе формулы дают в линейном приближении одинаковый результат:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_2 [1 - 3q(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)/(2\varepsilon_2 + \varepsilon_1)].$$

Небольшое различие в результатах расчета по двум формулам определяется различием в членах разложения более высокой степени  $q$ .

Применимость указанных моделей для расчета  $n_{gl}$  заставляет предполагать, что в плавленом кварце имеются поры двух различных сортов. Один сорт – сравнительно крупные поры с фактором заполнения  $q$ . Их размер – порядка нескольких нанометров, но существенно меньше  $\lambda$ . Второй сорт – значительно меньшие поры в матрице, размером около  $1 \text{ \AA}$ , о чем свидетельствует близость параметра  $\kappa$  к 1. То есть кварцевое стекло можно рассматривать как своеобразную однородную наноструктурную среду, в которой роль наночастиц играют крупные поры с  $\varepsilon_1 = 1$ .

Заметим также, что отличие плотности матрицы от плотности кристалла следует учитывать при анализе спектрального положения и формы полос плазменного резонанса, возникающих в частицах при различных способах внедрения ионов благородных металлов в кварцевое стекло, так как частоты максимумов полос существенно зависят не только от оптических постоянных металла в наночастицах [28], но и от величин  $q$  и  $\varepsilon_2$  матрицы.



Дисперсия ПП плавленого кварца. Сплошная кривая и кружки – табличные (экспериментальные) значения. Крестики – значения, рассчитанные по формуле (4) при  $\kappa = 0.986$ .

Высказанные здесь предположения относительно структуры кварцевого стекла находятся в некотором противоречии с широко цитируемой [26, 29] моделью его структуры (модель Захариасена [30]). По [30] кварцевое стекло представляет собой разупорядоченную сетку, состоящую из тетраэдров  $\text{SiO}_4^{2-}$ , причем длины связей и углы между связями внутри тетраэдров такие же, как и в кристалле. Тетраэдры соединены между собой кислородными мостиками, но углы  $\alpha$  между связями  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  соседних тетраэдров варьируют в пределах  $120^\circ-180^\circ$  в отличие от кристаллов, где  $\alpha$  – константа. В этой модели также имеются поры различного радиуса, однако их размеры принимают непрерывный ряд значений. Эта модель не согласуется с нашим выводом относительно резкого различия в радиусах больших и малых пор в матрице кварцевого стекла. В более поздних работах [19] возникла дискуссия по структуре кварцевого стекла. Дифракционные измерения указывают на сохранение ближнего порядка в расположении соседних тетраэдров и по некоторым данным среднего порядка [29]. То есть модель [30] нуждается в дальнейшей корректировке.

Возможная причина расхождения в структуре стекла в модели Захариасена кроется в определенной и важной роли кристобалита в формировании стекла из расплава [19, 21]. Как упоминалось, при нормальном давлении кристобалит является наиболее высокотемпературной устойчивой модификацией. При медленном нагревании чистого кварца до плавления, по-видимому, появляется фаза кристобалита. Возможно, что из-за большой вязкости расплава при его охлаждении до стеклования в структуре стекла сохраняется память о структуре кристобалита. О сохранении такой памяти свидетельствуют ранние опыты по кристаллизации стекла при его нагревании до  $1000^\circ\text{C}$  [21]. Во всех случаях кристаллизация приводит к возникновению кристобалита. Установлено также, что температура и скорость кристаллизации зависят от примесей в расплавленном кварце. В более поздних работах, проведенных на образцах расплавленного кварца, приготовленных золь-гель-методом [31, 32], установлено по дифракции, что кристаллизация стекла в  $\alpha$ -кристобалит (кубическая фаза) происходит в присутствии наночастиц  $\text{Ag}$  [31] при температуре  $500^\circ\text{C}$ , при которой кристобалит неустойчив. Такой же результат по кристаллизации получен при введении в стекло меди [32], и только при  $800^\circ\text{C}$   $\alpha$ -кристобалит переходит в обычный кристаллический  $\alpha$ -кварц. Все сказанное свидетельствует о близости структуры кварцевого стекла к структуре  $\alpha$ -кристобалита.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании расчета ПП кварцевого стекла с использованием известных с большой точностью данных о ПП кристаллического  $\alpha$ -кварца и соотношения плотностей кристалла и стекла удалось с помощью формулы Максвелла Гарнетта вычислить ПП плавленого кварца в интервале  $\lambda$  от 404 до 671 нм с отклонением от экспериментальных данных, меньшим 0.0002. При расчете использованы два параметра:  $q$  – фактор заполнения стекла порами нанометрового радиуса и  $k$  – коэффициент, определяющий отклонение плотности изотропной матрицы, окружающей поры, от плотности  $\alpha$ -кварца. Расчет показывает, что кварцевое стекло представляет собой наноструктуру, в которой роль наночастиц играют поры почти сферической формы. Сходные расчеты ПП стекла желательнее провести, используя в качестве кристалла кристобалит, но для их выполнения следует иметь более точные сведения о ПП, плотности и структуре кристобалита при комнатной температуре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kreibig U., Vollmer M.* Optical Properties of Metal Clusters. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 528 p.
2. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
3. *Головань А.А., Тимошенко В.Ю., Кашкарев П.К.* // УФН. 2007. Т. 177. № 6. С. 619.
4. *Stepanov A.L.* // Rev. Adv. Mater. Sci. 2003. V. 4. P. 123.
5. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
6. *Maxwell Garnet J.C.* // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 1904. V. 203. P. 385.
7. *Sennet R.S., Scott W.W.* // JOSA. 1950. V.40. № 1. P. 203.
8. *Розенберг Г.В.* Оптика тонкослойных покрытий. М.: ГИФМЛ, 1958. 570 с.
9. *Мейксин З.Г.* // Физика тонких пленок. М.: Мир, 1978. 359 с.
10. *Aspnes D.E.* // Am. J. Phys. 1982. V. 50. № 8. P. 704.
11. *Evans D.* // Phys. Rev. B. 1985. V. 32. № 6. P. 4169.
12. *Bruggeman D.A.G.* // Ann. Physik. 1935. V. 5. № 24. P. 636.
13. *Sheng P.* // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. № 1. P. 60.
14. *Sheng P.* // Phys. Rev. B. 1980. V. 22. № 12. P. 6364.
15. *Spanier J.E., Herman I.P.* // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. № 15. P. 10137.
16. *Mie G.* // Ann. Physik. 1908. V. 25. P. 377.
17. *Кэй Дж., Лэби Т.* Таблицы физических и химических постоянных. М.: ГИФМЛ, 1962. 247 с.
18. *Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В.* Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Химия, 1984. 215 с.
19. *Леко В.К., Мазурин О.В.* Свойства кварцевого стекла. Л.: Наука, 1985. 166 с.

20. *Кругер М.Я., Панов В.А. и др.* Справочник конструктора оптико-механических приборов. М.-Л.: Машгиз, 1963. 804 с.
21. *Глаголев С.П.* Кварцевое стекло, его свойства, производство и применение. М.-Л.: Гос. Хим.-техн. Изд., 1934. 212 с.
22. *Maccenzie J.D.* // J. Amer. Ceram. Soc. 1963. V. 46. № 10. P. 461.
23. *Maccenzie J.D.* // J. Amer. Ceram. Soc. 1964. V. 47. № 2. P. 76.
24. *Cai W. et al.* // J. Nanopart. Research. 2001. V. 3. P. 443.
25. *Агеев Л.А., Милославский В.К., Маковецкий Е.Д.* // Опт. и спектр. 2007. Т. 102. № 3. С. 489.
26. *Ziman J.M.* Models of Disorder. The Theoretical Physics of Homogeneously Disordered Systems. Cambridge: Camb. Univ. Press, 1979.
27. *Lerme J. et al.* // Eur. Phys. J. 1998. V. 4. P. 95.
28. *Hovel H. et al.* // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. № 44. P. 18178.
29. *Фельц А.* Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела. М.: Мир, 1986. 556 с.
30. *Zachariasen W.H.* // J. Amer. Chem. Soc. 1932. V. 54. P. 3841.
31. *Garnica-Romo M.G. et al.* // J. Mater. Res. 2001. V. 16. № 7. P. 2007.
32. *Diaz-Flores L.L. et al.* // Phys. Stat. Sol. (c). 2007. V. 4. № 6. P. 2016.