УДК 535-15

**В.В. Бурдин^{1, 2}, Д. Клод¹, Ю.А. Константинов¹,
А.С. Смирнов^{1, 2}, В.П. Первадчук²**

¹ Лаборатория фотоники Пермского научного центра Уральского отделения
Российской академии наук, Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИИ ГИДРОКСИЛЬНЫХ ГРУПП В ОБРАЗЦАХ ИЗ ЧИСТОГО КВАРЦА В ОБЛАСТИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ 1400 НМ

В настоящее время возрос интерес промышленности к кварцевым концентратам повышенной чистоты, а именно особо чистого кварца. В частности, это может найти применение в производстве оптических волокон. Важным параметром для применения в волоконной оптике особо чистого кварца является концентрация гидроксильных групп. В данной работе рассматривается разработка метода оптического анализа концентрации гидроксильных групп в образцах из чистого кварца на основе измерения поглощения в области длины волны 1400 нм. В работе приведены теоретические рассуждения о чувствительности метода, о границах применения. Описываются результаты эксперимента по измерению поглощения на трех образцах крупки чистого кварца, погруженных в иммерсионную жидкость.

Ключевые слова: концентрация гидроксильных групп, чистый кварц, крупка, иммерсионная жидкость, спектр поглощения.

**V.V. Burdin^{1, 2}, D. Claude¹, A.S. Smirnov^{1, 2},
Yu.A. Konstantinov¹, V.P. Pervadchuk²**

¹ Photonics Laboratory of Perm Federal Research Centre of Ural Branch
of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DEVELOPMENT OF OPTICAL CONCENTRATION ANALYSIS METHOD FOR HYDROXYL GROUPS IN PURE QUARTZ SAMPLES IN THE REGION OF THE WAVELENGTH OF 1400 NM

At present, industry has increased its interest in high purity quartz concentrates, namely, extra-pure quartz. In particular, it can be used in the manufacture of optical fibers. An important parameter for use in high-purity quartz fiber optics is the concentration of hydroxyl groups. In this paper, we consider

the development of an optical method for analyzing the concentration of hydroxyl groups in samples of pure quartz based on absorption measurements in the 1400 nm wavelength region. The paper presents theoretical arguments about the sensitivity of the method, about the limits of application. The results of an experiment to measure the absorption on three samples of pure quartz grains immersed in an immersion liquid are described.

Keywords: concentration of hydroxyl groups, pure quartz, grains, immersion liquid, absorption spectrum.

Введение

Для определения концентрации гидроксильных групп в веществе используются различные химические методы, например, дейтерий-обменные [1] и оптические, основанные на поглощении в полосах, обусловленном наличием ОН-групп [2–5]. Данная статья посвящена оптическому методу, применённому на крупке чистого кварцевого стекла. При взаимодействии молекулы воды с решеткой стекла образуются силанол-центры $\equiv\text{Si-OH}$, химическую реакцию записывают в следующем виде [6]:

Данная полоса поглощения является сложной, поскольку представляет собой ряд линий гауссовой формы для различных состояний ОН-групп в стекле, и в кварцевом стекле соответствует длине волны 2730 нм ($\nu \approx 3660 \text{ см}^{-1}$). Область частот в районе 3500 см^{-1} характерна исключительно для валентных колебаний связей R-H (R – некоторый радикал) в силу малой массы атома водорода. Здесь можно сослаться на классический пружинный маятник: чем меньше масса, тем больше частота. Поэтому данная область частот очень удобна для исследования содержания водородосодержащих молекул. Эта область тем более удобна для крупки кварцевого стекла, где ОН-группы предположительно являются единственными водородосодержащими группами. Традиционно измерение поглощения ОН-групп и расчет концентрации производятся на длине волны в районе 2730 нм [7]. Первый обертона основной полосы поглощения ОН-групп соответствует длине волны 1400 нм (частоте $\nu \approx 7140 \text{ см}^{-1}$), что является весьма привлекательным, поскольку близко к окнам прозрачности волоконных кварцевых световодов: 1310, 1550 нм, при этом интенсивность обертонов в спектрах примерно на один-два порядка меньше интенсивности основных полос.

Теоретическая часть

Для оценки возможности измерения концентрации ОН-групп на длине волны 1400 нм применяется закон Бугера–Ламберта–Бера для интенсивности излучения, прошедшего через слой поглощающего вещества длиной z :

$$I = I_0 e^{-\sigma n z} = I_0 e^{-\alpha z},$$

где I_0 – начальная интенсивность излучения, σ – коэффициент поглощения (имеющий размерность площади), n – концентрация (частиц/м³), α – удельный коэффициент поглощения, $\alpha = \sigma n$. Можно ввести понятие эффективной длины поглощения $z_{\text{эфф}}$ как длины, на которой интенсивность излучения падает в e раз:

$$z_{\text{эфф}} = \frac{1}{\alpha}.$$

Для коэффициента поглощения σ на длине волны 1380 нм в работе [8] приводится значение 61,9 дБ/км/ррт.

Рассмотрим более широкий диапазон коэффициентов поглощения (включающий рассмотренные в работах) от связанного состояния молекул – чистая вода – в жидкой фазе до свободного состояния молекул воды в парообразной фазе.

Для чистой воды удельные коэффициенты поглощения в максимуме полос на длинах волн $\lambda_1 = 2950$ нм и $\lambda_2 = 1400$ нм составляют соответственно $\alpha_1 \approx 12\,000$ см⁻¹ и $\alpha_2 \approx 30$ см⁻¹ [9]. Отношение коэффициентов:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 400.$$

Концентрация молекул воды в чистой воде:

$$n_0 = \frac{\rho_{\text{в}} N_{\text{а}}}{\mu_{\text{в}}} = \frac{1000 \cdot 6 \cdot 10^{23}}{18 \cdot 10^{-3}} = 3,3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} = 3,3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3},$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $\rho_{\text{в}} = 1000$ кг/м³; $\mu_{\text{в}}$ – молярная масса воды, $\mu_{\text{в}} = 0,018$ кг/моль; $N_{\text{а}}$ – постоянная Авогадро.

Таким образом, коэффициенты поглощения в максимуме основной полосы и обертона определяется по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{\alpha_1}{n_0} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2,$$

$$\sigma_2 = \frac{\alpha_2}{n_0} = 9 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2.$$

В парообразном состоянии воды линии спектра более интенсивные и узкие, поскольку молекулы воды свободные. Спектр водяного пара состоит из отдельных узких линий [10]. В [11] представлены широкие данные по коэффициентам поглощения атмосферных газов. При давлениях пара порядка 0,01 атм (при этом концентрация пара примерно соответствует концентрации молекул воды в крупке), разрешении спектрального прибора 1 см^{-1} интенсивность наиболее сильных линий в области 7200 см^{-1} ($1,39 \text{ мкм}$) составляет $\sigma_2 = 1,2 \cdot 10 \dots 20 \text{ см}^2$, что более чем на порядок превышает интенсивность обертона в жидкой воде.

Состояние ОН-групп в кварцевом стекле существенно отличается от состояния ОН-групп в чистой воде. Однако, в любом случае, полоса валентных колебаний функциональной ОН-группы является сильной в ИК-спектрах с относительно небольшими вариациями коэффициентов поглощения. Поэтому разумно считать, что коэффициент поглощения σ_2 на обертоне находится в диапазоне от $10\text{--}21 \text{ см}^2$ до $10\text{--}20 \text{ см}^2$. Для дальнейших оценочных расчетов возьмем величину $5 \cdot 10 \dots 21 \text{ см}^2$.

Определим концентрацию частиц SiO_2 в кварцевом стекле:

$$n_{\text{кв}} = \frac{\rho_{\text{кв}} N_a}{\mu_{\text{кв}}} = \frac{2200 \cdot 6 \cdot 10^{23}}{60 \cdot 10^{-3}} = 2,2 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} = 2,2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3},$$

где $\rho_{\text{кв}}$ – плотность кварцевого стекла, $\rho_{\text{кв}} = 2200 \text{ кг/м}^3$; $\mu_{\text{в}}$ – молярная масса молекул SiO_2 , $\mu_{\text{в}} = 0,060 \text{ кг/моль}$.

Для оценки возможности экспериментального определения концентрации ОН-групп в крупке на обертоне возьмем достаточно большое значение 100 ppm , т.е. 10^{-4} долю. Тогда концентрация ОН-групп в крупке составит:

$$n_{\text{ОН}} = 10^{-4} n_{\text{кв}} = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Удельный коэффициент поглощения крупки на длине волны $\lambda_2 = 1400 \text{ нм}$ составит:

$$\alpha_2 (\text{при } 100 \text{ ppm}) = \sigma_2 n_{\text{ОН}} = 5 \cdot 10^{-21} \cdot 2,2 \cdot 10^{18} \approx 0,011 \text{ см}^{-1}.$$

Эффективная длина поглощения на обертоне составит:

$$z_{\text{эфф}2} = \frac{1}{\alpha_2} = 91 \text{ см}.$$

Таким образом, для того чтобы эффективно определять концентрацию молекул воды на обертоне, нужны образцы длиной порядка 10–100 см, что, естественно, не приемлемо.

Интенсивность на выходе при длине образца 1 см на обертоне составит:

$$I = I_0 e^{-\alpha_2 z} = I_0 e^{-0,011} = 0,989.$$

Падение интенсивности в дБ составит:

$$10 \lg \frac{I_0}{I} = 10 \lg \frac{1}{0,989} \approx 0,05 \text{ дБ}.$$

При начальной интенсивности 1000 у.е. интенсивность на выходе составит 989 у.е. Изменение интенсивности мало, хотя принципиально измеримо.

В качестве иллюстрации поглощения в чистом кварцевом стекле в области 1400 нм на рис. 1 представлен спектр поглощения кварцевого световода длиной 1,04 км с низким содержанием ОН-групп.

Рис. 1. Спектральные потери в кварцевом волоконном световоде длиной 1,04 км с низким содержанием ОН-групп

Интенсивность поглощения в водяном пике составляет 14,505 дБ/см. Таким образом, на длине 1 см поглощение составило бы $14 \cdot 10^{-5}$ дБ, что крайне мало. Если ориентироваться на коэффициенты поглощения в диапазоне $\sigma_2 = 10 \dots 21 - 10 \dots 20 \text{ см}^2$ от чистой воды до пара, то несложно рассчитать, что концентрация ОН-групп в данном примере составляет от 1,5 до 0,15 ppm.

Подчеркнем, что эти цифры получены для относительно большой концентрации воды в крупке. При меньших значениях (1–10 ppm) определить концентрацию воды на обертоном с хорошей точностью было весьма затруднительно. Для того, чтобы различить, скажем, концентрации 80 и 100 ppm, нужно будет работать с точностью, как минимум, 0,01 дБ (особенно с учетом того, что точные значения коэффициента поглощения на обертоном в крупке не известно). Ниже приводится описание экспериментов по определению концентрации ОН-групп на длине волны $\sim 1400 \text{ нм}$.

При концентрациях порядка 1 ppm и длинах образцов крупки порядка 1 см необходимо использовать основную полосу поглощения и длину волны 2730 нм.

Наконец, отметим еще один важный аспект, связанный с постановкой эксперимента по определению концентрации ОН-групп в крупке. Если часть пути пучок света проходит по воздуху, то возникнет поглощение, связанное с наличием молекул воды в воздухе, которые также имеют линии обертонов в районе 1400 нм. Приведем расчеты.

Пусть температура воздуха в лаборатории равна $20^\circ\text{C} = 293 \text{ К}$, влажность $\phi = 0,55$ (55 %). Давление насыщенных паров при данной температуре $p_{\text{нас}} = 2330 \text{ Па}$, следовательно, парциальное давление пара составит $p_{\text{п}} = \phi \cdot p_{\text{нас}} \approx 1280 \text{ Па}$. Тогда концентрация молекул воды в воздухе:

$$n_n = \frac{p_{\text{п}}}{kT} = \frac{1280}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293} = 3,2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3} = 3,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}.$$

Напомним, что при 100 ppm концентрация молекул воды в крупке составляет $2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что почти на порядок больше, чем в воздухе. Но уже примерно при 10 ppm концентрация воды в крупке сравнивается с концентрацией воды в воздухе. Этот факт нужно иметь в виду при исследованиях крупки с концентрацией молекул воды порядка нескольких десятков ppm или меньше. Установку нужно продувать, вы-

тесняя влажный воздух, и минимизировать путь луча, проходимый по воздуху. Другой вариант – сначала получать спектр без крупки, т.е. определять вклад воды в воздухе.

Эксперимент

В целях оценки потенциальной эффективности предполагаемого метода измерения концентрации ОН-групп в районе 1400 нм был проведен ряд экспериментов с широкополосным источником излучения. В качестве источника излучения использовалась галогенная лампа накаливания мощностью 50 Вт (750 лм), расположенная на расстоянии 35 мм от изучаемого образца, помещенного в кварцевую кювету с длиной оптического пути 3 мм (рис. 2).

Оптическое излучение, пройдя через кювету с образцом, фокусировалось при помощи сферической линзы в волоконный световод, подсоединенный к спектрометру Ocean Optics Nir Quest 512.

Рис. 2. Фото экспериментального стенда

Сравнивая измеренный спектр излучения источника (без кюветы) с полученным после прохождения через образец, можно получить спектральную картину оптических потерь, складывающуюся из общего падения мощности за счет рассеивания излучения (вследствие оптической неоднородности образца) и поглощения отдельных участков спектра химическими соединениями в образце, в частности гидроксильными группами.

Для формирования контрольных спектральных графиков использовались измерения прямого прохождения излучения лампы (без кюветы), а также измерения спектра поглощения пустой кюветы и кюветы с иммерсионной жидкостью. В ходе данных измерений сколько-либо значимого поглощения излучения в интересующих диапазонах спектра (около 1400 нм) зарегистрировано не было, в основном падение мощности излучения происходило равномерно по всей ширине спектра, что свидетельствует о преимущественно наблюдаемом эффекте оптического рассеяния. Отсюда следует, что для оценки спектрального поглощения исследуемого образца достаточно произвести вычитание контрольного спектра кюветы с иммерсионной жидкостью из результатов измерений образца. Это верно при условии достаточной оптической однородности образца, чтобы дополнительное оптическое рассеяние не снижало контрастности спектрограммы и не вносило дополнительные погрешности.

Также для оценки контрастности измерений стенда тем же методом была исследована кювета с водопроводной водой (рис. 3).

Рис. 3. Спектральное исследование кюветы с водой и лампы (без установленного образца)

Для обеспечения оптической однородности образца использовался метод погружения измеряемого вещества (кварцевой крупки) в иммерсионную жидкость, имеющую максимально близкий к образцу по-

казатель преломления. В рамках эксперимента в кварцевую кювету помещалась крупка в сухом виде, затем заливалась иммерсионной жидкостью и перемешивалась.

В качестве образцов для пробных измерений использовались:

1. Образец 1 содержание ОН-групп по паспорту ~30 000 ppm.
2. Образец 2 содержание ОН-групп предположительно 40–200 ppm.
3. Образец 3 содержание ОН-групп по паспорту 38 ± 5 ppm.

Рис. 4. Подготовленные образцы в кюветах

Ввиду отсутствия специальных технических средств (центрифуга, аппарат для вакуумирования) произвести дегазацию образцов после перемешивания не представлялось возможным. В итоге данный метод подготовки в эксперименте не обеспечил должную оптическую однородность образца, достаточную для информативности получаемых спектральных данных – общее падение оптической мощности на свежеподготовленных образцах составляло более 50 % от контрольного уровня мощности лампы. Однако повторное измерение образца, подвергнутого отстаиванию после подготовки в течение двух и более недель, выявило значительное улучшение его оптической однородности – просадки мощности на участках спектра, не подверженных поглощению гидроксильными группами, практически не наблюдались. При этом было отмечено, что иммерсионная жидкость в образце после отстаивания приобрела желтоватый оттенок.

Было выдвинуто предположение, что за время отстаивания образца, помимо его естественной дегазации за счет выталкивания пузырьков воздуха из жидкости, произошло заполнение части газожидкостных вкраплений в самой крупке иммерсионной жидкостью через имевшиеся микроотверстия. Это могло повлиять как на увеличение оптической однородности образца, так и на приобретение иммерсионной

жидкостью желтоватого оттенка за счет химического взаимодействия с содержащимся вкраплением.

В любом случае данные наблюдения свидетельствуют о том, что подготовка образцов является важнейшим фактором, который необходимо учитывать при использовании данного метода измерений. Следует уделить максимальное внимание вопросу обеспечения оптической однородности образцов на стадии подготовки к измерениям.

Проведение измерений вышеуказанных образцов выявило следующие результаты (рис. 5, 6).

Рис. 5. Спектральные измерения: образец 1 и лампа

Рис. 6. Спектры различных образцов в сравнении со спектром лампы (длина образца 3 мм)

Падение интенсивности на рис. 5–6 в области 1400 нм связано с поглощением ОН-групп. При концентрации ОН-групп 30 000 ppm обертона воды для образца 1 проявляется на спектре очень отчетливо. При концентрациях порядка 40 ppm (образец 2 на рис. 6) обертон различим, однако количественные измерения при таких концентрациях можно сделать только с ограниченной точностью. Отметим, что полоса поглощения 1400 нм становится невидимой в спектрах пустой кюветы, т.е. прибор не регистрирует пары воды, концентрация которых соответствует диапазону 1–10 ppm концентрации воды в кварцевом стекле.

Оценим коэффициент поглощения молекул воды по полосе образца 1. Концентрация 30 000 ppm соответствует 0,03 доли ОН-групп в крупке, т.е. $n_{\text{ОН}} = 0,03n_{\text{кв}} = 0,03 \cdot 2,2 \cdot 10^{22} = 6,6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Длину оптического пути возьмем $z \approx 3 \text{ мм}$ (хотя на самом деле она меньше – часть пути излучение проходит по иммерсии). Исходя из полученного спектра лампы (без образцов), можно отметить, что интенсивность в области 1400 нм составляет примерно 90 % интенсивности в области 1300 нм, в которой спектральное поглощение отсутствует. Исходя из полученного спектра пропускания образца 1 на рис. 6, начальная интенсивность излучения (соответствующая области 1300 нм) $I_0' \approx 56\,000 \text{ у.е.}$, тогда интенсивность при 1400 нм без поглощения на ОН-группах, должна быть $I_0 = 0,9 I_0' \approx 50\,400 \text{ у.е.}$, при этом интенсивность на выходе при 1400 нм составила $I \approx 22\,000 \text{ у.е.}$ Тогда из закона Бугера–Ламберта–Бера следует:

$$\sigma_2 = \frac{1}{n_{\text{ОН}}z} \ln \frac{I_0}{I} = 4,2 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2.$$

Полученное значение коэффициента σ_2 поглощения находится в промежутке между 10^{-21} см^2 и 10^{-20} см^2 и близко к значению $5 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$, принятому для оценочных расчетов.

На графике (см. рис. 6) видно, что степень поглощения участка в районе 1390 нм для образцов 2 и 3 остается приблизительно одинаковой, хотя значения концентрации предположительно различаются. Это может быть объяснено разным гранулометрическим составом крупки – гранулы образца 2 преимущественно крупнее гранул образца 3. Отсюда следует, что при одинаковом диаметре регистрируемого оптического

го пучка и длине оптического пути в образце размер гранул крупки будет обратно пропорционален измеряемому поглощению ввиду разного соотношения иммерсионной жидкости и гранул в наблюдаемом участке образца (чем больше гранулы, тем большие промежутки между ними заполнит иммерсионная жидкость в том же измеряемом объеме). Приняв во внимание, что образец 3 по предварительным данным содержит меньше гидроксильных групп, чем образец 2, можно сделать вывод, что в данном эксперименте соотношение размеров гранул образцов 2 и 3 компенсирует разницу концентраций ОН-групп в данных образцах.

Данное влияние гранулометрического состава образцов на результаты спектральных измерений может сильно затруднить вычисление значения фактической концентрации ОН-групп в образцах. Дозирование образца крупки по весу также не даст результатов: даже в случае отмеренного по массе образца после помещения в кювету крупка под действием гравитации сформирует осадок, промежутки между гранулами в котором заполнятся иммерсионной жидкостью согласно гранулометрическому составу. Итоговое соотношение иммерсионной жидкости и гранул в измеряемом объеме участка кюветы будет точно так же зависеть от гранулометрического состава крупки, нежели от массы образца.

Для минимизации влияния данного фактора на результаты измерений предлагается в ходе подготовки образцов производить перемалывание крупки до максимально однородного гранулометрического состава (порошка), затем отмерять перемолотый образец по объему и заполнять иммерсионной жидкостью с последующим центрифугированием. Это позволит достичь максимальной оптической однородности образцов, приведя оценку спектрального состава максимально к непосредственному измерению химической концентрации интересующих соединений.

Для оценки влияния процесса отстаивания были произведены дополнительные измерения спектров поглощения образцов 2 и 3 спустя 72 ч после формирования. Результаты показали, что за это время оптическая однородность указанных образцов увеличилась, причем образец 3 показал значительно большее увеличение однородности (общий уровень регистрируемой оптической мощности возрос по сравнению с образцом 2). Это предположительно связано с различием в грануло-

Рис. 7. Кювета с образцом 3 до (слева) и после (справа) отстаивания

метрическом составе, образец 3 более однороден и имеет меньший средний диаметр гранул, что в большей мере способствует естественной дегазации образца в состоянии покоя (рис. 7).

Выводы

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что измерения концентрации гидроксильных групп в чистом кварцевом стекле осуществимы на различных длинах волн с использованием источников излучения с различной шириной спектра. Разнятся чувствительность методов, применимость их для изучения образцов, подготовленных отличающимися способами.

Выявлена принципиальная возможность измерять концентрацию ОН-групп по обертому 1400 нм при концентрациях выше 100 ppm. В области концентраций 1–10 ppm необходимо работать с основной полосой поглощения ОН-групп, т.е. нужен источник с длиной волны 2730 нм.

Список литературы

1. Zhuravlev L.T. Concentration of Hydroxyl Groups on the Surface of Amorphous Silicas // *Langmuir*. – 1987. – 3. – 316–318.
2. Пат. № 1099226 СССР / А.В. Киселев, В.И. Лыгин, К.Л. Щепалин, Ю.И. Байков, С.С. Дьяконов); Госкомитет по делам изобр. и открытий. – URL: <http://www.findpatent.ru/patent/109/1099226.html>.

3. Спектрофотометрический метод анализа // Сайт «Лакрасочная промышленность». – URL: <http://lkmprom.ru/analitika/spektrofotometrisheskiy-metod---zadachi-i-primenen>.

4. ГОСТ 17555–72. Пластмассы. Методы определения гидроксильных групп в эпоксидных смолах и эпоксидированных соединениях. – URL: https://allgosts.ru/83/080/gost_17555.

5. Особо чистый кварц Урала как сырье для получения кварцевого стекла для микроэлектроники и волоконно-оптических систем: кварцевые месторождения, строение и свойства кварца, технологии обогащения и синтеза // В.Н. Анфилов, В.Н. Быков, М.А. Игуменцева, А.И. Белковский, Р.Ш. Насыров, Л.Я. Кабанова, П.А. Ардышев, М.В. Штенберг // Проблемы минерального сырья России. – С. 173–187. – URL: https://onznnews.wdcb.ru/ebooks/minerageny/chap_1.1.9.pdf.

6. Plotnichenko V.G., Sokolov V.O., Dianov E.M. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2000. – 261. – P. 186–194.

7. Measuring the Low OH Content in Quartz Glass, Bert Sloots Philips Lighting Quartz & Special Glass Factory, P.O. Box 150, 9670 AD Winschoten, The Netherlands, e-mail: bert.sloots@philips.com

8. Elliott C.R., News G.R. Near Infrared Absorption Spectra of Silica: OH Overtones // Appl. Spectrosc. – 1971. – № 25. – P. 378–379.

9. Hale G.M., Query M.R. // Appl. Opt. – 1973. – № 12. – С. 555–563.

10. Кузьмичев А.С., Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я. // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 7. – С. 650–655.

11. Михайленко С.Н., Бабинов Ю.Л., Головкин В.Ф. Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 09. – С. 765–776.

References

1. Zhuravlev L.T. Concentration of hydroxyl groups on the surface of amorphous silicas. *Langmuir* 1987, 3, pp. 316–318.

2. Kiselev A.V., Lygin V.I., Shchepalin K.L., Baykov Yu.I., Dyakonov S.S. Patent goskomiteta sssr po delam izobreteniy i otkrytiy no. 1099226 (1982), available at: <http://www.findpatent.ru/patent/109/1099226.html>.

3. Lakokrasochnaya promyshlennost: sayt. Spektrofotometrisheskiy metod analiza, available at: <http://lkmprom.ru/analitika/spektrofotometrisheskiy-metod---zadachi-i-primenen>.

4. GOST 17555-72. Plastmassy. metody opredeleniya gidroksilnykh grupp v epoksidnykh smolakh i epoksidirovannykh soedineniyakh [Plastics. Determination of hydroxyl groups in epoxy resins and epoxidized compounds], available at: https://allgosts.ru/83/080/gost_17555.
5. Anfilogov V.N., Bykov V.N., Igumentseva M.A., Belkovskiy A.I., Nasyrov R.Sh., Kabanova L.Ya., Ardyshev P.A., Shtenberg M.V. Osobo chistyy kvarts urala kak syre dlya polucheniya kvartsevogo stekla dlya mikroelektroniki i volokonno-opticheskikh sistem: kvartsevye mestorozhdeniya, stroenie i svoystva kvartsa, tekhnologii obogashcheniya i sinteza [Particularly pure Ural quartz as a raw material for the quartz glass production in range of microelectronics and fiber-optic systems: quartz deposits, structure and properties of quartz, enrichment and synthesis technology]. *Problemy mineragenii Rossii*, available at: https://onznews.wdcb.ru/ebooks/minerageny/chap_1.1.9.pdf.
6. Plotnichenko V.G., Sokolov V.O., Dianov E.M. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000, 261, pp. 186-194.
7. Measuring the low OH content in quartz glass, Bert Sloots Philips Lighting Quartz & Special Glass Factory, P.O. Box 150, 9670 AD Winschoten, The Netherlands, e-mail: bert.sloots@philips.com.
8. Bert sloots measuring the low OH content in quartz glass. *Vibrational Spectroscopy*, 2008, vol. 48, iss. 1, pp. 158-161.
9. Elliott C.R., Newns G.R. Near infrared absorption spectra of silica: OH overtones. *Appl. Spectrosc*, 1971, 25, pp. 378-379.
10. Hale G.M., Querry M.R. *Appl. Opt.*, 1973, 12, pp. 555-563.
11. Kuzmichev A.S., Nadezhdinskiy A.I., Ponurovskiy Ya.Ya. *Kvantovaya elektronika*, 2011, vol. 41, no. 7, pp. 650-655.
12. Mikhaylenko S.N., Babikov Yu.L., Golovko V.F. Informatsionno-vychislitel'naya sistema "Spektroskopiya atmosferykh gazov". *Struktura i osnovnye funktsii. Optika atmosfery i okeana*, 2005, vol. 18, no. 09, pp. 765-776.

Получено 23.11.2018