

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2008 г. А. А. Евстапов*, канд. техн. наук; Н. А. Есикова*; Т. В. Антропова**, доктор хим. наук

* Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

** Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург

E-mail: an_evs@mail.ru

Представлены результаты измерений спектральных характеристик образцов пористых и двухфазных стекол в проходящем и отраженном свете. Для образцов пористых стекол определены спектральные диапазоны, в которых превалирует рэлеевское светорассеяние. Для слабопоглощающих и рассеивающих образцов получены оценки коэффициента поглощения и показателя преломления. В рамках модели эффективной среды вычислены оценки пористости и размеров пористых структур. Для рассеивающих пористых стекол использованы оценки, получаемые по формуле Гуревича–Кубельки–Мунка.

Коды OCIS: 160.4760, 160.2750, 300.0300.

Поступила в редакцию 22.08.2007

Введение

Пористые стекла (ПС) – высококремнеземные продукты сквозного химического травления (выщелачивания) двухфазных щелочно-боросиликатных стекол, обладают уникальными оптическими и сорбционными свойствами и находят широкое применение в различных областях науки и техники [1–6]. Современные технологии позволяют получать пористые структуры с контролируемыми структурными характеристиками [7–10], что обеспечивает возможность использования ПС в оптических приборах, устройствах и сенсорах. В настоящее время пористые структуры успешно применяются в микроаналитических приборах: используются как микрофильтры [11], микронасосы [12], колонки [13], подложки для пробы и реагентов. Высокая сорбционная способность ПС делает их привлекательными для применения в качестве чувствительных элементов био- или хемосенсоров, а оптические свойства ПС дают возможность использовать спектральные методы детектирования для обнаружения и регистрации образующихся в сенсоре комплексов.

Поэтому актуальными представляются проведение комплексных исследований ПС методами оптической спектроскопии и дальнейшее развитие работ, позволяющих установить связь оптических характеристик ПС с характеристиками структурных неоднородностей [14–17]. Не менее важной задачей является определение спектральных диапазонов, в которых можно применить довольно простые и адекватные модели для оценки характеристик порового пространства ПС (см., например, [14, 16, 17]).

1. Образцы, оборудование и методы измерений

Изучались образцы двухфазных (8В, NFF-I и NK-I) и полученных из них пористых стекол (PG2, PG9 и PG12 соответственно) в виде прямоугольных пластин толщиной 2 мм. Кроме того, были исследованы образцы двухфазного стекла DV-1 Sh, подвергнутого двойной термической обработке (при 650 °С в течение 30 ч и 530 °С – 72 ч), а также полученные из него пористые стекла MIP и MAP толщиной 0,5 и 1 мм.

Спектрофотометрические характеристики образцов измерялись в проходящем и отраженном свете на двухлучевом спектрофотометре HITACHI U3410 (Япония) в спектральном диапазоне 250–850 нм с использованием приставок зеркального (5° Specular Reflectance Attachment) и диффузного отражения (Integrating Sphere Accessory). Измерения проводились при скорости сканирования спектра 120 нм/мин и спектральной ширине щели 2 нм.

2. Спектральные характеристики и структурные неоднородности

Спектральные зависимости пропускания и отражения ПС позволяют получить комплексную информацию об образце: о поглощении материала, отражении и рассеянии светового потока от границ раздела сред, неоднородностей структуры и поверхности. Двухфазные и пористые стекла можно условно представить как гетерогенные системы с некоторым эффективным размером фазовых неоднород-

ностей. В двухфазных стеклах наблюдается преимущественно незначительное ослабление света, обусловленное малым поглощением материалом стекла и относительно низким уровнем рассеяния неоднородностей. К одному из наиболее вероятных источников рассеяния двухфазных стекол, по мнению авторов [18, 19], относится структурная неоднородность ликвационного типа, параметры которой определяются составом исходного стекла и режимом его тепловой обработки. Для оценки оптических характеристик (показателя преломления и коэффициента поглощения) в этом случае применяются простые модели, допускающие, что коэффициенты поглощения и рассеяния малы по сравнению с показателем преломления. ПС отличаются от двухфазных наличием дополнительных неоднородностей: отложений кремнегеля (страты, стержневидные структуры и т. п.), пор и микровключений. Эти неоднородности слабо поглощают свет, но вносят существенный вклад в ослабление светового потока из-за рассеяния [10, 19–21].

В зависимости от размеров, формы и распределения неоднородностей в материале возможны различные варианты рассеяния света. Наиболее хорошо изучены случаи рэлеевского рассеяния, когда размеры неоднородностей меньше, чем длина волны зондирующего излучения. Наличие крупных неоднородностей приводит к дифракционному рассеянию и рассеянию Ми. В образцах ПС имеются как мелкие неоднородности (а именно поры, частицы вторичного кремнезема), так и крупные (в качестве которых могут рассматриваться макровключения мелких неоднородностей с высокой локальной концентрацией, а также упоминавшиеся отложения кремнегеля), что должно приводить к сложной картине рассеяния света. О сложном механизме рассеяния в ПС свидетельствует и тот факт, что строгая связь пропускания пластин ПС в спектральном диапазоне 350–800 нм с размерами пор (при размерах пор много меньших длины волны) отсутствует даже при учете параметров структуры пор ПС [20–22].

Выявление спектрального диапазона, в котором преобладает тот или иной тип рассеяния, дает возможность определить характеристики микроструктур, используя достаточно простые модели [10, 23, 24].

Пропускание пластин ПС определяют по крайней мере два компонента: поглощение и рассеяние материала образца и существующих неоднородностей. При обычном измерении пропускания затруднительно разделить эти компоненты, особенно в тех случаях, когда они соизмеримы. Есть основания полагать, что более информативным является измерение спектральных характеристик не только

пропускания, но и отражения, которое зависит от шероховатости поверхности, характеристик зондируемых сред, количества, формы и размеров открытых пор на поверхности образца. Дополнительную информацию о структурных неоднородностях также можно получить при изучении рассеяния образца. Но так как пористые стекла обладают разным рассеянием, оказывается невозможным использовать единый подход при определении оптических характеристик разных стекол.

2.1. Ослабление и поглощение света в образцах

Одной из задач при нахождении оценок оптических характеристик образцов было определение спектральных диапазонов, в которых преобладает рассеяние или поглощение. Ослабление светового потока в гетерогенной среде при длине волны λ зондирующего излучения связано с поглощением и рассеянием на частицах или неоднородностях. Если размеры частиц или неоднородностей малы (размер частиц $a \ll \lambda$), то спектр экстинкции меняется как $1/\lambda$ ($Q_{\text{abs}} \sim 1/\lambda$) в случае, если преобладающую роль играет поглощение, либо как $1/\lambda^4$ ($Q_{\text{sca}} \sim 1/\lambda^4$), если доминирует рассеяние (рэлеевское). Если ослабление светового потока выразить как $\lg\left(\frac{1}{T}\right) = D_\lambda = C_1\lambda^\beta$, то, проведя операцию логарифмирования, получим $\ln(D_\lambda) = C_2 + \beta \ln(\lambda)$. Линейность и соответствующие коэффициенты β могут являться подтверждением наличия поглощающих или рассеивающих частиц. Подобный подход может быть использован при определении не только соотношения между поглощением и рэлеевским рассеянием, но и другими видами рассеяния. Аппроксимируя экспериментальные зависимости прямыми линиями, можно определить спектральные диапазоны, в которых эффективно будет использоваться та или иная модель.

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости ослабления светового потока для образцов двухфазных (8В, НК-I, NFF-I) и пористых стекол (PG2, PG12, PG9) в логарифмических координатах. В табл. 1 приведены результаты линейных аппроксимаций этих зависимостей в соответствующем спектральном диапазоне. Зависимости для двухфазных стекол 8В и NFF-I могут быть аппроксимированы по крайней мере двумя прямыми в спектральных интервалах 250–330 и 330–850 нм.

Анализируя исходные данные измерений и результаты аппроксимации, можно предположить, что для стекол 8В и NFF-I в диапазоне 250–330 нм наблюдается сложная зависимость ослабления света, а в области спектра 330–850 нм, по-видимому, преобладает поглощение, но уровень поглощения

Таблица 1. Линейная аппроксимация спектральных зависимостей $\ln D_\lambda = C_2 + \beta \ln \lambda$

Образец	Спектральный интервал, нм			
	250–330		330–850	
	C_2	β	C_2	β
8B	48,90	8,94	-1,49	-0,28
NFF-I	60,58	10,86	-0,38	-0,45
NK-I	-2,18	-0,19	-2,18	-0,19
PG2	21,62	-3,81	21,62	-3,81
PG9	—	—	29,03	-4,75
PG12	—	—	25,95	-4,29

мал. Для стекла NK-I полученную зависимость можно с удовлетворительной точностью аппроксимировать одной прямой во всем спектральном диапазоне, причем в этом образце преобладает поглощение, которое меньше, чем в случае стекол 8B и NFF-I. Для PG2, PG9 и PG12 спектральные зависимости близки к линейным, а коэффициент $\beta \rightarrow 4$ (для PG2 и PG12), что делает возможным предположение о преобладающей роли рэлеевского рассеяния. Для таких стекол можно воспользоваться ранее предложенным методом определения характеристик рассеивающих структур [16, 17]. Наименьшее рассеяние зарегистрировано у образца PG2, а у образца PG9 наблюдается более сильное рассеяние, которое влияет на определяемые оценки. Следует отметить, что точность искомым оценок выше в том спектральном диапазоне, где $\beta = 4$.

Вышеизложенное позволило определить спектральный диапазон $\lambda = 330\text{--}850$ нм, в котором проявляется незначительное поглощение в двухфазных стеклах, превалирует рэлеевское рассеяние в образцах ПС и для которого будут вычислены оценки оптических характеристик.

2.2. Оценки оптических характеристик

Для слабопоглощающих и слаборассеивающих ПС толщиной l (измерив отражение R и пропускание T) можно определить коэффициент отражения от границы раздела сред, коэффициент поглощения k и показатель преломления n по известным формулам [25], которые справедливы при $k_j < 10^3 \text{ см}^{-1}$ и которые были использованы в работе [17]. Получаемая при этом погрешность определения оптических постоянных зависит от точности измерения R и T .

На рис. 2 приведены спектральные зависимости коэффициента ослабления для ПС. Для стекла PG9 в диапазоне 330–690 нм наблюдается самое вы-

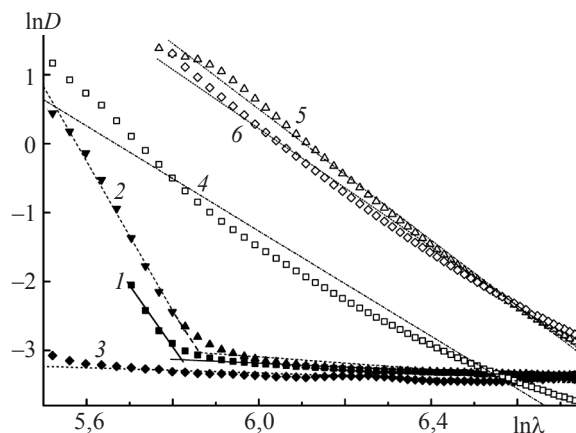


Рис. 1. Экспериментальные зависимости $\ln D$ для двухфазных (1–3) и пористых (4–6) стекол. 1 – 8B, 2 – NFF-I, 3 – NK-I, 4 – PG2, 5 – PG9, 6 – PG12.

сокое ослабление, а в диапазоне 690–850 нм более высокой экстинкцией обладает стекло PG12. Стекло PG2 во всем спектральном диапазоне показывает самое низкое ослабление света. Эти данные хорошо соотносятся с ранее приведенными зависимостями (рис. 1). Отметим, что ослабление светового потока двухфазными стеклами оказалось значительно ниже, чем ослабление ПС (в данной работе эти результаты не приводятся).

Дисперсии показателей преломления для двухфазных и пористых стекол приведены на рис. 3. Наибольшее изменение дисперсии показателя преломления наблюдается для двухфазного стекла 8B ($\Delta n = 0,14$) и полученного из него пористого стекла PG2 ($\Delta n = 0,22$). У стекла NK-I обнаружены локальные экстремумы (например, максимумы на 480 и

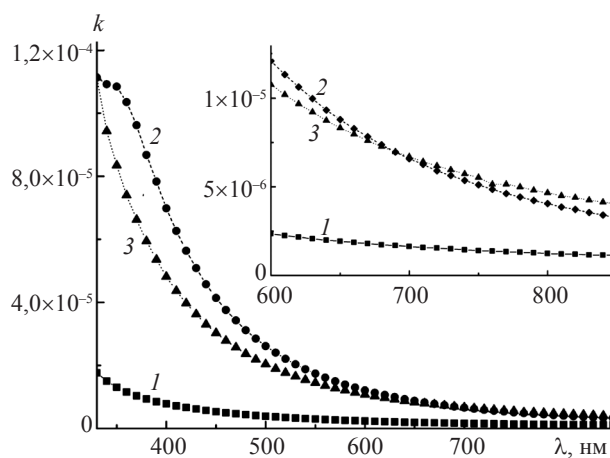


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента поглощения для пористых стекол. 1 – PG2, 2 – PG9, 3 – PG12.

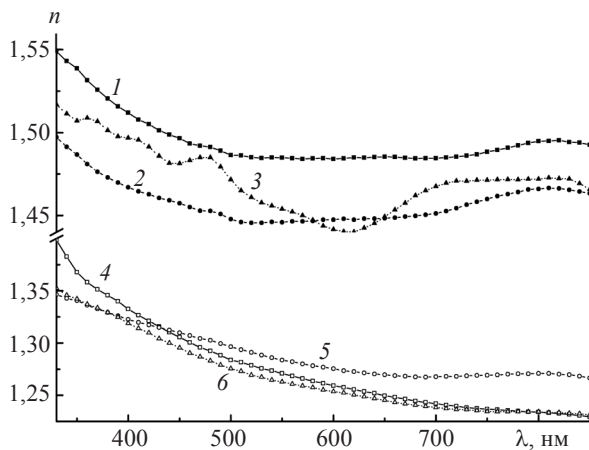


Рис. 3. Дисперсия показателей преломления для двухфазных и пористых стекол. 1 – 8В, 2 – NFF-I, 3 – NK-I, 4 – PG2, 5 – PG9, 6 – PG12.

805 нм и минимумы на 450 и 610 нм), а в пористом стекле PG12 подобных аномалий не зарегистрировано. Стекла NFF-I, NK-I и полученные из них PG9 и PG12 в спектральном диапазоне 330–850 нм обладают меньшей дисперсией. У стекла NFF-I наблюдается минимум на длине волны 520 нм, а у PG9 – локальный минимум на длине волны 690 нм и локальный максимум в области 820 нм. Можно полагать, что вероятной причиной изменений наблюдаемых спектральных зависимостей коэффициента поглощения и показателя преломления в процессе выщелачивания двухфазных стекол является образование рассеивающих и поглощающих структур в ПС.

2.3. Диффузное отражение ПС

Для сильнорассеивающих стекол, таких как МІР, МАР и DV-1 Sh, измерение пропускания представляет довольно трудную задачу, которая может быть решена при наличии специальной аппаратуры и приборов, а в ряде случаев для получения необходимых оценок целесообразно измерить диффузное отражение рассеивающих образцов. Коэффициент диффузного отражения в рассеивающих средах является функцией показателей поглощения и рассеяния вещества, дисперсности и других характеристик среды. Для рассеивающих и поглощающих образцов ПС можно воспользоваться формулой Гуревича–Кубельки–Мунка и, измерив коэффициенты диффузного отражения, определить соотношение констант поглощения и рассеяния. Так, например, в [26] показано, что для бесконечно толстого слоя при диффузном освещении справедливо соотношение

$$f = \frac{(1-r_d)^2}{r_d} = m \frac{k}{\sigma} = \frac{\chi}{s},$$

где f – функция Гуревича–Кубельки–Мунка (ГКМ), r_d – коэффициент диффузного отражения, χ и s – константы поглощения и рассеяния слоя единичной толщины, m – коэффициент, k – показатель поглощения, σ – показатель рассеяния.

Показатель ослабления ε связан с показателями поглощения и рассеяния как $\varepsilon = k + \sigma$. Определив f , можно с точностью до постоянного множителя найти k или σ . Если отношение m/σ не зависит от длины волны? то, зная функцию f , можно достаточно точно судить о спектре поглощения.

Определение функции ГКМ для ПС связано с проблемой получения “толстых” образцов стекол (толщиной более 4 мм) для корректного проведения измерений, так как при фотометрических измерениях тонких образцов сказывается влияние отражения от границы раздела среды стекло–воздух на результаты измерений. Но для сенсорных и функциональных элементов, используемых в микроаналитических устройствах, подходящими являются компактные и тонкие образцы толщиной менее 1 мм, которые и исследовались в этой работе.

На рис. 4 приведены спектральные зависимости функции ГКМ для рассеивающих образцов: двухфазного стекла DV-1 Sh и пористых стекол МІР и МАР разной толщины (0,5 и 1 мм). Для образцов толщиной 0,5 мм наблюдаются более высокие значения функции ГКМ, чем для образцов толщиной 1 мм, что обусловлено влиянием второй поверхности измеряемого образца на отражение. Чем мень-

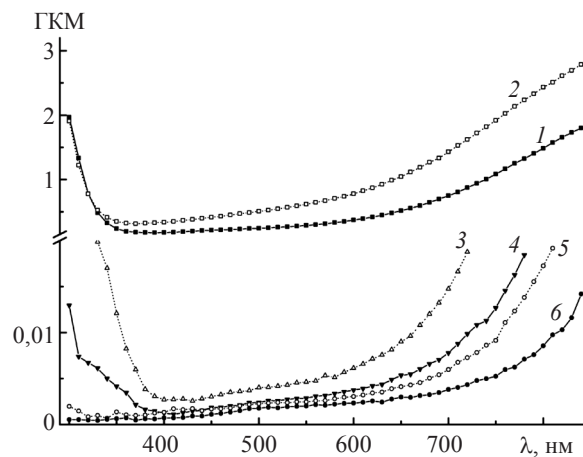


Рис. 4. Спектральные зависимости функции ГКМ для рассеивающих образцов двухфазного (DV-1 Sh) и пористых (МІР и МАР) стекол разной толщины. 1 – DV-1 Sh, 1 мм; 2 – DV-1 Sh, 0,5 мм; 3 – МІР, 0,5 мм; 4 – МІР, 1 мм; 5 – МАР, 0,5 мм; 6 – МАР, 1 мм.

ше ослабление, тем более существенно влияние второй поверхности образца. Полученные данные свидетельствуют о том, что наименьшее ослабление светового потока характерно для стекла DV-1 Sh, а наибольшее – для стекла MAP. Кроме того, для образцов MIP в области 400 нм наблюдается минимум функции ГКМ, а в коротковолновой области значение функции резко возрастает. Для образца MAP функция ГКМ плавно возрастает с увеличением длины волны. Величина функции ГКМ для ПС позволяет сделать вывод о значительном преобладании рассеяния над поглощением. Для двухфазного стекла DV-1 Sh коэффициенты поглощения и рассеяния соизмеримы. Значение показателя рассеяния можно оценить, измерив диффузное пропускание образцов.

2.4. Оценки пористости и средних размеров пор

Оценки структурных характеристик ПС (пористость, размер пор) могут быть определены при использовании моделей эффективной среды, в которых среда рассматривается как суперпозиция составляющих ее компонентов (см., например [27]). Наиболее часто применяется модель Бруггемана [28]. При этом предполагается, что для прозрачных тонких пористых сред, поры которых представляют собой пустоты сферической формы с эффективным размером $d_{\text{пор}}$ (модель открытых пор), соединяющиеся между собой, справедлива формула

$$\eta \frac{n_{\text{пор}}^2 - n_{PG}^2}{n_{\text{пор}}^2 + 2n_{PG}^2} + (1 - \eta) \frac{n_m^2 - n_{PG}^2}{n_m^2 + 2n_{PG}^2} = 0, \quad (1)$$

где $n_{\text{пор}} = 1$ – показатель преломления пустот (воздуха), n_{PG} – показатель преломления пористого стекла, n_m – показатель преломления двухфазного стекла, η – пористость. В зависимости от исходных данных, используя формулу (1), можно вычислить либо эффективный показатель преломления образца, либо пористость.

Для оценки пористости и размера пор в образцах, обладающих поглощением, в работе [29] предложены следующие формулы определения эффективного коэффициента преломления:

$$\frac{n_{\text{eff}}}{n} = 1 - \frac{NV}{2} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2} \right) - i \frac{N2(\pi V)^2 (n^2 - 1)^2}{3\lambda^3 n}, \quad (2)$$

$$\frac{n_{\text{eff}}}{n} = \frac{n_{PG}}{n} - i \frac{k\lambda}{2\pi},$$

где n – показатель преломления исходного двухфазного стекла, N – количество пор в единице объема,

Таблица 2. Оценка пористости образца и среднего радиуса пор

Образец	λ , нм	Пористость			Средний радиус пор, нм	
		по ф-ле (1)	по ф-ле (2)	ПМ и ЭМ*	по ф-ле (1)	ПМ и ЭМ*
PG2	290	0,30	0,39	$\approx 0,30$	3,99	3,3
PG9	350	0,29	0,36	$\approx 0,30$	9,51	6,5 10,5
PG12	330	0,31	0,39	—	8,47	—

* По результатам параметрии и электронной микроскопии.

V – средний объем пор, λ – длина волны измерения. Здесь предполагается, что рассеяние происходит на сферических частицах. Таким образом, найдя объем пор V , можно получить оценки для их размера.

Выбор длины волны, на которой определяются оценки, обусловлен тем, что более эффективно рассеяние происходит в коротковолновой области спектра. Поэтому можно предположить, что более правильными будут оценки, полученные для крайних коротковолновых участков соответствующей линейной спектральной зависимости ПС. Значения оценок и длин волн, на которых они определялись, приведены в табл. 2.

Итак, по формуле Бруггемана получены оценки пористости структур, наиболее близкие к данным порометрии и электронной микроскопии. Применение формулы (2) позволяет достаточно точно оценивать размеры пор, хотя оценки пористости оказываются завышенными. Такие расхождения в оценке пористости, по-видимому, могут быть связаны с наличием ультрапор и других неоднородностей, которые не учитываются в рассматриваемой модели. Следует отметить, что в процессе выщелачивания образуются поры, имеющие неодинаковые размеры и форму. Это также вносит определенный вклад в рассеяние образцов и, соответственно, в получаемые оценки.

Заключение

Спектральные измерения образцов двухфазных (8B, NFF-I, NK-I) и пористых стекол (PG2, PG9, PG12) в проходящем и отраженном свете в диапазоне 250–850 нм позволяют определить спектральные интервалы, где преобладают процессы рассеяния или поглощения. В этих интервалах для нахождения оценок показателя преломления и коэффициента поглощения двухфазных и пористых стекол могут быть использованы простые модели и формулы.

Для слабопоглощающих и рассеивающих образцов в рамках модели эффективной среды по дан-

ным спектрофотометрических измерений получены оценки пористости и средних размеров пор, близкие к данным порометрии и электронной микроскопии.

При изучении сильнорассеивающих образцов использована формула Гуревича–Кубельки–Мунка для вычисления оценок соотношения констант поглощения и рассеяния пористых стекол.

Исследования проведены при поддержке РФФИ (проект № 04-03-32165а) и Программы фундаментальных исследований Отделения химии и наук о материалах РАН “Создание эффективных методов химического анализа и исследования структуры вещества и материалов” (проект № 02.1.29 “Создание наноструктурных пористых элементов функционального назначения для микроаналитических систем”).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазурин О.В., Роскова Г.П., Аверьянов В.И., Антропова Т.В. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение. Л.: Наука, 1991. 276 с.
2. Мешковский И.К. Композиционные оптические материалы на основе пористых матриц. СПб.: Изд. СПбГИТМО (ТУ), 1998. 332 с.
3. Курочкин В.Е., Муравьев Д.О., Евстратов А.А., Котов В.П. Люминесцентные сенсоры кислорода: тенденции и перспективы развития // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 27–32.
4. Aleksashkina M.A., Venzel B.I., Svatovskaya L.G. Application of Porous Glasses as Matrices for Nanocomposites // Glass Physics and Chemistry. 2005. V. 31. № 3. P. 269–276.
5. Novikov A.F., Zemskii V.I. Glassy spectral gas sensors based on the immobilized indicators // Proc. SPIE. 1995. № 2550. P. 119–129.
6. Enke D., Janowski F., Schwieger W. Porous glasses in the 21-th century – short review // Microporous and Mesoporous Materials. 2003. V. 60. № 1. P. 19–30.
7. Mojumdar S.C., Kozánková J., Chocholousek J., Majling J., Nemecek V. The Microstructure and optical transmittance thermal analysis of sodium borosilicate bio-glasses // J. of Thermal Analysis and Calorimetry. 2004. V. 78. № 1. P. 145–152.
8. Антропова Т.В., Дроздова И.А. Влияние условий получения пористых стекол на их структуру // Физика и химия стекла. 1995. Т. 21. № 2. С. 199–209.
9. Захаров С.Л. Получение и свойства пористых боросиликатных стекол // Материаловедение. 2004. № 1. С. 53–56.
10. Альтишлер Г.Б., Баханов В.А., Дульнева Е.Г., Мешковский И.К. Исследование оптических характеристик активных элементов из кварцевого микропористого стекла // Опт. и спектр. 1983. Т. 55. № 2. С. 369–374.
11. Khandurina J., Jacobson S.C., Waters L.C., Foote R.S., Ramsey M.J. Microfabricated Porous Membrane Structure for Sample Concentration and Electrophoretic Analysis // Anal. Chem. 1999. № 77. P. 1815–1819.
12. Yao S., Santiago J.G. Porous glass electroosmotic pumps: theory // J. of Colloid and Interface Science. 2003. № 268. P. 133–142.
13. Косарев Е.Л., Муранов К.О. Хроматография сверхвысокого разрешения // ПТЭ. 2001. № 5. С. 74–79.
14. Dotsenco A., Efremov A., Kuchinsky S. Modelling the optical properties of heterogeneous glasses // Proc. Int. Congr. Glass. Invited Papers. Edinburg, Scotland, 1–6 July 2001. V. 1. P. 198–214.
15. Antropova T.V., Drozdova I.A., Yastrebov S.G., Evstratov A. A. Porous glass: inhomogeneities and light transmission // Optica Applicata. 2000. V. XXX. № 4. P. 553–567.
16. Evstratov A.A., Antropova T.V., Drozdova I.A., Yastrebov S.G. Optical properties and structure of porous glasses // Optica Applicata. 2003. V. XXXIII. № 1. P. 45–54.
17. Evstratov A.A., Esikova N.A., Antropova T.V. Spectral characteristics and structure of porous glasses // Optica Applicata. 2005. V. XXXV. № 4. P. 32–39.
18. Порай-Кошиц Е.А., Левин Д.И., Андреев Н.С. О структуре натриево-боросиликатных стекол в связи с явлением опалесценции. Сообщение 4. Зависимость строения натриево-боросиликатных стекол от продолжительности их прогрева при постоянной температуре // Изв. АН СССР. ОХН. 1956. № 3. С. 287–293.
19. Роскова Г.П., Морозова Э.В., Баханов В.А. Светопропускание пористых пластин, получаемых из двухфазных натриево-боросиликатных стекол с различной структурой // Физика и химия стекла. 1991. Т. 17. № 4. С. 623–630.
20. Роскова Г.П., Цехомская Т.С., Вензель Б.И. Светопропускание пористых стекол различной структуры // Физика и химия стекла. 1988. Т. 14. № 6. С. 911–914.
21. Смирнова И.С., Антропова Т.В., Сидорова М.П., Ермакова Л.Э., Роскова Г.П. Влияние условий получения микропористых стекол на их светопропускание и величины коэффициентов структурного электросопротивления // Физика и химия стекла. 1996. Т. 22. № 4. С. 551–558.
22. Крейсберг В.А., Ракчеев В.П., Антропова Т.В. Влияние концентрации кислоты на морфологию микро- и мезопор пористых стекол // Физика и химия стекла. 2006. Т. 32. № 6. С. 845–854.
23. Кучинский С.А., Суханов В.И., Хазова М.В., Доценко А.В. Эффективные оптические постоянные пористого стекла // Опт. и спектр. 1991. Т. 70. № 1. С. 150–154.
24. Кучинский С.А., Суханов В.И., Хазова М.В. Принципы формирования голограмм в капиллярных композитах // Опт. и спектр. 1992. Т. 72. № 3. С. 716–730.

25. Шиловский А.А. Прикладная физическая оптика. М.: Физматгиз, 1961. 822 с.
26. Иванов А.П. Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969. 592 с.
27. Виноградов А.П. Электродинамика композитных материалов. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 208 с.
28. Ovechko V.S., Dmytruk A.M., Fursenko O.V., Lepeshkina T.P. Ellipsometry and spectroscopy of porous glasses surfaces // Vacuum. 2001. № 61. P. 123–128.
29. Верецагин В.Г., Дынич Р.А., Понявина А.Н. Эффективные оптические параметры пористых диэлектрических структур // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 3. P. 486–490.
-