

Научная статья

УДК 538.971, 539.26

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14408>

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПОРИСТОГО СТЕКЛА С ИНТЕРФЕЙСОМ, МОДИФИЦИРОВАННЫМ УГЛЕРОДОМ

С. А. Удовенко ¹ ✉, А. А. Набережнов ², С. А. Борисов ²,
А. А. Сысоева ², М. В. Томкович ², А. Х. Исламов ³, А. И. Куклин ³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия;

³ Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного
института ядерных исследований, г. Дубна, Россия

✉ udovenko_sa@spbstu.ru

Аннотация. С целью создания нанокompозитных материалов на основе искусственных нанопористых матриц с модифицированным интерфейсом разработана процедура введения углерода С в каналы нанопористого натриево-боросиликатного стекла (PG6) со средним диаметром пор $6,0 \pm 0,5$ нм из водного раствора сахарозы с последующим ее термическим разложением. Образцы созданного материала PG6+C были исследованы методами адсорбционной порометрии азота (NAP), дифракции рентгеновского излучения (XRD) и малоуглового рассеяния нейтронов (SANS). В результате XRD-исследования были получены данные о состоянии углерода в порах (размер пор определяли методом NAP) созданной модифицированной матрицы, а метод SANS позволил выявить особенности внутреннего пространственного устройства данной матрицы и получить информацию о состоянии поверхности каналов в этих образцах. Совокупный анализ полученных результатов показал, что процесс термического разложения сахарозы в каналах приводит к формированию слоя аморфного углерода на внутренней поверхности каналов (пор) данного стекла, т. е. происходит модификация интерфейса «матрица – пора».

Ключевые слова: нанопористое боросиликатное стекло, модификация интерфейса, малоугловое рассеяние нейтронов, рентгеновская дифракция

Финансирование: В СПбПУ работы проводились при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (RFBR-BRICS грант № 19-52-80019).

Для цитирования: Удовенко С. А., Набережнов А. А., Борисов С. А., Сысоева А. А., Томкович М. В., Исламов А. Х., Куклин А. И. Структурные характеристики нанопористого стекла с интерфейсом, модифицированным углеродом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 4. С. 114–125. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14408>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14408>

STRUCTURE CHARACTERISTICS OF NANOPOROUS GLASS WITH THE CARBON-MODIFIED INTERFACE

S. A. Udovenko ¹ ✉, A. A. Naberezhnov ², S. A. Borisov ²,
A. A. Sysoeva ², M. V. Tomkovich ², A. Kh. Islamov ³, A. I. Kuklin ³

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

² Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

³ Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

✉ udovenko_sa@spbstu.ru

Abstract: Samples of porous matrices with the surface of channels (pores) modified with carbon were prepared on the basis of nanoporous sodium borosilicate glasses (SBS) with an average pore diameter of 6 ± 0.5 (PG6) nm. A procedure has been developed for introduction of carbon into the PG6 channels from an aqueous solution of sucrose with its subsequent thermal decomposition. X-ray diffraction studies of the state of carbon in the pores of the obtained modified matrix have been carried out. The small-angle neutron scattering method was used for study of internal spatial arrangement of these matrices and to obtain information concerning to the state of channel surfaces in these samples. A combined analysis of the data obtained by X-ray diffraction and from the results of small-angle neutron scattering showed that the process of thermal decomposition of sucrose in the channels led to the formation of amorphous carbon layers on the internal surface of the channels (pores) in these glasses, i.e. the "matrix-porous space" interface was being modified.

Keywords: nanoporous borosilicate glasses, modification of interface, small angle neutron scattering, X-ray diffraction

For citation: Udovenko S. A., Naberezhnov A. A., Borisov S. A., Sysoeva A. A., Tomkovich M. V., Islamov A. Kh., Kuklin A. I., Structure characteristics of nanoporous glass with the carbon-modified interface, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (3) (2021) 114–125. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14408>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Влияние ограниченной геометрии и, в частности, размерного эффекта, на макроскопические физические свойства материалов сегодня активно изучается и является одной из наиболее актуальных проблем в современной физике конденсированного состояния, так как экспериментально и теоретически установлено, что в этом случае происходит существенная модификация таких свойств. В первую очередь интерес вызывают нанокompозитные материалы (НКМ) на основе природных и искусственных пористых матриц, в качестве которых активно используются пористые стекла, опалы, хризотилловые асбесты, молекулярные сита типа MCM-41(48), SBA-15 и т. п. Существующие методы создания НКМ позволяют получать материалы с магнетиками, сегнетоэлектриками, полупроводниками, металлами, жидкостями и прочими веществами, внедренными в поровое пространство, а современное экспериментальное оборудование – изучать влияние размерного эффекта и условий искусственно ограниченной геометрии на кристаллическую структуру, фазовые переходы (ФП), транспортные свойства и другие характеристики наноструктурированных веществ.

Следует отметить, что выбор типа матрицы и среднего диаметра каналов позволяет проследить связь размера наночастицы (а иногда и ее формы) со свойствами и оценить роль самой матрицы (в частности, интерфейса «матрица – внедренный материал») и ее топологии (пространственной организации) в формировании новых макроскопических физических свойств нанокompозитных материалов.

К сожалению, вопрос о влиянии интерфейса на свойства НКМ изучен мало, поэтому целью данной работы было создание нового типа пористых матриц на основе пористых стекол (Porous Glass (PG)) со средним диаметром пор 6 нм (PG6), в которых граница раздела «матрица – поровое пространство» (интерфейс) модифицирована путем ее покрытия углеродом.

Большинство исследованных ранее НКМ на основе пористых стекол было изготовлено с помощью введения материалов в поры либо из водного раствора, либо из расплава. Нанесение же углерода на поверхность наноканалов резко изменяет смачиваемость матрицы внедряемым водным раствором (расплавом) и может приводить к значительной трансформации пространственной организации наночастиц в этих нанокompозитах, а значит и физических характеристик (макроскопических свойств) НКМ. В данной работе мы планировали не только изготовить матрицы с модифицированным интерфейсом, но и провести сравнение их характеристик с аналогичными параметрами исходных пористых стекол PG6, а также получить информацию о состоянии углеродного покрытия в новых пористых стеклах. Для исследования свойств матриц мы использовали адсорбционную порометрию азота (*англ.* Nitrogen adsorption porometry (NAP)), дифракцию рентгеновского излучения и малоугловое рассеяние нейтронов (*англ.* X-ray diffraction (XRD) и Small angle neutron scattering (SANS)).

Изготовление образцов и экспериментальные методы

Для изготовления стекол с интерфейсом, модифицированным углеродом, были использованы пористые натриево-боросиликатные стекла (НБС) со средним диаметром пор $6,0 \pm 0,5$ нм (PG6); это так называемые микропористые стекла, получаемые после частичного удаления химически нестойкой фазы (ХНФ), которая образуется при проведении фазового расслоения [1]. Диаметр пор в исходных матрицах PG6 был определен методом ртутной порометрии, поры в этих стеклах образуют случайную сквозную 3D-систему взаимосвязанных каналов – дендритную структуру.

Пористые стекла были изготовлены по стандартной процедуре [1] в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе. На рис. 1 схематически представлена пространственная организация «пустого» стекла PG6. Поровое пространство в каналах между частицами вторичного кремнезема (в основном состоящего из диоксида кремния SiO_2 и образующегося после травления исходных стекол кислотой) и телом матрицы, состоящим из аморфного SiO_2 , как раз и формирует в данном стекле трехмерную случайную многосвязную систему наноканалов со средним диаметром около 6 нм.

Для проведения измерений изготавливались образцы в виде прямоугольных пластин микропористого НБС с размерами, не превосходящими $10,0 \times 4,0 \times 0,5$ мм (это диктовалось требованиями к образцам для измерений SANS на установке). Пористость данных стекол составляла примерно 23 % от общего объема образца. Масса образца незаполненного стекла PG6, на котором проводились измерения SANS, составляла 21,1 мг; масса образца незаполненного стекла PG6, использованного для заполнения углеродом, составляла 30,3 мг; масса углерода, введенного в этот образец, составляла 1,6 мг (около 5 %).

Обработка приготовленных стеклянных пластин велась следующим образом. Пустое пористое стекло предварительно отжигали на воздухе в течение суток при температуре 500 °С, затем его помещали в 15 %-й водный раствор сахарозы (марки ч.д.а.) и медленно нагревали до 200 °С. После начала разложения сахарозы температуру медленно поднимали до 300 °С, и при этой температуре образец выдерживали около 24 ч. В конце отжига температуру повышали до 350 °С на 30 мин. Степень заполнения пор определяли гравиметрическим методом, она составляла примерно $16,5 \pm 2,3$ % от исходного объема пор. Естественно, что заполнение пор углеродом должно было привести к уменьшению общего объема порового пространства и удельной площади поверхности каналов, поэтому на следующем этапе мы проводили измерение уменьшения этой площади

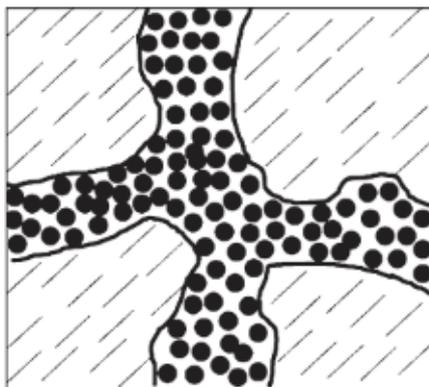


Рис. 1. Схема пространственной организации микроструктуры микропористых щелочно-боросиликатных стекол [1]:

каркас матрицы (штрихованные области) состоит в основном из SiO_2 ; в области химически нестойкой фазы (ХНФ, остальное пространство) после первого цикла травления кислотой формируется микропористая структура; вторичный кремнезем (черные кружки) имеет собственную внутреннюю структуру; поверхности каналов, в которых формируется ХНФ, показаны черными линиями

методом адсорбционной порометрии (БЭТ-метод, предложен Брунауэром, Эмметом и Теллером [2, 3]). Для исходного PG6 удельная поверхность составляла $68,27 \pm 0,14 \text{ м}^2/\text{г}$, а для стекла с углеродом – $49,58 \pm 0,48 \text{ м}^2/\text{г}$, т. е. заполнение углеродом действительно приводило к сокращению удельной поверхности, при этом общее изменение этого параметра составляло примерно 27 %, что достаточно хорошо согласуется с изменением объема порового пространства.

Дифракционные исследования проводились при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре “SuperNova Oxford diffraction” (в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого) на длине волны $0,7092 \text{ \AA}$ ($K_{\alpha 1} \text{ Mo}$), в режиме на прохождение; при этом падающий пучок фокусировался в узкое пятно на поверхностях образцов.

Внутреннюю пространственную организацию образцов исходных пористых стекол PG6 и образцов PG6 с углеродом (далее для этих стекол используется сокращение PG6+C) мы исследовали на установке для малоуглового рассеяния нейтронов “YuMO” [4 – 6], расположенной на импульсном реакторе ИБР-2 (Лаборатория нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области, Россия).

Установка “YuMO” – это инструмент с двумя подвижными детекторными системами, с расстояниями «образец – детектор», равными 5,28 и 13,4 м, перекрывающими диапазон $0,006 - 0,500 \text{ \AA}^{-1}$ по переданному импульсу Q ; величина Q определяется следующим образом:

$$Q = (4\pi/\lambda) \cdot \sin (\theta/2),$$

где λ , \AA , – длина волны нейтронного излучения; θ – угол рассеяния.

Максимальный доступный диаметр образца в пучке нейтронов составлял 14 мм, т. е. в нашем случае образцы полностью находились в падающем пучке. Полученные спектры рассеянных нейтронов корректировали на прохождение и толщину образцов, фоновое рассеяние на использованных держателях (в нашем случае держателем служила тонкая липкая лента) и на ванадиевый калибровочный образец с использованием пакета SAS [7, 8]. В результате были получены зависимости $I(Q)$ – интенсивности рассеяния нейтронов I от переданного импульса Q (в абсолютных единицах см^{-1}).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований мы использовали дифракцию рентгеновского излучения для исследования состояния углерода, введенного в поры стекла PG6. На рис. 2

представлены дифрактограммы как для пустого стекла PG6, так и для PG6, заполненного углеродом. В обоих случаях не наблюдалось каких-либо явных дифракционных пиков, что хорошо видно из сравнения смоделированного спектра графита (рис. 2, вертикальные линии), ожидаемого для данной длины волны, с экспериментальным спектром для PG6+C (на том же рис. 2).

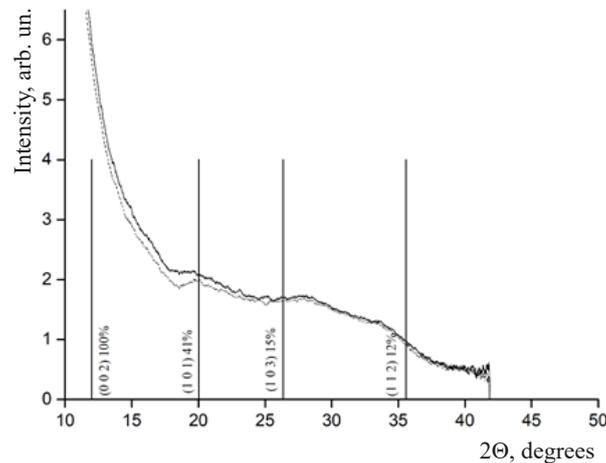


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы для пустого (пунктирная линия) и заполненного углеродом С (сплошная линия) образцов пористых стекол PG6.

Вертикальными линиями отмечены позиции наиболее интенсивных пиков графита С на данной длине волны (0,7092 Å); представлены процентные интенсивности каждого отражения относительно пика (002)

Образование каких-либо других кристаллических фаз углерода представляется нам маловероятным, если принять во внимание процедуру заполнения пор (см. выше). Известно, что в пустом образце стекла PG6 кремнезем SiO_2 находится в аморфном состоянии (то же можно заключить из анализа данных на рис. 2). Видно, что спектры для обоих типов стекол симбатны, поэтому из всего вышеизложенного мы можем с уверенностью сделать вывод о том, что в стекле PG6+C и углерод находится в аморфном состоянии.

Следует обратить внимание на взаимное расположение кривых: та, что соответствует рассеянию на PG6+C, лежит выше таковой для PG6. Поскольку площадь «засветки» образцов рентгеновским лучом в обоих случаях одна и та же (из геометрии эксперимента), толщина образцов практически одинакова и время экспозиции одно и то же, то появление дополнительного рассеяния связано с появлением дополнительных рассеивающих центров: атомов углерода, что в целом подтвердилось нашими расчетами.

В связи с тем, что наши исследования были направлены на выявление особенностей внутреннего устройства стекол PG6+C и сравнение с аналогичными параметрами для образцов PG6, в дальнейшем мы использовали метод SANS. Его преимущество как раз и состоит в возможности получать информацию о пространственной организации исследуемых объектов, в том числе о размерах частиц в стеклах и об их фрактальных характеристиках. Для интенсивности рассеяния нейтронов $I(Q)$ на пористых системах известно следующее соотношение [9]:

$$I(Q) \sim V_p^2 n_p^2 (\rho_p - \rho_s)^2 P(Q) S(Q), \quad (1)$$

где V_p , см^3 , – объем пор; n_p , см^{-3} , – их плотность в пространстве; ρ_p , ρ_s , см^{-2} , – величины плотности длин рассеяния на материале в порах и на матрице, соответственно; $P(Q)$ – форм-фактор для пор (либо частиц в матрице); $S(Q)$ – структурный фактор, определяемый пространственным упорядочением пор (он описывает интерференционные эффекты от рассеяния на контрасте пора – матрица); напомним, что Q , Å^{-1} , – переданный импульс (см. выше).

В случае разупорядоченных систем, таких как пористые стекла, и при отсутствии сильной корреляции между неоднородностями (или флуктуаций в плотности длин рассеяния), а также при больших значениях Q принципиальную роль в формуле (1) играют структурный фактор $S(Q)$ и разность плотности длин рассеяния $(\Delta\rho)^2 = (\rho_p - \rho_s)^2$. Большими значениями Q считаются те, которые относятся к области Порода [10], где выполняется условие $QR_g \geq 1$ (R_g – радиус гирации, или среднеквадратичный радиус инерции рассеивающей частицы или поры).

С учетом приведенных условий соотношение (1) еще упрощается:

$$I(Q) = A \cdot Q^{-\alpha} + B, \tag{2}$$

где A, B – константы, причем B – это величина фона при больших значениях Q .

В работе [11] было показано, что для сильно разветвленных поверхностей (поверхностных фракталов с размерностью D_s в пределах $2 < D_s < 3$) значения показателя степени α лежат в интервале $3 < \alpha \leq 4$ и для интенсивности рассеяния справедливо следующее выражение:

$$I(Q) = A \cdot Q^{-(6 - D_s)} + B, \tag{3}$$

причем параметр $(\Delta\rho)^2$ неявно присутствует в константе A [11], т. е. величина $\Delta\rho$ (часто называемая контрастом) играет принципиальную роль в зависимости интенсивности I малоуглового рассеяния нейтронов от переданного импульса Q .

Теперь рассмотрим экспериментально полученные зависимости $I(Q)$ для стекол PG6 и PG6+C (рис. 3). Следует отметить, что все данные, приведенные на рис. 3 и 4, нормированы на массу образцов.

Принципиальное различие между стеклами состоит в том, что в пустом стекле PG6 имеется только один интерфейс «матрица – поровое пространство», который и определяет рассеяние. Поскольку поровое пространство заполнено воздухом, можно положить $\rho_p = 0$, и тогда все рассеяние определится величиной ρ_s , которая для кремнезема SiO_2 следует выражению

$$\rho_s = (b_{\text{Si}} + 2b_{\text{O}}) \cdot N_A \cdot d_s / M_{\text{mol}}, \tag{4}$$

где $b_{\text{Si}}, b_{\text{O}}$, см, – амплитуды рассеяния нейтронов на ядрах кремния и кислорода соответственно, $b_{\text{Si}} = 4,149 \cdot 10^{-12}$ см, $b_{\text{O}} = 5,803 \cdot 10^{-12}$ см [12]; N_A , моль⁻¹, – число Авогадро; d_s , г/см³, – физическая плотность стекла, $d_s = 2,12$ г/см³; M_{mol} , г/моль, – масса моля диоксида кремния SiO_2 , $M_{\text{mol}} = 60,084$ г/моль.

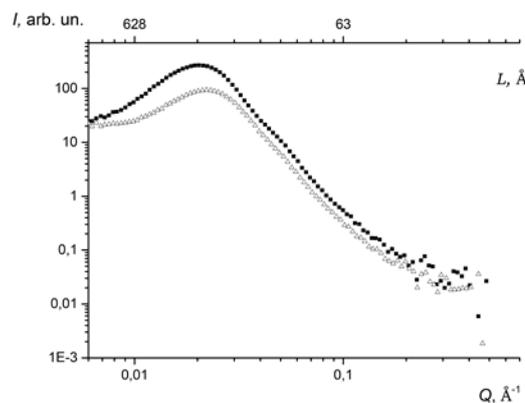


Рис. 3. Зависимости интенсивности малоуглового рассеяния нейтронов от переданного импульса для незаполненного пористого стекла PG6 (треугольники) и того же пористого стекла, заполненного углеродом, – PG6+C (квадраты).

Верхняя шкала соответствует пространственному масштабу L (Å) в прямом пространстве

После подстановки значений получаем значение ρ_s :

$$\rho_s(\text{SiO}_2) = 3,35 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}.$$

В образце стекла PG6+C существует три интерфейса: углерод – матрица, углерод – поровое пространство и матрица – поровое пространство. Для плотности длины рассеяния нейтронов на углероде (на графите в нашем случае $d_C = 2,15 \text{ г/см}^3$, $b_C = 6,64 \cdot 10^{-12} \text{ см}$), аналогичный расчет по формуле (4) дает значение $\rho(C) = 7,18 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Интенсивность рассеяния пропорциональна $(\Delta\rho)^2$, а в случае PG6+C на всех трех интерфейсах величины $(\Delta\rho)^2$ достаточно велики, причем даже для случая интерфейса углерод – матрица значение

$$\Delta\rho = (7,18 - 3,35) \cdot 10^{10} = 3,83 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$$

выше, чем таковое для интерфейса матрица – пустое пространство. И тогда следует ожидать резкого увеличения рассеяния на образце PG6+C, по сравнению с PG6, что и наблюдается в эксперименте (см. рис. 3). С другой стороны, относительная доля углерода по массе, как указано выше, составляет всего около 5 %, а рассеяние, как видно на рис. 3, возрастает в разы и даже на порядок в области $Q \approx 0,02 \text{ \AA}^{-1}$. Совершенно очевидно, что такой эффект возможен только для развитых интерфейсов, в образовании которых принимает участие углерод. На зависимостях $I(Q)$ наблюдаются также максимумы интенсивности при $Q_{\text{max1}} \approx 0,0222 \text{ \AA}^{-1}$ для PG6 и при $Q_{\text{max2}} \approx 0,0203 \text{ \AA}^{-1}$ для PG6+C. Хорошо известно, что в обычных пористых щелочно-боросиликатных стеклах типа Vycor [13, 14] существует модулированная структура (корреляционный пик) с характерным пространственным масштабом $L \sim 2\pi/Q_{\text{max}}$ со значением L около 30 – 45 нм, причем масштаб не зависит от среднего диаметра пор, а исключительно характеризует пористые матрицы этого типа. Заполнение части порового пространства углеродом приводит к небольшому (но явно видимому) сдвигу положения максимума Q_{max2} в сторону большего значения L (примерно 31 нм), по сравнению с соответствующим значением для PG6 (примерно 28 нм), причем сам пик становится существенно более выраженным, чем на кривой для PG6. Скорее всего, это связано с тем, что появляется некий новый, дополнительный пространственный масштаб, связанный с появлением областей локального упорядочения атомов углерода.

На следующем этапе исследований мы провели детальный анализ углов наклона зависимостей $I(Q)$ для образцов PG6 и PG6+C в области больших значений переданного импульса Q , где следовало бы ожидать выполнения закона Порода (рис. 4); согласно этому закону, $I(Q) \sim Q^{-4}$. Оказалось, что действительно в диапазоне значений Q от 0,03 до 0,10 \AA^{-1} этот закон хорошо выполняется для обоих образцов, что свидетельствует о рассеянии на гладкой поверхности каналов (пор). При $Q \approx 0,1 \text{ \AA}^{-1}$ (это соответствует пространственному масштабу около 6 нм, т. е. среднему диаметру каналов по данным ртутной порометрии, приведенным ранее) наблюдается кроссовер в поведении зависимостей $I(Q)$. Для пустого стекла PG6 в интервале $0,100 < Q < 0,178 \text{ \AA}^{-1}$ достаточно надежно выделяется участок, на котором $I(Q) \sim Q^{-3,1}$ (пунктирная прямая на рис. 4,а), что соответствует рассеянию на поверхности с развитой фрактальной структурой. Это либо рассеяние на особенностях внутренней структуры частиц вторичного кремнезема (см. рис. 1), либо на особенностях пространственной организации всей химически нестойкой фазы в целом. Заполнение пористого стекла PG6 углеродом приводит к резкому увеличению параметра α до 3,6 (см. рис. 4,б), т. е. убирается часть пространственной разветвленности в общей поверхности ХНФ, и значение этого параметра приближается к 4, к характерному для закона Порода ($\alpha \approx 4$). Если это так, то в результате должно наблюдаться уменьшение среднего диаметра пор. Мы проверили такую возможность с помощью метода адсорбционной порометрии азота и получили результаты, представленные в таблице.

Приведенные данные наглядно свидетельствуют, что заполнение стекла PG6 углеродом приводит к значительной модификации пространственной организации порового пространства полученной новой матрицы, т. е. углерод не только покрывает поверхность

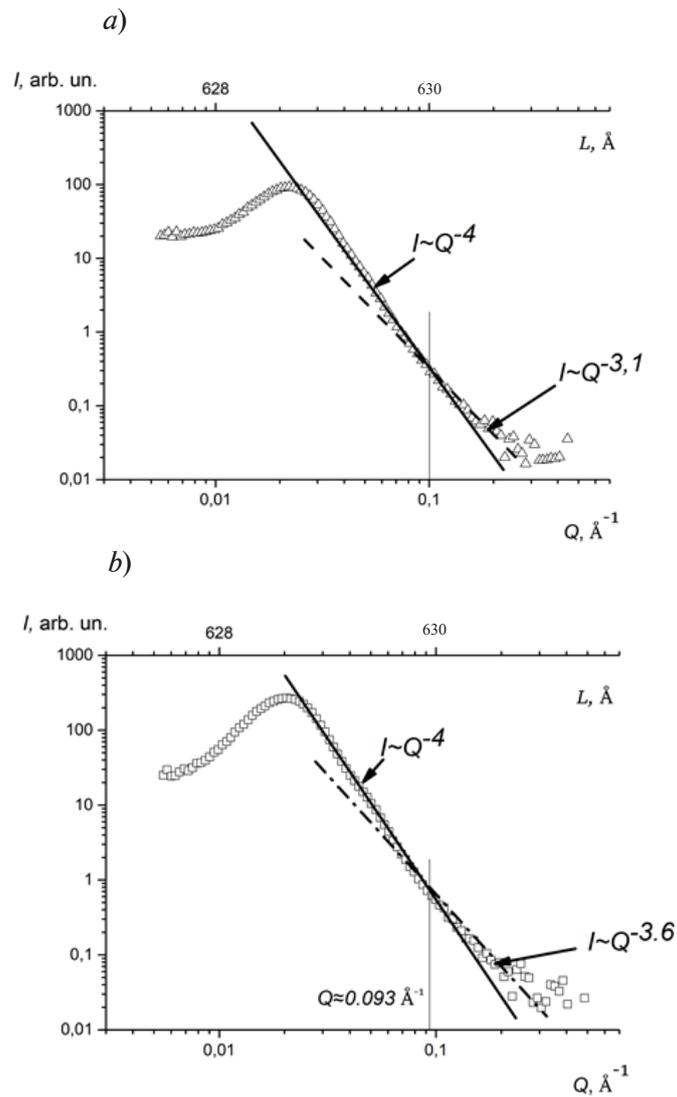


Рис. 4. Детальный анализ зависимостей для образцов PG6 (a) и PG6+C (b), приведенных на рис. 3, в области выполнения закона Порода $I(Q) \sim Q^{-4}$ (представлен прямыми сплошными линиями).
Верхние шкалы соответствуют пространственному масштабу L (Å) в прямом пространстве

Таблица

Данные адсорбционной порометрии азота для исследованных образцов стекол

Образец стекла	Средний диаметр пор, нм	
	при адсорбции	при десорбции
PG6	12,70	7,03
PG6+C	8,31	4,73

Обозначения. PG6 и PG6+C – это незаполненное натриево-боросиликатное пористое стекло (Porous Glass) со средним диаметром пор 6 нм и то же стекло, заполненное углеродом С.

каналов, в которых формируется ХНФ (см. рис. 1), но и самих частиц ХНФ; при этом частично уменьшается и сам средний диаметр каналов между указанными частицами.

Заключение

Из анализа рентгеновских дифракционных спектров и спектров SANS установлено, что при введении углерода С в поровое пространство исходного пористого натриево-босиликатного стекла со средним диаметром пор 6 нм (PG6) происходит модификация внутренней структуры порового пространства. Показано, что введенный в поры (каналы) исходной матрицы углерод находится в аморфном состоянии и образует в этом пространстве слои как на поверхности каналов, в которых формируется химически нестойкая фаза (ХНФ), так и на самих частицах ХНФ. Об образовании развитых интерфейсов с участием углерода свидетельствует резкий рост интенсивности рассеяния $I(Q)$ на образце PG6+С, по сравнению с PG6, несмотря на малую массовую долю введенного в поры углерода. В области больших переданных импульсов Q интенсивность малоуглового рассеяния хорошо соответствует закону Порода, т. е. рассеянию на каналах с гладкой поверхностью.

Таким образом, в результате работы получены нанопористые матрицы с интерфейсом, модифицированным углеродом.

На основе этих матриц мы планируем создать новые наноккомпозитные материалы (НКМ), в поры которых предполагаем на первом этапе ввести сегнетоэлектрические материалы, свойства которых ранее исследовались только для обычных нанопористых ЩБС, и получить информацию о влиянии модифицированного интерфейса на макроскопические физические свойства НКМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазурин О. В., Роскова Г. П., Аверьянов В. И., Антропова Т. В. Двухфазные стекла. Структура, свойства, применение. Под ред. Б. Г. Варшал. Ленинград: Наука, 1991. 276 с.
2. Lowell S., Shields J., Thomas M. A., Thommes M. Characterization of porous solids and powders: surface area, porosity, and density (Particle Technology Series. Vol. 16). Amsterdam, Berlin: Springer Netherlands, 2004. 350 p.
3. Barrett E. P., Joyner L. G., Halenda P. P. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms // Journal of the American Chemical Society. 1951. Vol. 73. No. 1. Pp. 373–380.
4. Ostanevich Yu. M. Time-of-flight small angle scattering spectrometers on pulsed neutron sources // Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia. 1988. Vol. 15. No. 1. Pp. 91–103.
5. Kuklin A. I., Islamov A. Kh., Gordeliy V. I. Two-detector system for small-angle neutron scattering instrument // Neutron News. 2005. Vol. 16. No. 3. Pp. 16–18.
6. Kuklin A. I., Soloviov D. V., Rogachev A. V., et al., New opportunities by modernized small-angle neutron scattering two-detector system instrument (YuMO) // Journal of Physics: Conference Series. 2011. Vol. 291. No. 1. P. 012013.
7. Соловьев А. Г., Соловьева Т. М., Стадник А. В., Исламов А. Х., Куклин А. И. SAS-программа для первичной обработки спектров малоуглового рассеяния. Версия 2.4. Описание и руководство пользователя // Сообщения Объединенного института ядерных исследований. Дубна. 2003. 086 (P10-2003-86) (2.337.706).
8. Soloviev A. G., Solovieva T. M., Ivankov O. I., Soloviov D. V., Rogachev A. V., Kuklin A. I. SAS program for two-detector system: seamless curve from both detectors // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 848. P. 012020.
9. Ramsay J. D. F. Surface and pore structure characterization by neutron scattering techniques // Advances in Colloid and Interface Science. 1998. Vol. 76–77. 1 July. Pp. 13–37.
10. Teixeira J. Small-angle scattering by fractal systems // Journal of Applied Crystallography. 1988. Vol. 21. Part 6. December. Pp. 781–785.
11. Bale H. D., Schmidt P. W. Small-angle X-ray-scattering investigation of submicroscopic porosity with fractal properties // Physical Review Letters. 1984. Vol. 53. No. 6. Pp. 596–599.
12. Neutron diffraction commission. Coherent neutron scattering amplitudes // Acta Crystallographica. Section A. 1969. Vol. 25. Part 2. 1 March. Pp. 391–392.



13. Höhr A., Neumann H.-B., Schmidt P. W., Pfeifer P., Avnir D. Fractal surface and cluster structure of controlled-pore glasses and Vycor porous glass as revealed by small-angle X-ray and neutron scattering // Physical Review B. 1988. Vol. 38. No. 2. Pp. 1462–1467.

14. Levitz P., Ehret G., Sinha S. K., Drake G. M. Porous Vycor glass: The microstructure as probed by electron microscopy, direct energy transfer, small-angle scattering, and molecular adsorption // The Journal of Chemical Physics. 1991. Vol. 95. No. 8. Pp. 6151–6161.

REFERENCES

1. Mazurin O. V., Roskova G. P., Averyanov V. I., Antropova T. V., Dvukhfaznyye stekla. Struktura, svoystva, primeneniye [Two-phase glasses: structure, properties and applications], Ed. by B. G. Varshal, Nauka, Leningrad, 1991 (in Russian).

2. Lowell S., Shields J., Thomas M. A., Thommes M., Characterization of porous solids and powders: surface area, porosity, and density (Particle Technology Series, Vol. 16). Springer Netherlands, Amsterdam, Berlin, 2004.

3. Barrett E. P., Joyner L. G., Halenda P. P., The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms, J. Am. Chem. Soc. 73 (1) (1951) 373–380.

4. Ostanevich Yu. M., Time-of-flight small angle scattering spectrometers on pulsed neutron sources, Makromol. Chem. Macromol. Symp. 15 (1) (1988) 91–103.

5. Kuklin A. I., Islamov A. Kh., Gordeliy V. I., Two-detector system for small-angle neutron scattering instrument, Neutron News. 16 (3) (2005) 16–18.

6. Kuklin A. I., Soloviov D. V., Rogachev A. V., et al., New opportunities by modernized small-angle neutron scattering two-detector system instrument (YuMO), J. Phys. Conf. Ser. 291 (1) (2011) 012013.

7. Soloviev A. G., Solovieva T. M., Stadnik A. V., et al., SAS, The package for small-angle neutron scattering data treatment, Version 2.4, Long Write-Up and User's Guide, JINR Communication, Dubna, 2003, 086 (P10-2003-86) (2.337.706).

8. Soloviev A. G., Solovieva T. M., Ivankov O. I., et al., SAS program for two-detector system: seamless curve from both detectors, J. Phys. Conf. Ser. 848 (2017) 012020.

9. Ramsay J. D. F. Surface and pore structure characterization by neutron scattering techniques, Adv. Colloid Interface Sci. 76–77 (1 July) (1998) 13–37.

10. Teixeira J., Small-angle scattering by fractal systems, J. Appl. Crystallogr. 21 (6) (1988) 781–785.

11. Bale H. D., Schmidt P. W., Small-angle X-ray-scattering investigation of submicroscopic porosity with fractal properties, Phys. Rev. Lett. 53 (6) (1984) 596–599.

12. Neutron diffraction commission, Coherent neutron scattering amplitudes, Acta Crystallogr. Section A. 25 (2) 391–392.

13. Höhr A., Neumann H.-B., Schmidt P. W., et al., Fractal surface and cluster structure of controlled-pore glasses and Vycor porous glass as revealed by small-angle X-ray and neutron scattering, Phys. Rev. B. 38 (2) (1988) 1462–1467.

14. Levitz P., Ehret G., Sinha S. K., Drake G. M., Porous Vycor glass: The microstructure as probed by electron microscopy, direct energy transfer, small-angle scattering, and molecular adsorption, J. Chem. Phys. 95 (8) (1991) 6151–6161.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

УДОВЕНКО Станислав Александрович – младший научный сотрудник Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

udovenko_sa@spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-0364-0797

НАБЕРЕЖНОВ Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
alex.nabereznov@mail.ioffe.ru
ORCID: 0000-0003-1929-032X

БОРИСОВ Сергей Аркадиевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
sergey.borisov@mail.ioffe.ru
ORCID: 0000-0002-7486-0391

СЫСОЕВА Анна Августовна – научный сотрудник Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
annasysoeva07@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8876-9185

ТОМКОВИЧ Мария Вацлавовна – научный сотрудник Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
marya.tom83@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1537-4107

ИСЛАМОВ Ахмед Хусаинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области, Россия.

141980, Россия, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио Кюри, 6
islamov@nf.jinr.ru
ORCID: 0000-0003-3837-0093

КУКЛИН Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области, Россия.

141980, Россия, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио Кюри, 6
alexander.iv.kuklin@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4530-2980

THE AUTHORS

UDOVENKO Stanislav A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
udovenko_sa@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-0364-0797

NABEREZHNOV Aleksandr A.

Ioffe Institute of RAS
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia
alex.nabereznov@mail.ioffe.ru
ORCID: 0000-0003-1929-032X

BORISOV Sergey A.*Ioffe Institute of RAS*

26 Politekhnikeskaya, St Petersburg 194021, Russia

sergey.borisov@mail.ioffe.ru

ORCID: 0000-0002-7486-0391

SYSOEVA Anna A.*Ioffe Institute of RAS*

26 Polytekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia

annasysoeva07@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8876-9185

TOMKOVICH Maria V.*Ioffe Institute of RAS*

26 Polytekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia

marya.tom83@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1537-4107

ISLAMOV Akhmed Kh.*Joint Institute for Nuclear Research*

6, Joliot Curie St., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia

islamov@nf.jinr.ru

ORCID: 0000-0003-3837-0093

KUKLIN Alexander I.*Joint Institute for Nuclear Research*

6, Joliot Curie St., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia

alexander.iv.kuklin@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4530-2980

*Статья поступила в редакцию 08.10.2021. Одобрена после рецензирования 08.10.2021.
Принята 18.10.2021.*

Received 08.10.2021. Approved after reviewing 08.10.2021. Accepted 18.10.2021.