

СПЕКТРОСКОПИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 539.534, 539.194

ИК-спектры поглощения CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 в нанопорах $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогеля

Т.М. Петрова¹, Ю.Н. Пономарев¹, А.А. Солодов¹, А.М. Солодов¹,
Е.А. Глазкова^{2,3}, О.В. Бакина^{2,3}, М.И. Лернер^{2,3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/1

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 29.02.2016 г.

Впервые проведены исследования трансформации спектров поглощения молекул C_2H_4 , CO_2 и C_2H_6 , находящихся в нанопорах $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогеля, по сравнению со спектрами этих молекул в свободном газе. Показано, что в нанопорах $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогеля интегральные интенсивности C_2H_4 в диапазоне 5700–6250 cm^{-1} , CO_2 в диапазоне 4760–5160 cm^{-1} , C_2H_6 в диапазоне 2830–3030 cm^{-1} выше в 13,3, 15 и 18 раз соответственно.

Ключевые слова: аэрогель, нанопоры, спектры поглощения, C_2H_4 , CO_2 , C_2H_6 ; aerogel, nanopores, absorption spectra, C_2H_4 , CO_2 , C_2H_6 .

Введение

Исследование спектров поглощения молекулярных газов в нанопористых структурах является актуальной темой, которой посвящено множество работ (см. [1–4] и ссылки в них). Ограниченность пространства и эффективный контакт со стенками пор обуславливают существенные особенности состояния газа-наполнителя по сравнению со случаем его нахождения в свободном объеме, что отображается в спектрах поглощения. Во внутреннем объеме нанопор могут присутствовать как свободные молекулы детектируемого газа [1, 2], так и слои этих же молекул, адсорбированных на стенках нанопор [3, 4]. Спектры поглощения молекул в наноструктурных материалах сильно зависят от его химического состава, структуры поверхности, размера и формы пор.

В настоящее время важной проблемой является разработка новых способов анализа состава газовых сред, обладающих высокой чувствительностью и точностью. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является создание высокочувствительных сенсоров на основе нанопористых материалов, которые могут найти применение в био-

логической [5], химической [6] и электронной промышленности [7], медицине [8], а также в приборах для высокоточного экспресс-анализа пищевых продуктов [9], детектирования отравляющих [10], взрывчатых [11] и наркотических веществ [12].

Благодаря развитой регулируемой поверхности наноструктурные материалы широко используются для создания сверхчувствительных газовых сенсоров различного механизма действия [13]. Например, высокая чувствительность широкозонных полупроводников на основе нанопористых структур SnO_2 [14], ZnO [15], TiO_2 [16], WO_3 [17] основана на обратимых эффектах, возникающих в результате хемосорбции молекул, образования областей пространственного заряда и изменения концентрации носителей заряда в приповерхностном слое. Однако существенными недостатками полупроводниковых сенсоров являются низкая селективность вклада определенного типа молекул в газовой фазе в суммарный электрический сигнал [18] и высокое энергопотребление [19].

Перспективным подходом к получению информации о свойствах анализируемых веществ является анализ их спектров поглощения, что позволяет существенно увеличить селективность и чувствительность метода. Поглощение молекулами ИК-излучения может значительно увеличиться при их адсорбции на металлических наночастицах (surface enhanced infrared absorption [20, 21]). Этот эффект основан на увеличении изменения дипольного момента адсорбированных молекул электрическим полем поверхности при колебательном возбуждении. Ограничения этого метода определяются большим собственным поглощением металлических наночастиц,

* Татьяна Михайловна Петрова (tanja@iao.ru); Юрий Николаевич Пономарев (yurpon@iao.ru); Александр Александрович Солодов (asolodov@iao.ru); Александр Михайлович Солодов (solodov@iao.ru); Елена Алексеевна Глазкова (eagl@ispms.tsc.ru); Ольга Владимировна Бакина (ovbakina@ispms.tsc.ru); Марат Израильевич Лернер (lerner@ispms.tsc.ru).

не позволяющих ИК-излучению проникать в глубь материала, поэтому разработка объемных газовых сенсоров на их основе неперспективна.

Недавно нами были проведены исследования трансформации спектров ряда молекулярных газов в нанопорах SiO_2 -аэрогелей [1–3]. Обнаружено увеличение поглощения ИК-излучения по сравнению со свободными газами. Очень высокое пропускание SiO_2 -аэрогелей позволило использовать в измерениях образцы длиной до 58 мм. Кроме того, большой интерес среди нанопористых структур представляют материалы с заряженной поверхностью, содержащей протонные и апротонные активные центры. При этом в твердой фазе возникают значительные электрические силы, приводящие к возникновению градиентов потенциала собственного внутреннего электрического поля. Соответственно в нанопористых оксидах металлов может наблюдаться прямое катион-анионное взаимодействие полярных молекул газа с поверхностью поры. Умеренное содержание оксида алюминия позволит создать нанопористый материал, объединяющий в себе относительно высокую прозрачность с сильным электрическим полем у поверхности нанопор.

В настоящей статье описаны методика получения нанопористых структур на основе $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и результаты исследований трансформации спектров поглощения CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 в нанопорах таких структур по сравнению со свободным газом. Обсуждаются возможности применения данного материала для объемных газовых сенсоров оптического диапазона.

Синтез образца и определение его параметров

Образцы аэрогеля $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ получали золь-гель-методом, включающим стадии получения золь, гелеобразования, формирования каркаса и докритическую сушку образцов [22]. В качестве прекурсора для получения золя Al_2O_3 использовали нанопорошок алюминия, полученный электрическим взрывом алюминиевой проволоки в атмосфере аргона. Порошок алюминия был предоставлен компанией «Передовые порошковые технологии» (г. Томск, Россия). Для этого нанопорошок алюминия окисляли водой при температуре 60°C и атмосферном давлении при постоянном перемешивании в течение 20 мин. Полученный осадок отфильтровывали, промывали дистиллированной водой и пептизировали при $\text{pH} = 3,5$. Золь оксида кремния получали гидролизом тетраэтоксисилана в изопропиловом спирте при $\text{pH} = 1,5$. Полученные золи перемешивали в соотношении 85% SiO_2 и 15% Al_2O_3 и проводили гелеобразование в щелочной среде. Затем воду замещали на изопропиловый спирт, высушивали алкоголь в плотно закрытых контейнерах при 70°C для медленного удаления растворителя из пор в течение 72 ч, а затем прокаливали образец при 500°C в течение 2 ч.

Объекты исследования были охарактеризованы методами дифракции рентгеновских лучей на Cu—

α -излучении (Shimadzu XRD 7000, Shimadzu Corporation, Япония), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (JEM-2100, JEOL, Япония), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Zeiss Ultra-Plus FEG-SEM, Carl Zeiss Group, Германия), низкотемпературной адсорбции азота (Сорбтометр М, Катакон, Россия).

Каркас аэрогеля образован иерархически организованными первичными частицами оксида кремния размером 10–20 нм, между которыми расположены нанолисты бемита планарным размером 200–300 нм и толщиной 2–10 нм (рис. 1). Первичные частицы образуют сферические агломераты размером 100–500 нм, как показано на рис. 2.

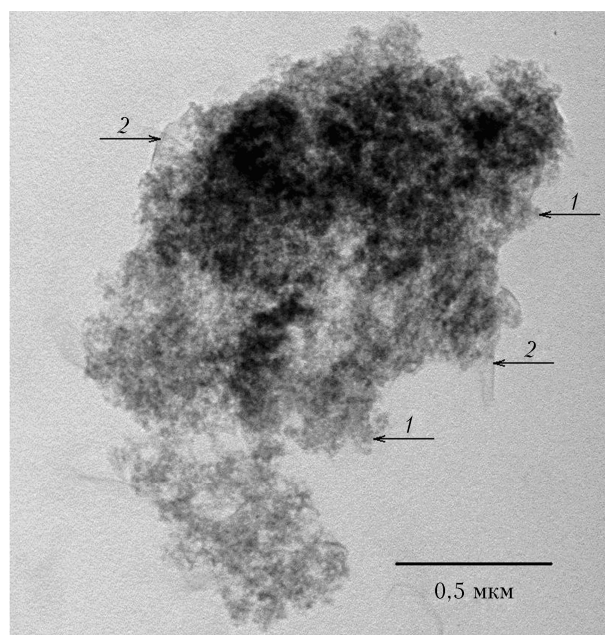


Рис. 1. ПЭМ-изображение первичных частиц оксида кремния (1) и нанолистов оксида алюминия (2) в каркасе аэрогеля $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

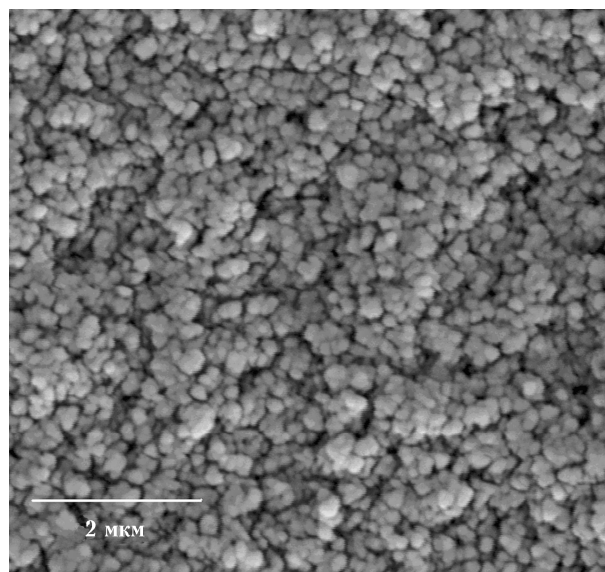


Рис. 2. СЭМ-изображение аэрогеля $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Дифрактограмма аэрогеля, приведенная на рис. 3, характерна для образца с аморфной структурой и демонстрирует уширенный пик, имеющий угловое положение при $2\theta = 22^\circ$ (θ – угол рассеяния рентгеновских лучей), соответствующий SiO_2 . Отсутствие пиков Al_2O_3 можно отнести к малым размерам первичных частиц, равномерно распределенных среди частиц кремнезема, и их аморфной структуре.

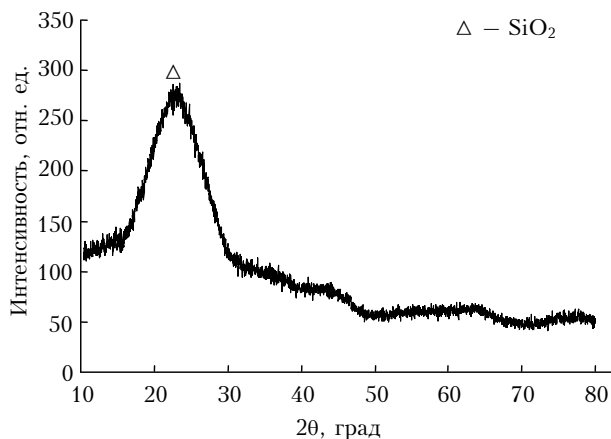


Рис. 3. Дифрактограмма аэрогеля $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Удельная поверхность аэрогеля, рассчитанная методом Брунауэра–Эммета–Теллера [23], составила $640 \text{ м}^2/\text{г}$. Пористая структура аэрогеля $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ представлена мезопорами, что подтверждается типичными кривыми изотерм адсорбции-десорбции азота, относящимися к изотермам IV типа, имеющими петлю гистерезиса в области капиллярной конденсации (рис. 4).

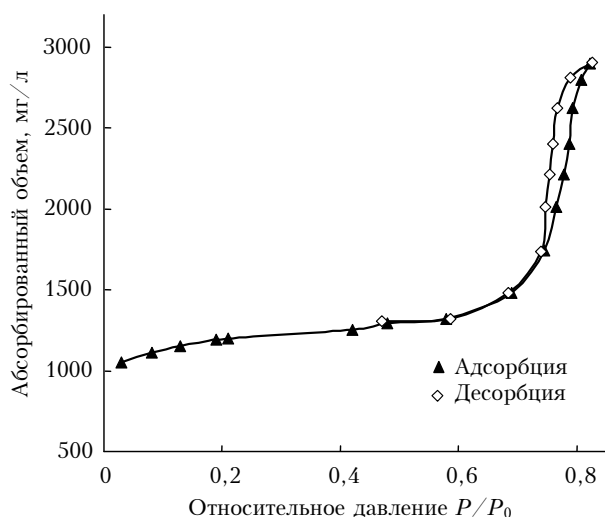


Рис. 4. Изотерма адсорбции-десорбции азота

Максимум распределения пор по размерам, рассчитанного по методу Баррета–Джойнера–Халенды [23], соответствует мезопорам диаметром 5 и 9 нм (рис. 5).

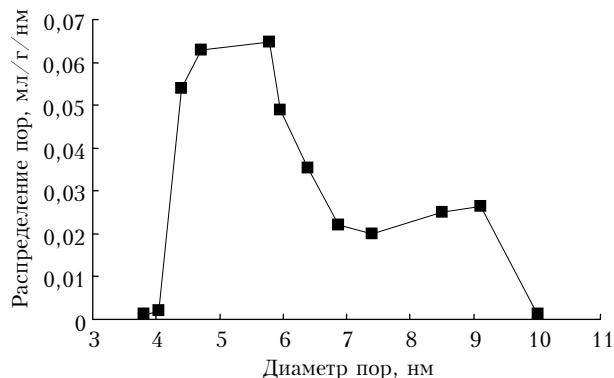


Рис. 5. Распределение пор по размерам в аэрогеле $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

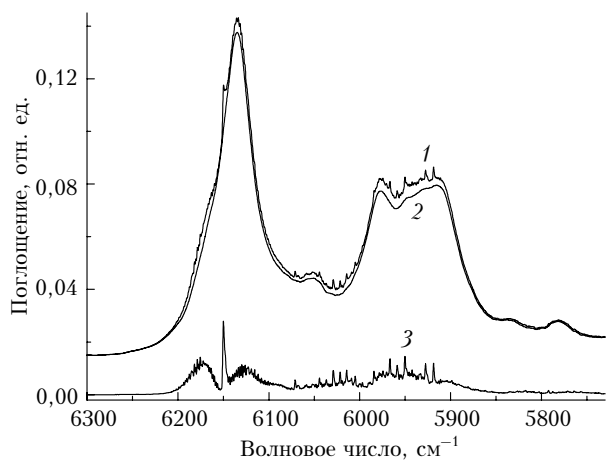
Измерения спектров поглощения

Измерения спектров поглощения C_2H_4 , CO_2 , C_2H_6 , находящихся в нанопорах $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогеля, проводились на Фурье-спектрометре Bruker IFS 125 HR в диапазоне $2000\text{--}9000 \text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре со спектральным разрешением 1 см^{-1} и применением сильной аподизирующей функции Norton–Beer [24]. Спектрометр был укомплектован галогеновой лампой мощностью 50 Вт в качестве источника излучения, CaF_2 -светоделителем и InSb-приемником излучения, охлаждаемым жидким азотом. Установленная в измерительном канале спектрометра кювета с образцом аэрогеля откачивалась в течение 4 ч форвакуумным насосом перед измерением спектра каждого из газов. Спектры пропускания кюветы с откачанным образцом регистрировались перед каждым измерением для использования в качестве базовых линий. Длина кюветы была больше длины образца аэрогеля – 9 и 6 мм соответственно, поэтому необходимо было учесть вклад газа, находящегося в промежутках между ее окнами и образцом. Для этого во втором канале спектрометра была установлена дополнительная кювета длиной 20 см. Обе кюветы были соединены между собой, что обеспечило возможность проводить регистрацию спектров газов при одинаковом давлении, а также повышало его стабильность за счет увеличения объема вакуумной системы. Давление определялось с помощью датчика Vacuubrand DVR-5 и после установления адсорбционного равновесия для C_2H_4 , CO_2 , C_2H_6 составляло 209, 673 и 20 мбар соответственно. Измерения проводились через 1 ч после напуска газа. Для повышения отношения сигнал-шум было выполнено 500 сканирований при регистрации спектра каждого из газов.

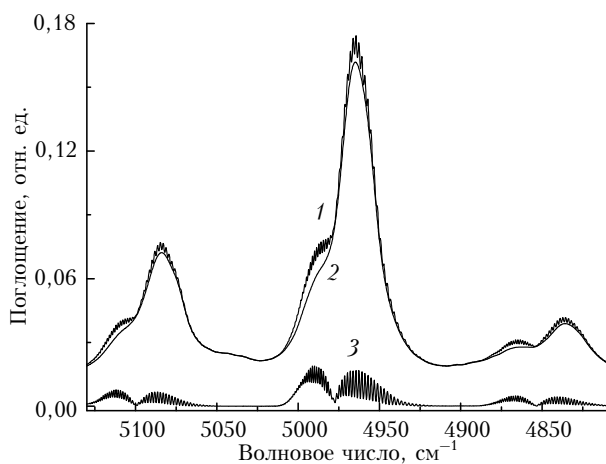
Результаты и обсуждение

Для корректности сравнения интегральных интенсивностей зарегистрированные спектры необходимо привести к одной длине оптического пути. Так как оптический путь в нанопористых материалах точно не известен, длины самих образцов аэро-

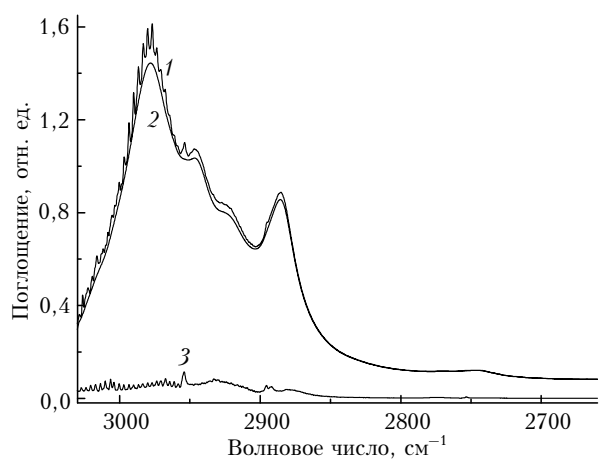
геля были приведены к одному значению, и на эту же длину нормированы спектры газов в свободном состоянии (рис. 6).



a



б



в

Рис. 6. Спектры поглощения молекул C_2H_4 (*a*), CO_2 (*б*), C_2H_6 (*в*): 1 — суммарный спектр в нанопорах SiO_2/Al_2O_3 -аэрогеля; 2 — после удаления газовой фазы; 3 — в свободном газе

Видно, что в нанопорах аэрогеля интенсивности зарегистрированных спектров значительно выше. Их сравнение приведено в таблице для конкретных спектральных интервалов. По сравнению со свободными газами в нанопорах SiO_2/Al_2O_3 -аэрогеля интегральные интенсивности C_2H_4 в диапазоне $5700-6250\text{ см}^{-1}$, CO_2 в диапазоне $4760-5160\text{ см}^{-1}$, C_2H_6 в диапазоне $2830-3030\text{ см}^{-1}$ выше в 13,3, 15 и 18 раз соответственно.

Сравнение интегральных интенсивностей газов, находящихся в свободном состоянии и в нанопорах

Молекула (спектральный диапазон, $см^{-1}$)	Интенсивность, отн. ед.		
	Газ в аэрогеле	Свободный газ	Отношение интегральных интенсивно- стей
C_2H_4 (5700–6250)	28	2,1	13,3
CO_2 (4760–5160)	15	1,0	15
C_2H_6 (2830–3030)	155	8,6	18

Спектры газов в нанопорах состоят из широких контуров, которые соответствуют адсорбированным молекулам, и тонких спектральных линий, соответствующих газовой фазе молекул в объеме нанопор. На рис. 6 отдельно показаны спектры после вычитания газовой фазы. По сравнению со спектрами свободных газов в спектрах адсорбированных этилена и этана наблюдаются перераспределение интенсивности полос и сдвиг их центров. В спектре CO_2 каждая из полос поглощения имеет два максимума разной интенсивности, сдвинутые в разные стороны относительно центра полосы поглощения свободного газа на 10 и 17 $см^{-1}$. Это может быть связано с двумя пространственными ориентациями молекул на поверхности, различными потенциалами взаимодействия между первичными и вторичными частицами, образующими аэрогель, и адсорбированными молекулами, а также с влиянием либрационных колебаний.

Также в спектрах всех газов, находящихся в объеме нанопор, наблюдается значительный вклад широкополосного неселективного поглощения. Оно может быть связано с формированием короткоживущих молекулярных комплексов на поверхности нанопор, с поглощением, индуцированным столкновением молекул с поверхностью [25], и влиянием адсорбированных молекул на оптические характеристики нанопористого материала.

Рассмотрим изменение поглощения после заполнения пор аэрогеля углекислым газом (рис. 7). В диапазоне $5200-5350\text{ см}^{-1}$ наблюдается синусоидальное изменение поглощения, что связано со сдвигом полосы поглощения остаточной адсорбированной воды [4]. Симметричность минимума и максимума поглощения в данном диапазоне свидетельствует о том, что до и после напуска CO_2 содержание в нанопорах адсорбированной воды изменилось незначительно. Отметим, что в спектре адсорбированной воды также присутствует неселективная составляющая [3], а значит содержание воды необходимо учитывать. Более сложная последовательность

чередования минимумов и максимумов поглощения в диапазоне $4400\text{--}4700\text{ см}^{-1}$ может быть обусловлена тем, что адсорбция углекислого газа на поверхности приводит не только к сдвигу, но и изменению формы полосы поглощения аэрогеля. Из рис. 7 видно, что неселективное поглощение регистрируется далеко за пределами полос поглощения CO_2 . Аналогичные особенности присутствуют в спектрах C_2H_4 и C_2H_6 .

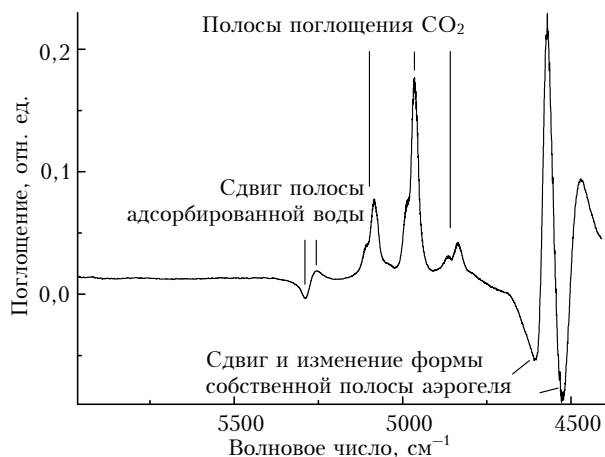


Рис. 7. Изменение спектра поглощения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогеля после заполнения его пор углекислым газом

Также мы провели сравнение спектров поглощения этилена, адсорбированного на поверхности нанопор $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - (данная статья) и SiO_2 -аэрогелей [3]. Эти спектры наиболее сильно зависят от структуры и свойств поверхности и вносят основной вклад в общие спектры поглощения. Несмотря на близкие площади удельной поверхности обоих нанопористых материалов (около $700\text{ м}^2/\text{г}$), интегральная интенсивность полосы поглощения адсорбированного этилена в $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в 2,7 раза выше. Для удобства сопоставления формы спектров между собой мы нормировали их на максимальное значение поглощения, как показано на рис. 8.

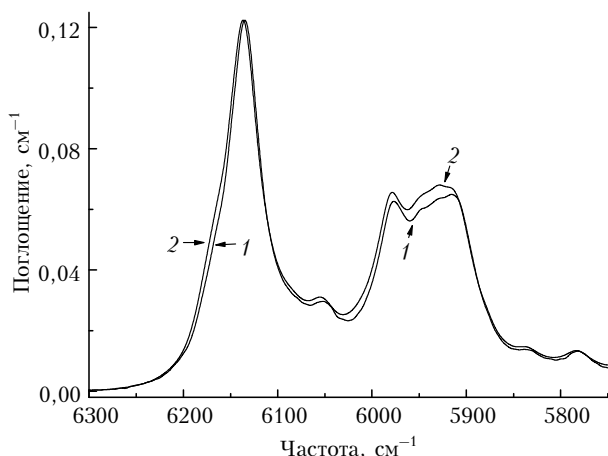


Рис. 8. Сравнение спектров поглощения этилена, адсорбированного на поверхности нанопор $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - (1) и SiO_2 -аэрогелей (2). Для удобства сопоставления спектры нормированы на максимальное значение поглощения

Видно, что полосы поглощения этилена, адсорбированного на поверхности $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогеля, смещены в низкочастотную область спектра приблизительно на 2 см^{-1} , также наблюдается небольшое перераспределение интенсивностей между полосами. Больше по величине смещение полос поглощения относительно газовой фазы может быть связано с более сильным влиянием электрического поля поверхности $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогеля на адсорбированную молекулу, которое также проявляется в увеличении интегральной интенсивности.

Заключение

Впервые зарегистрированы спектры поглощения этилена, углекислого газа и этана, находящихся в нанопорах $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогеля. Исследована трансформация спектров данных газов при переходе от свободного газа к газу в нанобъеме. В нанопорах $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогеля интегральные интенсивности спектров поглощения C_2H_4 в диапазоне $5700\text{--}6250\text{ см}^{-1}$, CO_2 в диапазоне $4760\text{--}5160\text{ см}^{-1}$ и C_2H_6 в диапазоне $4760\text{--}5160\text{ см}^{-1}$ выше в 13,3, 15 и 18 раз соответственно по сравнению с интенсивностью тех же спектров для свободного газа. Добавление 15% Al_2O_3 в матрицу аэрогеля привело к увеличению интегральной интенсивности спектра поглощения молекул этилена, адсорбированных на поверхности, в 2,7 раза. При этом пропускание нанопористого материала в ближнем и среднем ИК-диапазонах осталось достаточным для уверенной регистрации спектров селективного и неселективного поглощения молекул, заполняющих нанопоры образцов. Таким образом, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -аэрогели являются перспективными материалами для создания оптических газовых сенсоров для регистрации газовых маркеров в медицине, экологии, технологиях контроля безопасности.

Авторы выражают благодарность чл.-кор. РАН С.Г. Псахье за внимание к работе и полезные обсуждения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (соглашение № 14.578.21.0042, идентификатор проекта RFMEFI57814X0042).

1. Solodov A.A., Petrova T.M., Ponomarev Yu.N., Solodov A.M. Influence of nanoconfinement on the rotational dependence of line half-widths for 2–0 band of carbon oxide // Chem. Phys. Lett. 2015. V. 637. P. 18–21.
2. Ponomarev Yu.N., Petrova T.M., Solodov A.M., Solodov A.A. IR spectroscopy of water vapor confined in nanoporous silica aerogel // Opt. Express. 2010. V. 18, N 25. P. 26062–26067.
3. Пономарев Ю.Н., Петрова Т.М., Солодов А.М., Солодов А.А., Данилюк А.Ф. Экспериментальное исследование взаимодействия этилена с нанопорами аэрогелей различной плотности методом ИК-спектроскопии // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 270–273.
4. Huber T.E., Huber C.A. Infrared Absorption of H_2 Adsorbed on Porous Glass, Silica Gel, and MgO // Appl. Phys. A. 1990. V. 51, iss. 2. P. 137–140.

5. Reta N., Michelmore A., Saint C., Voelcer N.H. Porous silicon membrane-modified electrodes for label-free voltammetric detection of MS2 bacteriophage // *Biosens. Bioelectronics*. 2016. V. 80, iss. 15. P. 47–53.
6. Laborda F., Bolea E., Cepriá G., Jiménez M.S., Pérez-Arantegui J., Castillo J.R. Detection, characterization and quantification of inorganic engineered nanomaterials: A review of techniques and methodological approaches for the analysis of complex samples // *Anal. Chim. Acta*. 2016. V. 904. P. 10–32.
7. Zhuang X., Mai Y., Wu D., Zhang F., Feng X. Two dimensional soft nanomaterials: A fascinating world of materials // *Adv. Mater.* 2015. V. 27, iss. 3. P. 403–427.
8. Azzouzi S., Patra H.K., Ali M.B., Abbas M.N., Dridi C., Errachid A., Turner A.P.F. Citrate-selective electrochemical μ -sensor for early stage detection of prostate cancer // *Sens. Actuators, B*. 2016. V. 228, N 2. P. 335–346.
9. Banerjee S., Kelly C., Kerry J.P., Papkovsky D.B. High throughput non-destructive assessment of quality and safety of packaged food products using phosphorescent oxygen sensors // *Trends Food Sci. Technology*. 2016. V. 50. P. 85–102.
10. Chatterjee S.G., Chatterjee S., Ray A.K., Chakraborty A.K. Graphene–metal oxide nanohybrids for toxic gas sensor: A review // *Sens. Actuators, B*. 2015. V. 221. P. 1170–1181.
11. Hu J., Gao F., Zhao Z., Sang S., Li P., Zhang W., Zhou X., Chen Y. Synthesis and characterization of cobalt-doped ZnO microstructures for methane gas sensing // *Appl. Surf. Sci.* 2016. V. 363. P. 181–188.
12. Turner N.W., Cauchi M., Piletska E.V., Preston C., Piletsky S.A. Rapid qualitative and quantitative analysis of opiates in extract of poppy head via FTIR and chemometrics: Towards in-field sensors // *Biosens. Bioelectronics*. 2009. V. 24, iss. 11. P. 3322–3328.
13. Tricoli A., Righettoni M., Teleki A. Semiconductor gas sensors: Dry synthesis and application // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2010. V. 49, iss. 42. P. 7632–7659.
14. Jeun J.H., Hong S.H. CuO-loaded nanoporous SnO₂ films fabricated by anodic oxidation and RIE process and their gas sensing properties // *Sens. Actuators, B*. 2010. V. 151, iss. 1. P. 1–7.
15. Bai S., Sun C., Guo T., Luo R., Lin Y., Chen A., Sun L., Zhang J. Low temperature electrochemical deposition of nanoporous ZnO thin films as novel NO₂ sensors // *Electrochimica Acta*. 2013. V. 90. P. 530–534.
16. Sadek A.Z., Partridge J.G., McCulloch D.G., Li Y.X., Yu X.F., Wlodarski W., Kalantar-zadeh K. Nanoporous TiO₂ thin film based conductometric H₂ sensor // *Thin Solid Films*. 2009. V. 518, iss. 4. P. 1294–1298.
17. Wang C., Li X., Feng C., Sun Y., Lu G. Nanosheets assembled hierarchical flower-like WO₃ nanostructures: Synthesis characterization, and their gas sensing properties // *Sens. Actuators, B*. 2015. V. 210. P. 75–81.
18. Шапошник А.В., Звягин А.А., Корчагина С.Н. Хемосорбционные процессы при определении аммиака полупроводниковым сенсором с участием микрореактора // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2012. Т. 12, вып. 2. С. 261–266.
19. Chen K.L., Jiang G.J., Chang K.W., Chen J.H., Wu C.H. Gas sensing properties of indium–gallium–zinc-oxide gas sensors in different light intensity // *Anal. Chem. Res.* 2015. V. 4. P. 8–12.
20. Kundu J., Le F., Nordlander P., Halas N.J. Surface enhanced infrared absorption (SEIRA) spectroscopy on nanoshell aggregate substrates // *Chem. Phys. Lett.* 2008. V. 452, iss. 1–3. P. 115–119.
21. So Young Kang, Il Cheol Jeon, Kwan Kim. Infrared Absorption Enhancement at Silver Colloidal Particles // *Appl. Spectrosc.* 1998. V. 52, N 2. P. 278–283.
22. Aravind P.R., Mukundan P., Pillai P.K., Warrior K.G.K. Mesoporous silica–alumina aerogels with high thermal pore stability through hybrid sol–gel route followed by subcritical drying // *Micropor. Mesopor. Mat.* 2006. V. 96, iss. 1–3. P. 14–20.
23. Фенелонов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 414 с.
24. Norton R.H., Beer R. New Apodizing Functions for Fourier Spectrometry // *J. Opt. Soc. Amer.* 1976. V. 66, iss. 3. P. 259–264.
25. Пономарев Ю.Н., Петрова Т.М., Солодов А.М., Солодов А.А. Наблюдение запрещенной полосы поглощения H₂ в нанопорах аэрогеля // *Письма в ЖЭТФ*. 2014. Т. 99, вып. 11. С. 721–723.

T.M. Petrova, Yu.N. Ponomarev, A.A. Solodov, A.M. Solodov, E.A. Glazkova, O.V. Bakina, M.I. Lerner. Infrared absorption spectra of CO₂, C₂H₄, C₂H₆ in nanopores of SiO₂/Al₂O₃ aerogel.

Transformation of C₂H₄, CO₂ and C₂H₆ absorption spectra under condition of nanoconfinement in SiO₂/Al₂O₃ aerogel is presented for the first time. It is shown that integral intensity of confined C₂H₄ within 5700–6250 cm⁻¹, CO₂ within 4760–5160 cm⁻¹ and C₂H₆ within 2830–3030 cm⁻¹ are respectively by 13.3, 15, and 18 times higher than in free gas.