

# К вопросу об исследовании композитов на основе нанопористого углерода методом малоуглового рентгеновского рассеяния

© Э.А. Сморгонская

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 23 декабря 2002 г. Принята к печати 27 декабря 2002 г.)

В рамках простой модели монодисперсной системы флуктуаций электронной плотности проанализированы возможные изменения в интенсивности малоуглового рентгеновского рассеяния, возникающие при заполнении нанопор в нанопористом углероде сторонними примесями. Рассмотрены системы с различными соотношениями между электронной плотностью углеродного каркаса и встроенных в него неуглеродных нанокластеров, соответствующие композитам с кластерами гексагонального или аморфного селена и ромбической или аморфной серы. Рассчитаны парциальные вклады в изменение интенсивности рассеяния от незаполненных нанопор, углеродных и неуглеродных нанокластеров и общее изменение в зависимости от фактора заполнения нанопор  $\beta$  при различных степенях исходной нанопористости углеродного каркаса  $\alpha$ . Показано, что в зависимости от  $\alpha$  и  $\beta$  возможно как усиление, так и ослабление рассеяния. Полученные данные могут быть полезны для контроля эффективности заполнения нанопор при формировании композита.

## 1. Введение

Нанопористый углерод (НПУ) в виде объемного (bulk) материала, обладающего высокой степенью нанопористости (до 40–45% при общей пористости до 70–75%), получается по оригинальной технологии высокотемпературного хлорирования карбидных соединений [1–3]. В результате физико-химических [1] и структурных исследований [4–6], показавших, в частности, высокую однородность нанопор НПУ по размерам, возникла идея его использования для создания нового класса композитов путем заполнения пор сторонними материалами. Можно ожидать, что введение наполнителей (guest) различной природы, наряду с выбором исходного НПУ (host) с теми или иными структурно-физическими параметрами, позволит в широких пределах управлять свойствами получаемых композитов. При создании подобных композитов с помощью технологии „host-guest“ возникает проблема контроля эффективности заполнения нанопор и определения размерных характеристик встроенных примесных нанокластеров. Одним из перспективных подходов к ее решению представляется метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР), который ранее использовался, в частности, для исследования процессов адсорбции, десорбции и массопереноса в пористых углеродных адсорбентах [7,8]. Методом МУРР уже изучалась структура наноразмерных неоднородностей в НПУ, приготавливаемых из разных карбидов [4–6]. Недавно получены также первые данные по МУРР от нанокompозита НПУ–сера [9]. Введение наполнителей, сопоставимых по плотности с углеродным каркасом (в отличие от исследовавшихся в [7,8]), существенно меняет интенсивность МУРР и ее угловое распределение, вследствие чего однозначная интерпретация экспериментальных результатов становится достаточно трудной задачей.

В настоящей работе в рамках простой модели неоднородной монодисперсной системы, состоящей из подсистем нанокластеров и нанопор одинаковых размеров, в рамках приближения Гинье [10] анализируются возможные изменения в рассеивающей способности при МУРР, которые можно ожидать при заполнении нанопор НПУ твердотельными наполнителями различной плотности  $d$  и, следовательно, различной электронной плотности  $\rho_i$ . Численные расчеты выполнены для значений  $\rho_i$ , соответствующих кристаллическим или аморфным селену и сере, которые в качестве наполнителей в НПУ представляют интерес и начали исследоваться экспериментально [9]. Заметим, что имеются в виду только те изменения, которые связаны непосредственно с рассеянием. Изменения (рост) потерь на поглощение излучения в материале здесь не рассматриваются, однако в каждом конкретном случае при обработке экспериментальных данных их необходимо учитывать, как это делается, например, в [9].

## 2. Общие соотношения для изменений интенсивности МУРР при заполнении нанопор

Рассмотрим гипотетическую модель системы пространственных флуктуаций  $\Delta\rho \equiv \rho - \bar{\rho}$  электронной плотности  $\rho$  относительно ее среднего значения  $\bar{\rho}$  по всей системе, и пусть этим флуктуациям можно приписать одинаковый радиус Гинье, или радиус инерции  $R_g$  — параметр, характеризующий пространственный размер флуктуаций в монодисперсной системе. Как известно, в этом случае при малых углах рассеяния  $2\vartheta$  интенсивность МУРР, приходящуюся на единицу рассеивающего объема, (рассеивающую способность)

системы  $i(s)$  удобно описывать в модели Гинье [10]:

$$i(s) \propto |\Delta\rho|^2 N v^2 \exp[-(sR_g)^2/3], \quad (1)$$

где  $sR_g \ll 1$ ,  $s = 4\pi \sin \vartheta/\lambda$  — модуль вектора рассеяния,  $\lambda$  — длина волны рентгеновского излучения,  $v \propto R_g^3$  — объем флуктуации и  $N$  — число флуктуаций в единице объема системы. Будем считать, что флуктуации электронной плотности создаются нанокластерами и нанопорами с одинаковым радиусом инерции  $R_g$  и определенными значениями внутренней электронной плотности  $\rho_C$  (углеродный каркас) и  $\rho_{np}$  (нанопоры). Будем считать также, что заполнение пор не вызывает их „набухания“ (возрастания  $R_g$ ) [4,5]. Тогда связанные с заполнением изменения интенсивности МУРР  $\delta i$  будут определяться только изменением величины флуктуаций  $\Delta\rho$  и их общего объема  $V_{fl} = vN$ , приходящегося на единицу объема системы (предэкспонентой в выражении (1)). Далее изменения  $\delta i$  будут вычисляться в зависимости от фактора заполнения нанопор  $\beta \equiv V_i/V_{np}$ , где  $V_{np}$  и  $V_i$  — исходный общий объем нанопор и объем заполненных нанопор соответственно ( $0 \leq \beta \leq 1$ ). Расчеты зависимостей  $\delta i(\beta)$  проводятся для систем с различной исходной степенью пористости  $\alpha \equiv V_{np}/V$  ( $0 < \alpha \leq 0.5$ ,  $V$  — объем образца).

Изменение интенсивности МУРР, связанное с флуктуациями определенного типа в материале (нанопорами, нанокластерами углеродного каркаса или встроенными примесными нанокластерами), можно записать в виде

$$\delta i \propto |\Delta\rho_2|^2 V_{2fl} - |\Delta\rho_1|^2 V_{1fl}. \quad (2)$$

Здесь и далее индекс 1 относится к исходной нанопористой системе, а индекс 2 — к нанокompозиту. В общем случае среднее значение электронной плотности материала есть

$$\bar{\rho}_{1,2} = (1 - \alpha)\rho_C + \alpha\rho_{np}. \quad (3)$$

В исходной системе при незаполненных порах  $\rho_{np} = 0$  и

$$\bar{\rho}_1 = (1 - \alpha)\rho_C. \quad (3a)$$

Если же некоторая доля объема пор  $\beta$  заполняется примесью, то средняя электронная плотность среды возрастает в зависимости от электронной плотности примесного нанокластера  $\rho_i$ :

$$\bar{\rho}_2 = (1 - \alpha)\rho_C + \alpha\beta\rho_i. \quad (3b)$$

Пусть для определенности рассматриваемые флуктуации являются пустыми нанопорами одинакового объема  $v_{np}$ . Их рассеивающая способность в исходном материале ( $i_{1ep}$ ) и нанокompозите ( $i_{2ep}$ ) определяется флуктуациями электронной плотности

$$\Delta\rho_{1,2} = -\bar{\rho}_{1,2} \quad (4)$$

и объемом флуктуаций в том и другом случае соответственно  $V_{1fl} \propto \alpha$  и  $V_{2fl} \propto \alpha(1 - \beta)$ . Тогда для изменения

в рассеивающей способности материала за счет пустых пор  $\delta i_{ep} \equiv i_{2ep} - i_{1ep}$  путем простых преобразований из (2) можно получить

$$\delta i_{ep} \propto \alpha \left\{ \left[ 1 - \alpha \left( 1 - \beta \frac{\rho_i}{\rho_C} \right) \right]^2 (1 - \beta) - (1 - \alpha)^2 \right\}. \quad (5)$$

Выражение (5) описывает изменение рассеяния на пустых нанопорах, часть которых остаются незаполненными и после введения наполнителя.

Аналогично можно найти вклад в изменение интенсивности МУРР материала, связанное с нанокластерами углеродного каркаса,  $\delta i_C \equiv i_{2C} - i_{1C}$ . Ясно, что в этом случае при заполнении нанопор объем кластеров не меняется и изменение их вклада в рассеяние происходит только из-за возрастания средней электронной плотности среды. Вместо (5) для такого изменения имеем

$$\delta i_C \propto \alpha^2 (1 - \alpha) \left[ \left( 1 - \beta \frac{\rho_i}{\rho_C} \right)^2 - 1 \right]. \quad (6)$$

Для изменения рассеяния  $\delta i_i \equiv i_{2i}$  на примесных нанокластерах, заполняющих нанопоры, легко получить, что

$$\delta i_i \propto \alpha\beta \left[ \left( 1 - \alpha\beta \right) \frac{\rho_i}{\rho_C} - (1 - \alpha) \right]^2. \quad (7)$$

Из (7) видно, что при малых факторах заполнения  $\beta$  рассеяние на примесных кластерах растет с ростом  $\beta$ .

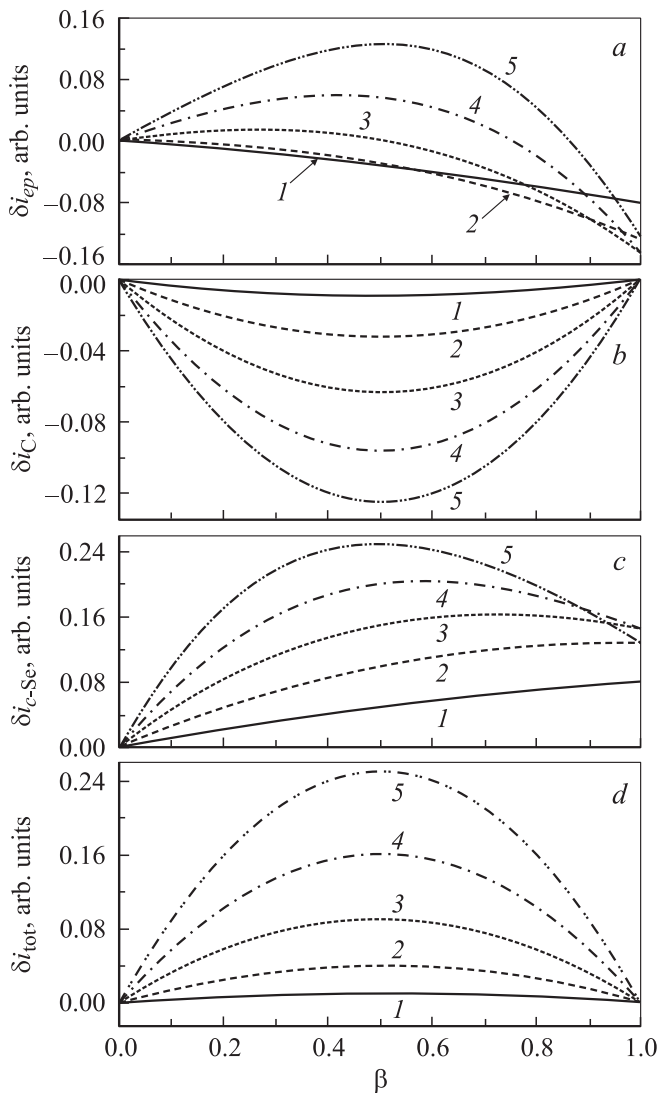
Результирующее изменение рассеяния при заполнении пор в монодисперсной системе  $\delta i_{tot}$  определяется суммой вкладов от нанонеоднородностей всех рассмотренных выше типов:

$$\delta i_{tot} = \delta i_{ep} + \delta i_C + \delta i_i. \quad (8)$$

В последующих разделах общие выражения (5)–(8) используются применительно к нанокompозитам на основе НПУ с конкретными наполнителями — селеном и серой, у которых, как легко показать, электронная плотность в твердом состоянии  $\rho_i$  существенно превышает (гексагональный или аморфный селен) или близка (ромбическая или аморфная сера) к электронной плотности углеродного каркаса  $\rho_C$ .

### 3. Нанокompозит <нанопористый углерод>–<гексагональный селен>

На рис. 1,  $a-d$  показано поведение интенсивности рассеяния на всех типах нанонеоднородностей в модельном нанокompозите, получаемом введением наполнителя с электронной плотностью  $\rho_i = 2\rho_C$ . Приблизительно такое соотношение между  $\rho_i$  и  $\rho_C$  может реализоваться, если в нанопорах НПУ образуется гексагональный селен ( $c$ -Se). Это легко показать, исходя из известных значе-



**Рис. 1.** Изменение рассеивающей способности нанокompозита с встроенными нанокластерами кристаллического селена ( $\rho_i/\rho_C = 2$ ) при МУРР на незаполненных нанопорах (a), нанокластерах углеродного каркаса (b), встроенных примесных нанокластерах (c) и результирующее изменение (d) в зависимости от фактора заполнения нанопор  $\beta$  при разных степенях исходной нанопористости  $\alpha$ .  $\alpha$ : 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.3, 4 — 0.4, 5 — 0.5.

ний плотности  $c$ -Se ( $d_{c-Se} = 4.81 \text{ г/см}^3$ ) и углеродного каркаса ( $d_C = 2.1 \text{ г/см}^3$ ) и используя соотношение

$$\rho = (d/A)n, \quad (9)$$

справедливое для одноатомной среды плотностью  $d$ , где  $A$  — атомный вес и  $n$  — число электронов в атоме. Из рис. 1 видно, что при невысокой исходной нанопористости ( $\alpha \lesssim 0.2$ ) рассеяние от пустых нанопор (рис. 1, a) ослабляется при введении наполнителя ( $\delta i_{ep} < 0$ ), поскольку уменьшается их объем. При более высоких значениях  $\alpha$  ( $\alpha > 0.2$ ) появляется довольно

широкий и расширяющийся с ростом  $\alpha$  интервал факторов заполнения  $\beta$ , в котором рассеяние на нанопорах усиливается:  $\delta i_{ep} > 0$ . Это происходит из-за того, что эффект увеличения контраста между пустыми нанопорами и средой как целого превалирует в рассеянии над влиянием уменьшения содержания пустых пор.

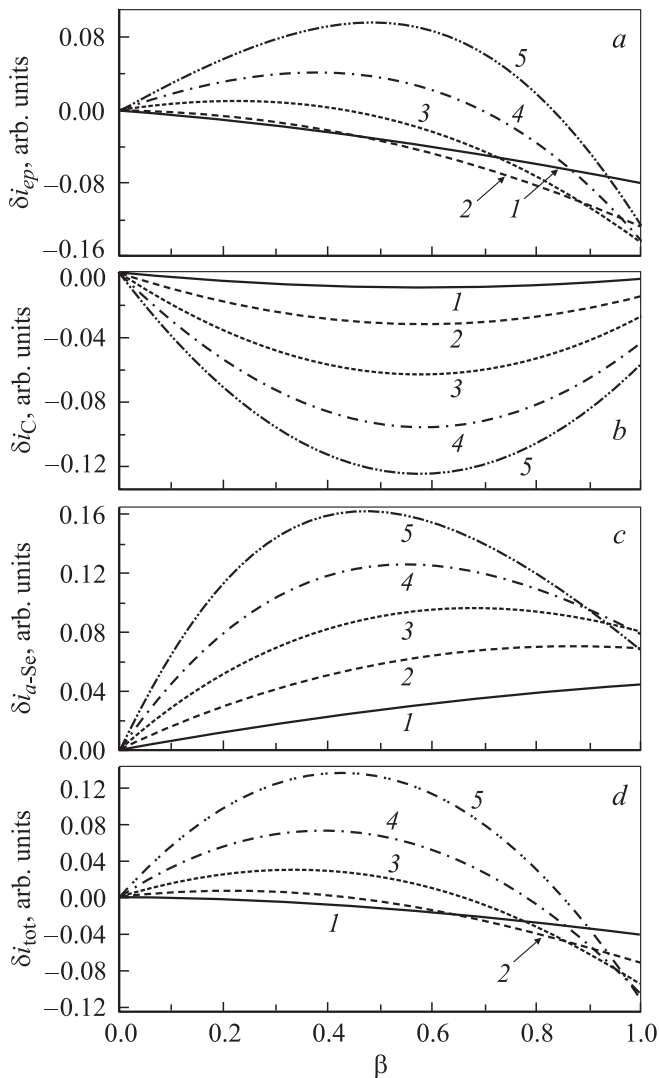
Рассеяние на кластерах каркаса (рис. 1, b) при рассматриваемом соотношении между  $\rho_i$  и  $\rho_C$  всегда уменьшается, что связано с уменьшением контраста между каркасом и средой. Интересно отметить, что при этом максимальное падение интенсивности  $i_C$  имеет место, когда заполнена в точности половина объема нанопор ( $\beta = 0.5$ ), а если все нанопоры заполнены ( $\beta = 1$ ), то, как и следовало ожидать, никакого изменения рассеяния на каркасе не должно наблюдаться, т.е.  $\delta i_C = 0$ . Действительно, в этом случае соответствующие флуктуации электронной плотности только меняют знак, оставаясь по абсолютной величине равными исходным флуктуациям в отсутствие наполнителя.

Рассеяние на встроенных примесных нанокластерах по мере заполнения нанопор сначала, естественно, растет:  $\delta i_{c-Se} \equiv i_{c-Se} > 0$ , так как растет объем этих кластеров (рис. 1, c). Однако при достаточно высокой исходной нанопористости  $\alpha$  ( $\alpha \gtrsim 0.3$ ) и высоких значениях фактора заполнения  $\beta$  величина  $\delta i_i$  начинает уменьшаться с ростом  $\beta$ . Это происходит вследствие снижения контраста между плотными кластерами и средой, плотность которой ощутимо возрастает с увеличением содержания наполнителя.

Как видно из рис. 1, d, результирующая интенсивность МУРР в рассматриваемом модельном нанокompозите оказывается выше, чем в исходном материале при любых значениях фактора заполнения  $0 < \beta < 1$ . При этом эффект усиления рассеяния проявляется тем ярче, чем выше исходная нанопористость  $\alpha$ . При заданном значении  $\alpha$  максимальное увеличение рассеивающей способности достигается при  $\beta = 0.5$ , а при  $\beta = 1$  интенсивности рассеяния от нанокompозита и исходного НПУ совпадают, так что  $\delta i_{tot} = 0$ .

#### 4. Нанокompозит ⟨нанопористый углерод⟩–⟨аморфный селен⟩

Если во встроенных кластерах в нанокompозите селен оказывается в аморфном состоянии, в виде  $a$ -Se с плотностью  $d_{a-Se} = 4.28 \text{ г/см}^3$ , то, как следует из оценки (9), электронная плотность  $\rho_i$  оказывается несколько ниже, чем в гексагональном  $c$ -Se:  $\rho_i = 1.74\rho_C$ . На рис. 2, a–d показаны изменения интенсивности МУРР от всех типов нанонеоднородностей при введении наполнителя с таким соотношением между  $\rho_i$  и  $\rho_C$ . Видно, что все эти изменения в зависимости от фактора заполнения  $\beta$  по характеру близки к рассмотренным в разд. 3. Однако имеются заметные количественные отличия. В частности, интервал значений  $\beta$ , при которых рассеяние на пустых порах усиливается, оказывается более узким



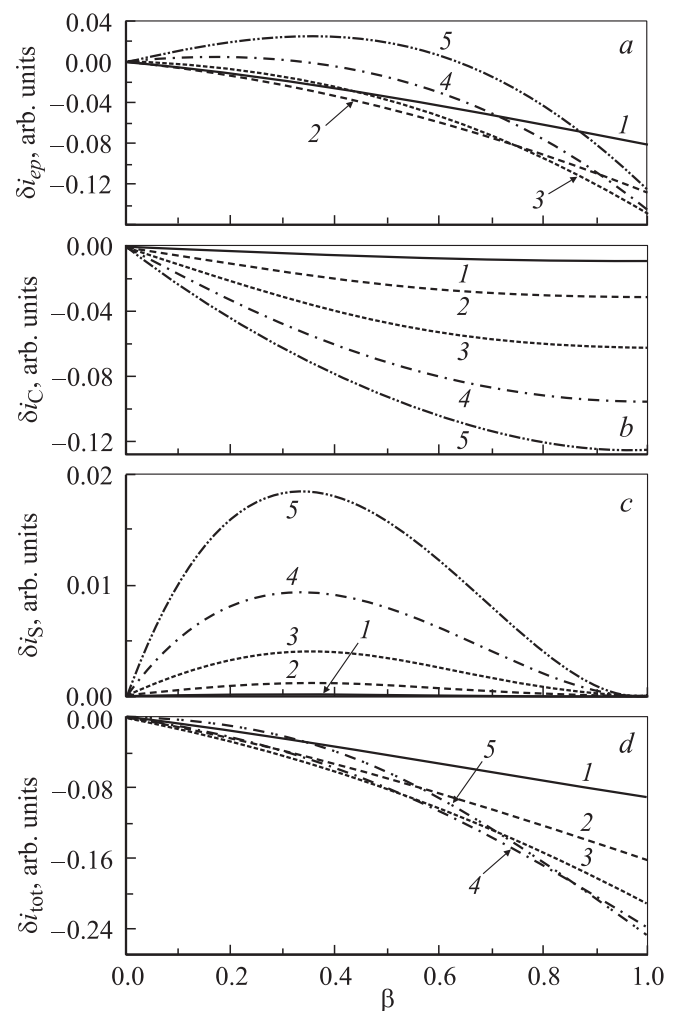
**Рис. 2.** То же, что на рис. 1, в случае нанокompозита с встроенными нанокластерами аморфного селена ( $\rho_i/\rho_C = 1.74$ ).

(рис. 2, *a*), а рассеяние на кластерах каркаса не подавляется даже при  $\beta = 1$  (рис. 2, *b*). Усиление рассеяния от нанокластеров *a*-Se (рис. 2, *c*) выражено слабее в сравнении с *c*-Se (рис. 1, *c*). В результате суммарный эффект заполнения нанопор (рис. 2, *d*) сводится к усилению МУРР в ограниченном интервале не слишком высоких значений фактора заполнения:  $\delta i_{\text{tot}} > 0$  при  $\beta < \beta_0$ . Из рис. 2, *d* видно также, что граничное значение  $\beta = \beta_0$ , которое разделяет области с противоположным знаком  $\delta i_{\text{tot}}$ , т.е. с разным типом поведения МУРР при заполнении нанопор, сдвигается в сторону более высоких значений  $\beta$  с ростом исходной пористости  $\alpha$ . Это означает, что снижения собственно рассеивающей способности при формировании нанокластеров *a*-Se в нанокompозите на основе высокопористого НПУ, когда  $\alpha \gtrsim 0.4$ , можно ожидать только при достаточно высоких факторах заполнения нанопор ( $\beta \gtrsim 0.8$ ). При меньших значениях  $\beta$  МУРР будет усиливаться. Таким образом,

по изменению интенсивности МУРР можно судить об эффективности заполнения нанопор. Однако при этом требуется достаточно точно знать состояние встроенных нанокластеров и соответствующие значения электронных плотностей.

## 5. Нанокompозит <нанопористый углерод>-сера

Особый интерес с точки зрения анализа МУРР представляет нанокompозит, в котором  $\rho_i = \rho_C$ , что, как следует из (9), имеет место, если поры НПУ заполнены аморфной или ромбической серой, плотности которых ( $d_S \approx 2 \text{ г/см}^3$ ) близки к плотности углеродного каркаса. В этом случае разностная кривая МУРР  $\delta i_{\text{tot}}(s)$ , найденная из эксперимента для композита и исходного НПУ, описывает рассеяние на нанокластерах серы и из ее анализа можно получить размерные характеристики этих нанокластеров или, что то же самое, заполненных серой нанопор исходного НПУ [9]. На рис. 3, *a-d*, по аналогии с рис. 1 и 2, показаны вклады

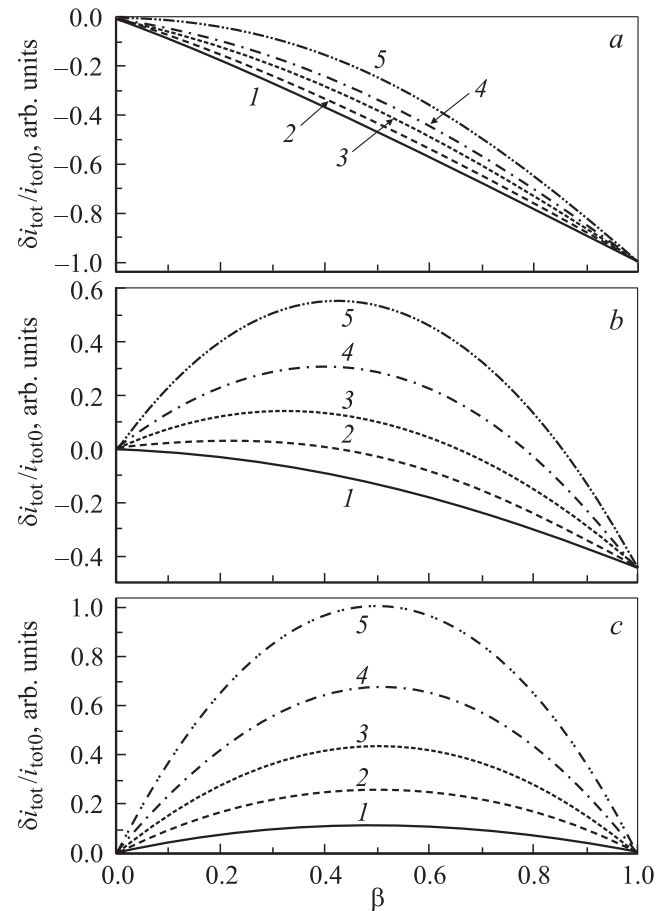


**Рис. 3.** То же, что на рис. 1, в случае нанокompозита с встроенными нанокластерами серы ( $\rho_i/\rho_C = 1$ ).

в изменение интенсивности МУРР при формировании композита, определяемые рассеянием на незаполненных нанопорах  $\delta i_{ep}$  (a), нанокластерах углерода  $\delta i_C$  (b) и нанокластерах серы  $\delta i_S$  (c), а также результирующее общее изменение  $\delta i_{tot}$  (d) в зависимости от фактора заполнения  $\beta$  при разных значениях  $\alpha$ . Видно, что при введении серы, в отличие от селена, рассеяние на пустых нанопорах может возрасти только для НПУ с высокой исходной пористостью  $\alpha$  ( $\alpha \gtrsim 0.4$ ). При этом рассеяние на нанокластерах углерода довольно резко уменьшается с ростом  $\beta$  (рис. 3, b). На нанокластерах серы рассеяние сначала возрастает из-за увеличения общего объема этих кластеров, а затем спадает до нуля при  $\beta = 1$  (рис. 3, c), поскольку до нуля спадает величина соответствующих флуктуаций электронной плотности. В результате в углеродной системе с одинаковыми размерами нанокластеров и нанопор ( $v_{np} = v_i$ ) введение серы приводит к уменьшению общей рассеивающей способности, т.е.  $\delta i_{tot} < 0$  (рис. 3, d). Именно такой эффект наблюдался в эксперименте в широком интервале углов рассеяния [9]. Заметим, что при  $v_{np} > v_i$ , высоких значениях  $\alpha$  и не слишком высоких значениях  $\beta$  возможен и слабый рост  $i_{tot}$  ( $\delta i_{tot} > 0$ ) [9], который по-прежнему определяется ростом средней электронной плотности среды, на фоне чего пустые поры рассеивают сильнее. Действительно, в эксперименте в узкой области углов, соответствующих наиболее мелким нанопорам, интенсивность МУРР в нанокompозите НПУ–сера оказалась несколько выше, чем в исходном НПУ [9]. Это могло быть связано с затрудненностью проникновения серы в наиболее мелкие нанопоры (с радиусом инерции  $R_g \lesssim 0.8$  нм) при использовавшейся технологии введения либо с увеличением концентрации мелких нанопор при частичном заполнении порового пространства отдельных нанопор большего размера.

## 6. Относительные изменения рассеивающей способности

На рис. 4, a–c сопоставляются относительные изменения рассеивающей способности нанокompозитов  $\delta i_{tot}/i_{tot0}$  в зависимости от фактора заполнения  $\beta$  при введении рассмотренных выше наполнителей в НПУ с различной исходной пористостью  $\alpha$ . Здесь  $i_{tot0} \propto \alpha(1-\alpha)$  — рассеивающая способность исходного НПУ. Во всех рассмотренных случаях, т.е. при  $1 \leq \rho_i/\rho_C \leq 2$ , оказывается, что  $-1 \leq \delta i_{tot}/i_{tot0} \leq 1$ . Как уже отмечалось (разд. 5), если  $\rho_i/\rho_C = 1$  (рис. 4, a), то при любых степенях заполнения и исходной пористости должно наблюдаться подавление рассеивающей способности композита в сравнении с исходным НПУ, и при отсутствии нанопор, оставшихся пустыми ( $\beta = 1$ ), строго говоря, МУРР в композите вообще не должно происходить:  $\delta i_{tot} = -i_{tot0}$ . Следует отметить, что в этом случае при заданной степени заполнения  $0 < \beta < 1$  относительное изменение рассеивающей способности по



**Рис. 4.** Относительные изменения рассеивающей способности нанокompозита в сравнении с исходными НПУ различной степени пористости  $\alpha$  в зависимости от фактора заполнения  $\beta$  при  $\rho_i/\rho_C = 1$  (a), 1.74 (b) и 2 (c).  $\alpha$ : 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.3, 4 — 0.4, 5 — 0.5.

модулю  $|\delta i_{tot}/i_{tot0}|$  всегда падает с ростом исходной пористости, чего нельзя сказать об абсолютной величине изменения  $|\delta i_{tot}|$ , которая при достаточно высоких  $\beta$  растет с ростом  $\alpha$  (рис. 3, d). При  $\rho_i/\rho_C = 2$  (рис. 4, c), напротив, рассеивающая способность композита всегда оказывается выше, чем исходного НПУ, (разд. 3) и возрастает с ростом исходной нанопористости при любом  $\beta$ . Максимальное превышение, имеющее место, если заполнена лишь половина нанопор, при  $\alpha = 0.5$  становится двукратным:  $\delta i_{tot} = i_{tot0}$ . В промежуточном случае (разд. 4) при формировании нанокompозита возможен как рост, так и снижение рассеивающей способности, однако все возможные изменения будут меньше рассеивающей способности исходного НПУ (рис. 4, b). Характерно, что при этом для НПУ с любой исходной нанопористостью  $\alpha$  существует такая степень заполнения нанопор  $\beta_0$ , возрастающая с ростом  $\alpha$ , что при  $\beta = \beta_0$   $\delta i_{tot}/i_{tot0} = 0$ . Иными словами, соответствующий композит и исходный НПУ при одинаковом рассеивающем объеме не будут различаться по интенсивности МУРР.

## 7. Заключение

Таким образом, в рамках простой монодисперсной модели нанокompозита можно проследить основные закономерности изменений интенсивности МУРР, вызванных заполнением нанопор исходного нанопористого материала. В полидисперсных системах и, в частности, таких, как НПУ и нанокompозиты на его основе, угловое распределение интенсивности МУРР не описывается одной экспонентой (1) и зависит от распределения нанонеоднородностей по размерам. В свою очередь фактор заполнения нанопор  $\beta$ , как было показано на примере серы, введенной в НПУ [9], может зависеть от размера нанопор. Тогда наблюдаемые изменения формы кривой МУРР при образовании композита будут определяться „дифференциальными“ параметрами  $\alpha$  и  $\beta$ , относящимися к нанопорам разных размеров, а также состоянием наполнителя в нанокластерах и поэтому могут иметь весьма сложный характер. Тем не менее приведенные выше результаты могут быть полезны для интерпретации данных по МУРР на качественном уровне, если грубо считать, например, что та или иная область  $s$  на кривой МУРР определяется в основном вкладом от нанонеоднородностей определенного размера (радиуса инерции). Для количественного же анализа данных МУРР требуется привлечение независимой информации, полученной, например, из экспериментов по адсорбции или из дифракционных измерений.

Автор выражает благодарность INTAS (grant 00-761) и Министерству промышленности и науки РФ (Государственный контракт „Управляемый синтез фуллеренов и других атомных кластеров“) за поддержку работы.

## Список литературы

- [1] С.К. Гордеев, А.В. Вартанова. ЖПХ, **66** (7), 1080 (1994); ЖПХ, **66** (9), 1375 (1994).
- [2] С.К. Гордеев, А.В. Вартанова, С.Г. Жуков, И.Н. Грань, В.В. Соколов, Т.И. Мазаева, Р.Г. Аварбе. Патент Российской Федерации № 2026735. Бюл. № 2 (1995).
- [3] R.G. Avarbz, A.V. Vartanova, S.K. Gordeev, S.G. Zhukov, B.A. Zelenov, A.E. Kravtjik, V.P. Kuznetsov, J.A. Kukushkina, T.V. Mazaeva, O.S. Pankina, V.V. Sokolov. US Patent, No. 5.876.787 (1999).
- [4] Р.Н. Кютт, Э.А. Сморгонская, С.К. Гордеев, А.В. Гречинская, А.М. Данишевский. ФТТ, **41** (5), 891 (1999); ФТТ, **41** (8), 1484 (1999).
- [5] Э.А. Сморгонская, Р.Н. Кютт, А.В. Шукарев, С.К. Гордеев, А.В. Гречинская. ФТП, **35** (6), 690 (2001).
- [6] E. Smorgonskaya, R. Kyutt, A. Danishevskii, C. Jardin, R. Meaudre, O. Marty, S. Gordeev, A. Grechinskaya. J. Non-Cryst. Sol., **299-302** (P2), 810 (2002).
- [7] Г.М. Плавник, Т.П. Пуряева, М.М. Дубинин. Изв. РАН. Сер. хим., № 7, 628 (1993).
- [8] Г.М. Плавник, Т.П. Пуряева. *I Нац. конф. по применению рентген., синхротрон. излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов „РСНЭ97“* (Дубна, 1997). Сб. докл., т. II, с. 149.

- [9] Э.А. Сморгонская, Р.Н. Кютт, В.Б. Шуман, А.М. Данишевский, С.К. Гордеев, А.В. Гречинская. ФТТ, **44** (10), 1908 (2002).
- [10] Д.Н. Сверхгун, Л.А. Фейгин. *Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние* ( М., Наука, 1986).

Редактор Л.В. Шаронова

## On the studies of nanoporous-carbon-based composites by small-angle X-ray scattering

E.A. Smorgonskaya

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia