

ДИФРАКЦИЯ И РАССЕЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

УДК 548.732

РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ МОДУЛИРОВАННЫМИ СТРУКТУРАМИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

© 2012 г. А. А. Ломов, В. И. Пунегов*, В. А. Караванский**, А. Л. Васильев***

Физико-технологический институт РАН, Москва

E-mail: andlomov@mail.ru

**Коми научный центр УрО РАН, Сыктывкар*

***Институт общей физики РАН, Москва*

**** Институт кристаллографии РАН, Москва*

Поступила в редакцию 18.01.2011 г.

Методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии проведены исследования многослойной пористой структуры, сформированной в процессе анодизации подложки Si(111) (Sb) в растворе HF:C₂H₅OH (1:2) при периодическом изменении тока. Установлено, что несмотря на 50%-ную пористость, толщину 30 мкм и значительную величину деформации 4×10^{-3} , сформированная структура пористого кремния состоит в основном из когерентных кристаллитов. В рамках динамической теории дифракции предложена модель описания когерентного рассеяния от многослойной периодической пористой структуры. Показано, что наличие градиентных деформаций 5×10^{-4} и выше приводит к потере фаз при рассеянии от пористых сверхрешеток и подавлению характерных спутников на кривой дифракционного отражения.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается повышенный интерес к применению микро- и наноструктур (нанопроволоки, точки, трубки, синтетические опалы и т.д.) в фотонной оптике. Одним из перспективных материалов для этих целей остается пористый кремний (ПК), состоящий из связанных между собой когерентных кристаллитов. Формируя кристаллиты определенной формы и расположения, можно не только менять локально или периодически диэлектрическую проницаемость, но и добиться создания, например, оптической анизотропии среды, в которой обнаруживается двулучепреломление [1].

В настоящее время наиболее распространенным способом формирования слоев ПК является электрохимическое травление (ЭХТ) в режиме анодизации. В этом процессе структурные параметры слоев (пористость, толщина, деформация, морфология пор, размер кристаллитов и т.д.) легко варьируются. Это дает возможность создавать не только слои с различным типом пор [2], но и многослойные и поверхностно периодические структуры. Технология ЭХТ использовалась в [3] для формирования на подложках Si(001) *p*-типа проводимости сверхрешеток с нанопористыми слоями. Брэгговские структуры для оптического диапазона были сформированы модуляцией плотности тока [4–6]. В [7] показана возможность получения латерального упорядочения пор в слоях Si и в InP [8].

Рентгеновская дифрактометрия высокого разрешения является мощным инструментом для исследования реальной структуры приповерхностных слоев монокристаллов и многослойных гетеросистем, включая такие нанообъекты, как квантовые ямы, проволоки, точки, бублики и т.д. [9]. Необходимо отметить, что для континуальных слоев основные механизмы взаимодействия рентгеновских лучей с однородным веществом достаточно хорошо изучены [10]. Для многослойных структур количественный анализ интенсивности дифракционного отражения вдали от точного угла Брэгга позволяет извлекать с высоким пространственным разрешением обширную информацию о внутреннем строении образца [11]. В случае локально неоднородных по плотности кристаллов задача формирования когерентной рентгеновской волны остается открытой из-за проблемы корректного учета сдвига фаз волн, отраженных участвующими в рассеянии кристаллитами. Кроме этого, эффект “пористости” приводит к ослаблению интерференции и, как следствие, частичной потере структурной информации.

Пористый кремний является модельным объектом со стохастически расположенными и неоднородными по форме кристаллитами, имеющими когерентные кристаллические слои. Экспериментальные исследования [3, 12] доказали, что в ряде случаев параметры тонких однослойных и многослойных периодических структур ПК могут быть определены в широком диапазоне по пори-

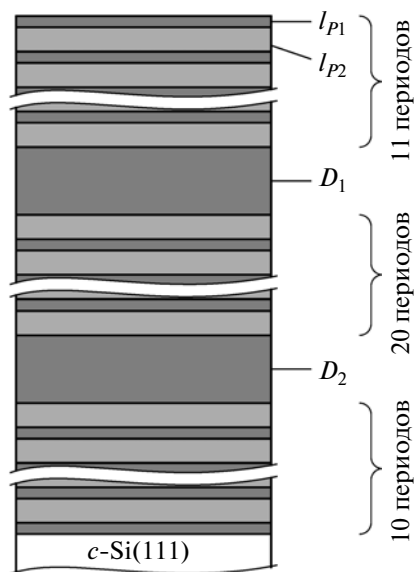


Рис. 1. Схема модулированной структуры ПК с толщами подслоев l_{P1} , l_{P2} и разделяющих слоев $D_1 = D_2$.

стости на основе континуальных моделей. В [13] была сделана успешная попытка моделирования кривых отражения от однородных слоев ПК толщиной в несколько микрон. Однако появление новых 3D локально неоднородных материалов и структур ПК [14] требует развития существующих методик. Дополнительная сложность в анализе рассеяния от слоев ПК связана с их деформацией и чувствительностью к внешней среде.

Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому изучению особенностей дифракционного отражения от многослойной длиннопериодной структуры пористого кремния n -типа проводимости методами двух-, трехосевой рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многослойные периодические структуры ПК формировались методом ЭХТ в режиме анодирования поверхности подложек Si(111) (Sb) n^+ -типа проводимости ($\rho \sim 0.01$ Ом см). Процесс осуществлялся во фторопластовой двухкамерной ячейке с платиновыми электродами в растворе этанола и плавиковой кислоты в соотношении 1:2 при периодическом ступенчатом изменении тока с 5 до 50 мА и времени формирования пары ступенек от 15 до 5с соответственно. Схема сформированной модулированной структуры ПК суммарной толщины L показана на рис. 1. Она состоит из трех сверхрешеток (СР), образованных слоями l_{P1} и l_{P2} с пористостью $P1$ и $P2$ соответственно, СР

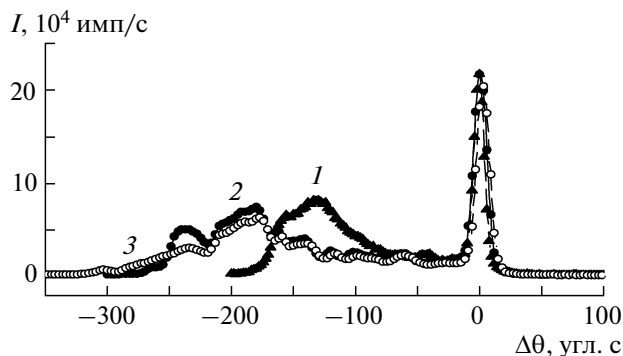


Рис. 2. Экспериментальные КДО от образца ПК после анодирования (1), через девять месяцев до (2) и после (3) выполнения измерения карты ДРИ; 111 отражение, CuK_{α} -излучение.

разделены слоями $D1$ и $D2$, имеющими пористость $P2$.

Исследования реальной структуры образцов выполнялись на дифрактометре ТРС-1 (СКБ ИКРАН) при использовании рентгеновской трубки с медным анодом. Падающее на образец излучение формировалось щелевым монохроматором с трехкратным отражением Si(111) и системой щелей с выходными размерами 0.3 и 2 мм в плоскости рассеяния и перпендикулярно ей соответственно. Двухкристальные кривые дифракционного отражения (КДО) от Si(111) записывались в геометрии $(n, -n)$. Для записи сечений распределения интенсивности (СРИ) вблизи узла обратной решетке 111 c-Si перед детектором устанавливался плоский кристалл анализатор Si(111). По полученному массиву данных строилась карта двумерного распределения интенсивности (ДРИ) в координатах компонент отклонения вектора рассеяния $\mathbf{q}(q_x, q_z)$ от узла обратной решетки, которые связаны с углами поворота $\Delta\omega$, $\Delta\theta$ кристаллов образца и анализатора соотношением:

$$\begin{aligned} q_x &= k_0(2\Delta\omega - \Delta\theta)\sin\theta_B, \\ q_z &= k_0\Delta\theta\cos\theta_B, \end{aligned} \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны рентгеновского излучения, θ_B — угол Брэгга. Запись кривых рефлектометрии проходила в режиме $\theta/2\theta$ -сканирования с выходной щелью коллиматора 20 мкм и щелью перед детектором 0.04 угл. град.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены двухкристальные КДО от образца сразу после приготовления (кривая 1) и последующего вылеживания (кривые 2, 3). Видно, что кроме брэгговского максимума от подложки при $\Delta\theta = 0$ присутствуют интенсивные и широкие области (“горбы”) дифракционного отражения от структуры ПК. Угловое положение и

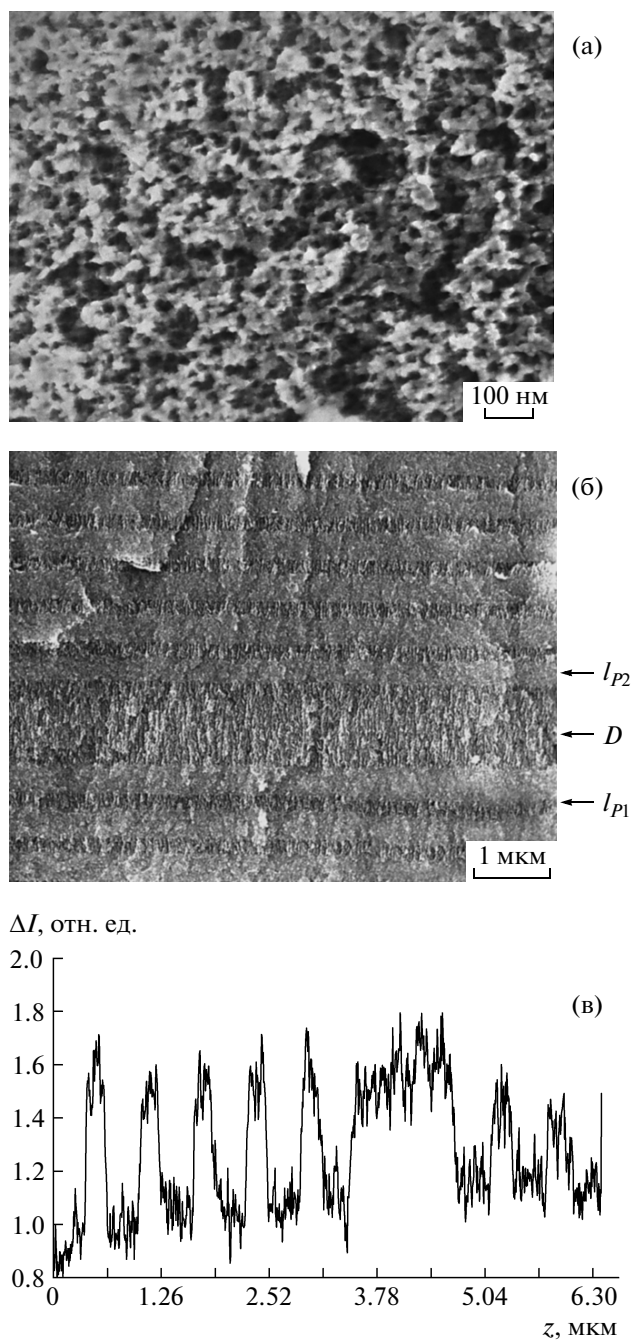


Рис. 3. РЭМ-изображение фрагментов поверхности (а), скола (б) образца ПК со слоями $l_{p1} = 0.43$ мкм, $l_{p2} = 0.20$ мкм и $D_1 = 1.2$ мкм. На вставке (в) показан участок профиля контраста изображения скола.

форма “горбов” свидетельствуют о наличии градиентной деформации в структуре ПК. Анализ КДО показывает, что средняя относительная деформация $\Delta d/d = -\Delta\theta \operatorname{ctg}\theta_B$ сразу после приготовления ПК составляла $\sim 2.5 \times 10^{-3}$. При вылеживании образца в полиэтиленовом пакете в течение девяти месяцев деформация стабилизировалась и

была равна величине 4×10^{-3} на момент измерения карты ДРИ. Интенсивность дифракционного отражения регистрировалась непрерывно в течение 5 сут. Кривые дифракционного отражения, записанные после измерения карты ДРИ, свидетельствуют о произошедшей дополнительной деформации вблизи поверхности ПК. Видно, что граница области дифракционного отражения сместилась в сторону меньших углов (кривые 2 и 3 в диапазоне углов $-350'' : -200''$ различаются) при сохранении формы КДО вблизи брэгговского максимума. Форма КДО, записанных от различных участков поверхности ПК, не изменялась, что свидетельствует об однородности образца как до, так и после эксперимента по регистрации карты ДРИ. Угловые смещения осцилляций при вылеживании образца связаны в основном с увеличением деформации слоев из-за адсорбции примеси на поверхности ПК. Наблюдаемые осцилляции интенсивности на КДО от структуры ПК имеют средний период $\sim 20''$. Этому периоду соответствуют в кинематическом приближении области когерентного рассеяния толщиной ~ 0.8 мкм, в которых набег фазы мал и деформацию можно считать постоянной. Общая толщина $L \sim 32$ мкм сформированной структуры ПК была оценена по абсорбционной методике [12] для средней величины пористости $\langle P \rangle = 0.65$, соответствующей критическому углу $\theta_c \approx 470''$ полного внешнего отражения. Заметим, как было показано в [12], для толстых пористых слоев кремния величина электронной плотности, определенная по величине среднего значения θ_c , обычно занижена из-за влияния шероховатости поверхности. Поэтому полученная из рентгеновских данных толщина структуры в действительности является ее оценкой сверху.

Полупроводниковые периодические структуры и сверхрешетки исследуются давно и вид КДО от них хорошо известен. Необходимо отметить, что характерным является наличие дополнительных максимумов-спутников. Отсутствие даже намеков на их формирование (рис. 2) заставляет сомневаться не только в когерентности слоев ПК, но и в существовании в приповерхностном слое совершенной периодической кристаллической структуры.

Для подтверждения присутствия периодической структуры ПК в приповерхностном слое и определения толщин и морфологии пористых слоев проведены исследования методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Эксперименты выполнялись на микроскопе JEOL JSM 7401F. Изображение скола образца получено при ускоряющем напряжении 5 кВ в режиме “gentle beam”, позволяющем уменьшить ускоряющее напряжение падающих на образец электронов до 1 кВ. Регистрировались вторичные электроны.

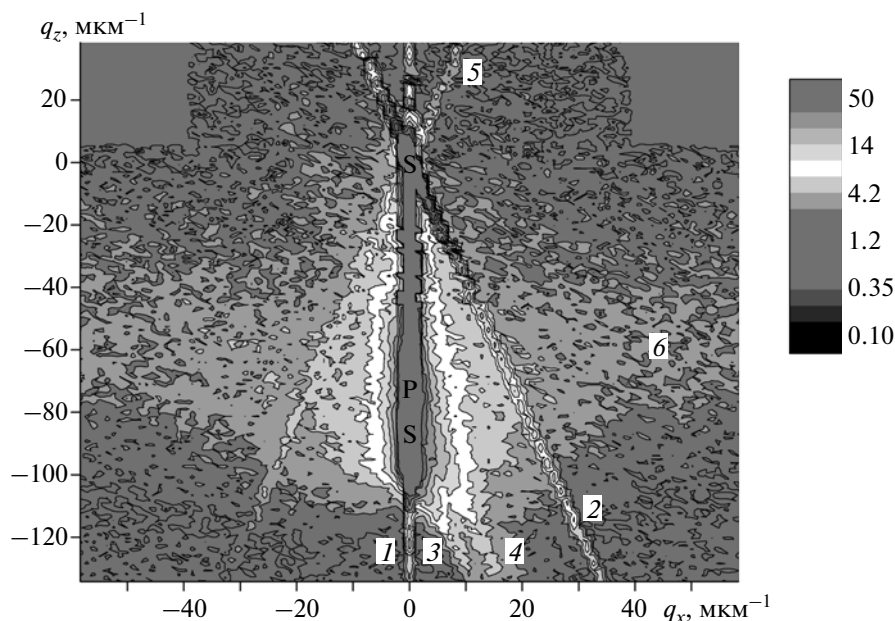


Рис. 4. Экспериментальная карта распределения дифракционного рассеяния от образца ПК; 1 – брэгговское рассеяние; 2–4 – псевдо полосы из-за кристалла-анализатора; 5 – малоугловое брэгговское рассеяние, 6 – диффузное рассеяние. Si(111) отражение, излучение $\text{CuK}\alpha$.

Рабочий отрезок (расстояние от полюсного наконечника объективной линзы до образца) варьировался в пределах 1.5–2.7 мм. Исследования показали, что в результате анодирования была сформирована модулированная по пористости многослойная периодическая структура ПК. Полная толщина L_e структуры по данным РЭМ оказалась равной 28.5(5) мкм. Примеры изображения фрагментов поверхности и скола образца представлены на рис. 3а, 3б соответственно. Анализ даже фрагмента поверхности (рис. 3а) показывает, что верхний слой частично разрушен и имеет меньшую плотность, чем предполагалось по условиям формирования. По полученным РЭМ-изображениям можно заключить, что бислои структуры достаточно однородны и имеют постоянное среднее значение пористости и толщины. К сожалению, механизм формирования контраста РЭМ-изображения не позволяет однозначно судить о величинах пористости в бислоях ПК. Обработка программой Origin изображения периодического изменения контраста (рис. 3в) на фрагменте скола позволила определить толщины подслоев $l_1 = 0.2$ и $l_2 = 0.43$ мкм с постоянным периодом структуры 0.63 мкм.

Для оценки соотношения когерентного и диффузного вкладов в полное рассеяние обратимся к карте ДРИ (рис. 4), на которой в основном наблюдается область когерентного рассеяния вдоль q_z в виде интенсивной полосы-тяжа 1. Полосы 2, 3 и 4 обусловлены использованием в эксперименте плоского кристалла анализатора. Они проходят

через узлы обратной решетки как подложки S, так и пористого кремния PS. Полоса 5 обусловлена слабоинтенсивными “хвостами” рентгеновского пучка, сформированного кристаллом-монохроматором, и дополнительными вкладами в интенсивность в результате дифракции на щелях и малоуглового рассеяния на стенках пор. Диффузное рассеяние 6 от пор и некогерентных кристаллитов локализовано вокруг отражения 111 слоев ПК. Его форма имеет вид треугольника с основанием, параллельным q_x (поверхности образца). Форма диффузного рассеяния отражает деформацию и распределение по размерам пор и кристаллитов по глубине в слоях ПК.

Для выделения с высоким угловым разрешением только когерентной части полного рассеяния и ее сравнения с диффузным рассеянием были записаны сечения ДРИ вблизи узла 111 обратной решетки структуры ПК вдоль q_z (нормали к поверхности) и вдоль q_x (параллельно поверхности), показанные на рис. 5а, 5б соответственно. Видно (рис. 5б), что интенсивность диффузного рассеяния мала по сравнению с интенсивностью брэгговского рассеяния от когерентных кристаллитов. Диффузное рассеяние в основном определяется порами. В данном случае вклад от кристаллитов незначителен. Этот вопрос в литературе подробно не рассматривался. Оценка среднего размера пор δ , дающих основной вклад в диффузное рассеяние, была проведена по анализу ширины его распределения (рис. 5 б). В кинематическом приближении величина $\delta \approx 15$ нм, что хоро-

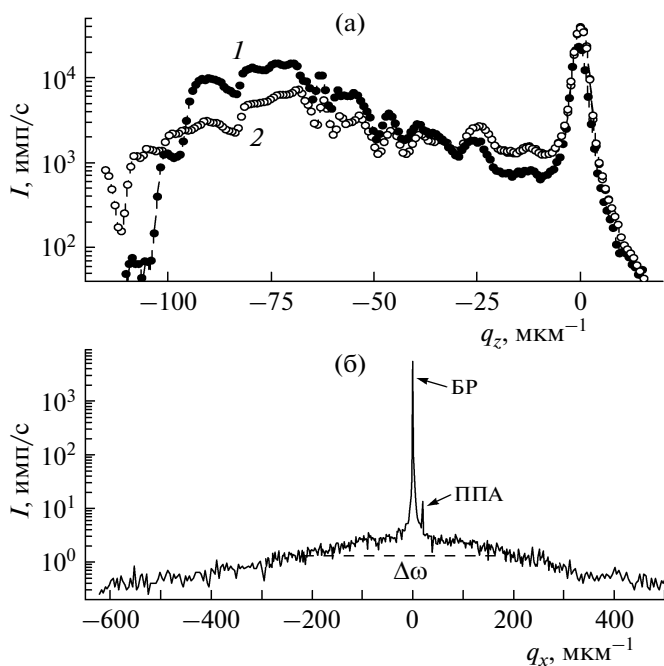


Рис. 5. Сечения узла 111 с-Si по q_z (а) и по q_x (при $q_z = -75 \text{ мкм}^{-1}$) (б) от образца ПК до (1) и после (2) выполнения измерения карты ДРИ. (БР – брэгговское рассеяние, ППА – псевдопик кристалла-анализатора).

шо согласуется с результатами электронной микроскопии (рис. 3).

Анализ формы сечений карты ДРИ показывает, что наиболее заметные изменения произошли в распределении когерентного рассеяния. Из рис. 5а видно, что за время измерений помимо увеличения максимальной деформации из-за абсорбции примесей в верхних слоях структуры ПК также произошло изменение профиля деформации в объеме. Для анализа влияния параметров структуры слоев на вид когерентной части рассеяния от ПК проведено численное моделирование КДО на основе использования рекуррентных соотношений.

МОДЕЛЬ ДИФРАКЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ НА ПОРИСТОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

Моделирование интенсивности когерентного рассеяния рентгеновских лучей на многослойной пористой структуре начнем с рассмотрения отражения от пористой СР. Необходимо учесть, что пористый слой существенно может изменить поляризуемость среды и, как следствие, поглощение, преломление и отражение рентгеновских лучей в слое. Основными анализируемыми параметрами слоев будут толщина l_n , деформация ε_n , пористость P_n и статический фактор Дебая–Валлера f_n в n -м слое.

На основе метода рекуррентных соотношений [15] рассмотрим рассеяние рентгеновских лучей на N -слойном пористом кристалле. Нумерацию слоев проведем снизу вверх. Амплитудный коэффициент отражения когерентных рентгеновских волн от N -слойной пористой системы можно записать в виде рекуррентного соотношения:

$$R_N(q_z) = \frac{S_{N-1}^{(1)} b_N^{(2)} - S_{N-1}^{(2)} b_N^{(1)}}{S_{N-1}^{(1)} - S_{N-1}^{(2)}}, \quad \text{где}$$

$$S_{N-1}^{(1)} = (R_{N-1} - b_N^{(1)}) \exp(i\xi_N l_N), \quad (2)$$

$$S_{N-1}^{(2)} = (R_{N-1} - b_N^{(2)}),$$

$$b_N^{(1,2)} = \xi_N^{(1,2)} / [a_{-h}(1 - P_N) f_N],$$

R_{N-1} – амплитудный коэффициент отражения от $(N-1)$ нижних слоев,

$$\xi_N = \sqrt{(2a_0(1 - P_N) - q_z - \varepsilon_N h)^2 - 4a_h a_{-h} (1 - P_N)^2 f_N^2},$$

$$\xi_N^{(1,2)} = ((2a_0(1 - P_N) - q_z - \varepsilon_N h) \pm \xi_N) / 2.$$

Здесь $a_0 = \pi\chi_0 / (\lambda\gamma_0)$, $a_{h,\bar{h}} = C\pi\chi_{h,\bar{h}} / (\lambda\gamma_{h,0})$ – динамические коэффициенты, C – поляризационный фактор, $\chi_{0,h}$ – фурье-компоненты рентгеновской поляризуемости, $\gamma_{0,h}$ – направляющие косинусы. Пористость слоя связана с относительной плотностью слоя $v_n = \rho_n / \rho_0$ соотношением $P_n = 1 - v_n$, где ρ_0 и ρ_n – плотности слоев до и после анодирования.

Анализ влияния структурных параметров СР на форму КДО проведем на модельной СР толщиной 6.3 мкм, состоящей из 10 пар слоев с толщинами $l_1 = 0.43 \text{ мкм}$ и $l_2 = 0.2 \text{ мкм}$. В дальнейшем эти параметры будут неизменными. Моделирование проведем поочередно для значений $f_{1,2}$ – статические факторы Дебая–Валлера 1-го и 2-го слоя, $P_{1,2}$ – пористости 1-го и 2-го слоев, ε_{SL} , ε_G – периодической и градиентной деформации СР. Сложение периодической и градиентной деформации задает полную деформацию в сверхрешетке $\varepsilon_T = \varepsilon_{SL} + \varepsilon_G$.

Влияние статического фактора Дебая–Валлера на вид КДО. Рассмотрим случай отсутствия полной деформации. На рис. 6 показаны профиль пористости $P(z)$ (а) по глубине СР и КДО (б, в) при значениях статического фактора $f_{1,2} = 1$ и 0.4 соответственно. Видно (рис. 6б), что при значениях пористости, равных 0.4 и 0.6, в подслоях СР на КДО, помимо толщинных осцилляций, должны наблюдаться спутники от СР, образованной переменной пористостью. Моделирование показывает, что при наличии градиента пористости между подслоями $\Delta P = 0.2$ для практического подавления сверхрешеточных спутников необходимо уменьшить фактор f до 0.4 (рис. 6в). Формаль-

но это означает отсутствие самой структуры в кремнии.

Влияние градиентной и периодической деформаций. При рассмотрении модели многослойного ПК необходимо учесть два вклада в полную деформацию $\varepsilon_T = \varepsilon_{SL} + \varepsilon_G$. Величина периодической деформации ε_{SL} обусловлена силами поверхностного натяжения из-за окислов кремния, оборванных водородных связей, адсорбированной примеси и влаги. Эта величина напрямую связана с суммарной поверхностью кристаллитов, которая тем больше, чем выше пористость. Вклад в полную деформацию от градиентной деформации ε_G связан с разным количеством адсорбированных реагентов в структуре после ее формирования. Рассмотрим наиболее общий случай — линейное уменьшение ε_G вглубь от поверхности образца. Фактор $f_{1,2} = 1$ в обоих подслоях при модулированной пористости $P_1 = 0.4$ и $P_2 = 0.6$. На рис. 7 представлены модельные КДО в зависимости от ε_G при отсутствии периодической деформации $\varepsilon_{SL} = 0$ (а) и ее наличии (б, в). Видно, что на КДО (рис. 7а, кривая 3) сателлиты практически пропадают уже при $\varepsilon_G = 5 \times 10^{-4}$. При добавлении периодической деформации ε_{SL} (рис. 7б, кривая 1) в рассматриваемую структуру ПК сателлиты становятся более выраженными (рис. 7б, кривая 2) и их также можно увидеть (рис. 7в, кривая 2).

Дифрактометрия напряжений в многослойной структуре ПК. На основании проведенного рассмотрения влияния параметров структуры пористых слоев на форму КДО был проведен анализ брэгговской части рассеяния от исследуемого образца. Для ограничения времени расчетов на ЭВМ количество и толщины подслоев выбирались в соответствии с используемыми величинами в предыдущих моделях. Структурные параметры подслоев выбирались близкими к средним значениям, полученным на основе экспериментальных данных от исследуемого образца. На рис. 8 представлены КДО и соответствующие профили деформации в слоях ПК в отсутствие и при наличии периодической деформации. Хорошо видно (рис. 8а, 8б), что вид модельных кривых аналогичен экспериментальным. Кроме этого, отсутствуют дополнительные максимумы от СР. В то же время средний период оставшихся осцилляций на “хвостах” КДО совпадает. Это подтверждает, что их появление связано в первую очередь с градиентной деформацией. Периодическая деформация делает интерференционные биения более отчетливыми и “контрастными” (кривые 1 на рис. 8а, 8б). Отметим, что отсутствие периодической деформации эквивалентно эффекту релаксации напряжений на границах подслоев ПК. Этот эффект и наблюдается в виде сглаживания

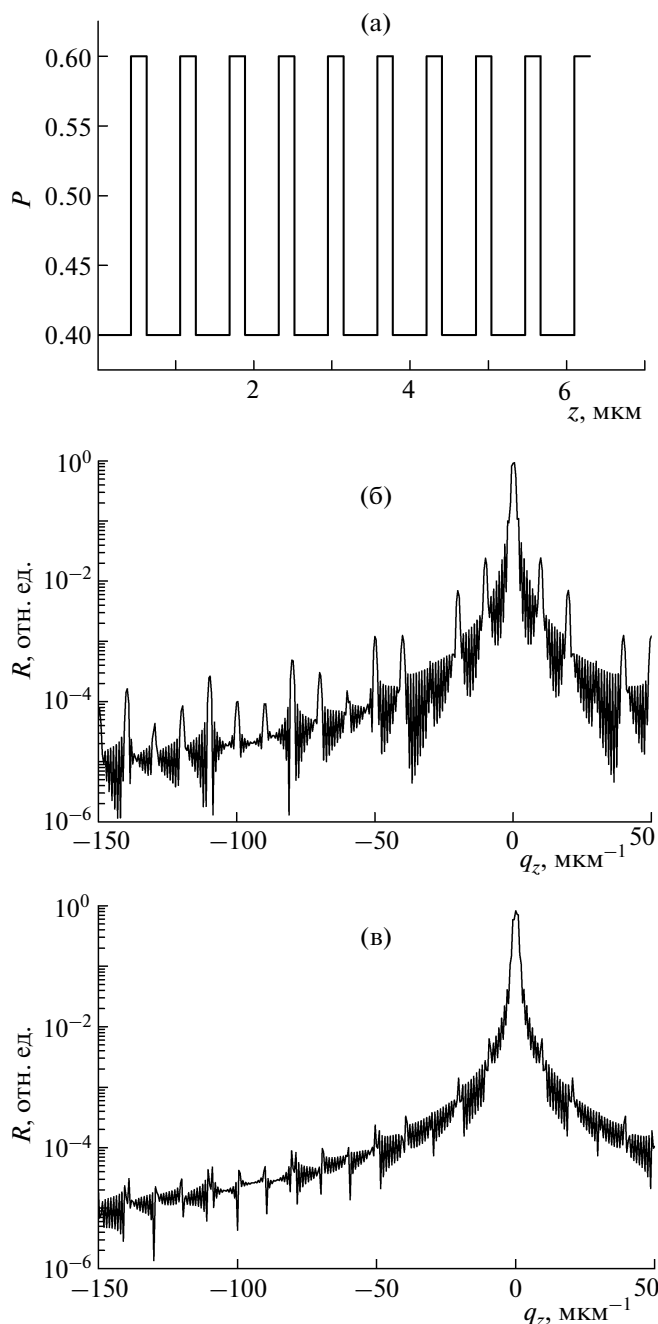


Рис. 6. Профиль пористости P (а) по глубине z СР и модельная КДО (б, в) при значениях $f_{1,2} = 1$ и 0.4 соответственно. Si(111) отражение, излучение $\text{CuK}\alpha$.

интенсивности отражения на “хвостах” КДО и уменьшении амплитуд вдали от брэгговского максимума от подложки кремния (кривые 1 и 2 на рис. 5а). В заключение необходимо отметить, что угловые положения осцилляций на экспериментальных КДО не периодические по сравнению с модельными (кривые 2 на рис. 8а, 8б). Это свидетельствует о более сложном профиле деформации в слоях ПК и требует дополнительного анализа.

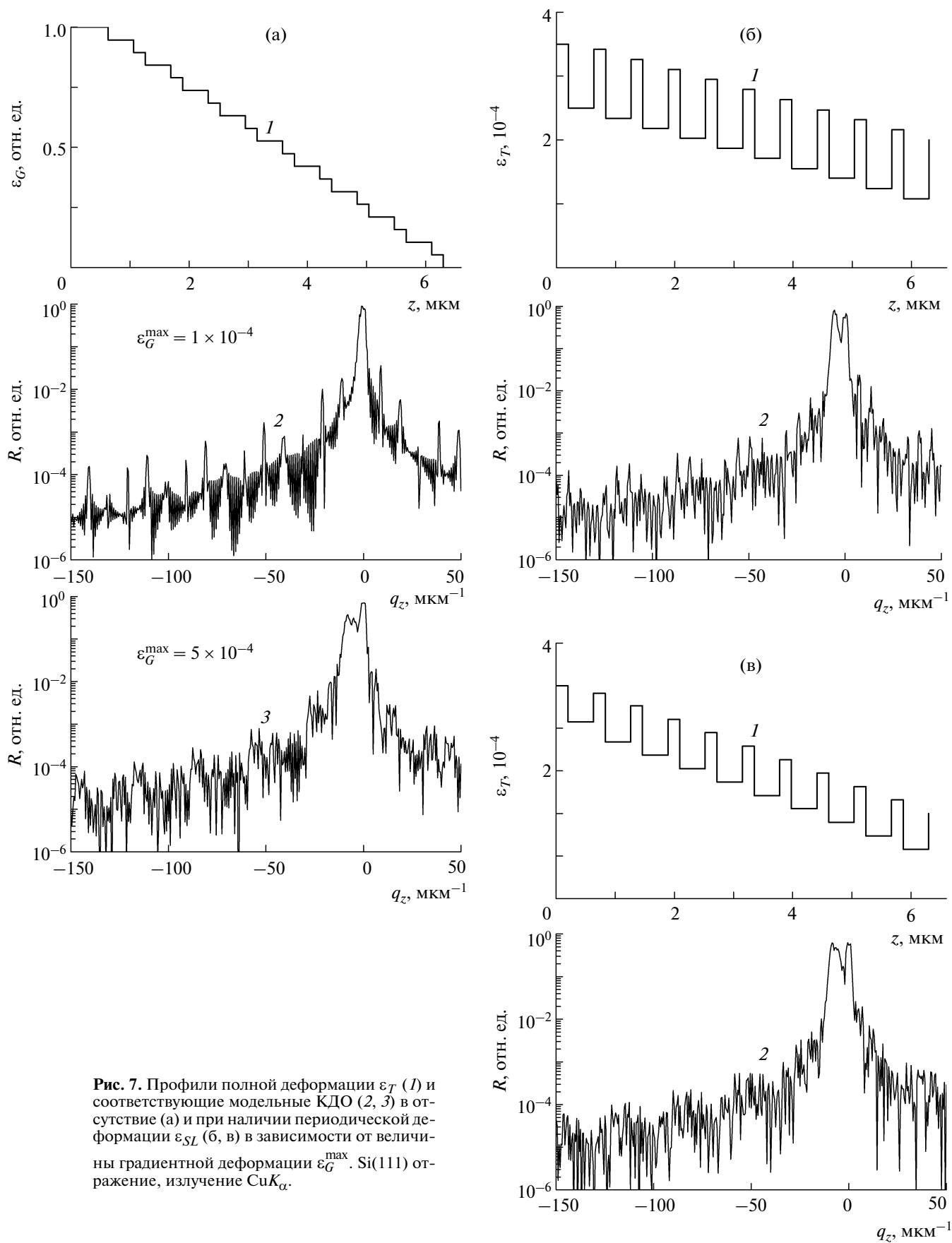


Рис. 7. Профили полной деформации ε_T (1) и соответствующие модельные КДО (2, 3) в отсутствие (а) и при наличии периодической деформации ε_{SL} (б, в) в зависимости от величины градиентной деформации ε_G^{\max} . Si(111) отражение, излучение $\text{CuK}\alpha$.

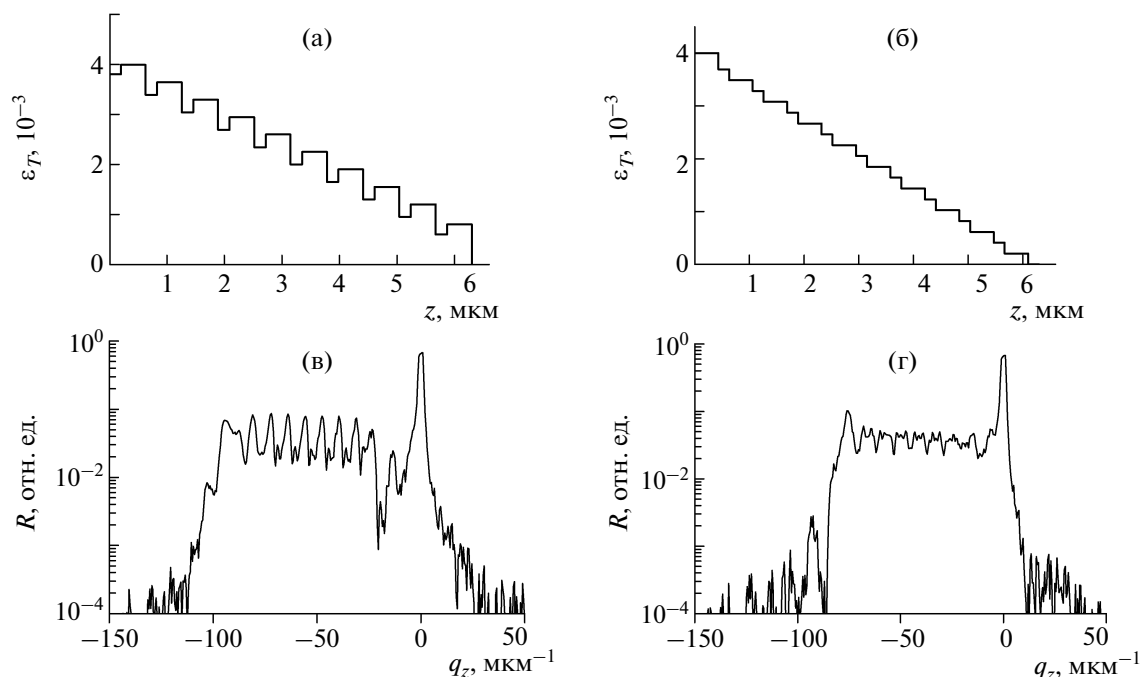


Рис. 8. Профили полной деформации (I) при наличии (а) и в отсутствие (б) периодической деформации ε_{SL} и модельные КДО (2) от пористой сверхрешетки ($f_{1,2} = 1$, $P_{1,2} = 0.4, 0.6$). Si(111) отражение, излучение $\text{CuK}\alpha$.

ВЫВОДЫ

Методом электрохимического травления сформирована мезопористая многослойная периодическая структура на подложках Si(111) (Sb) n^+ -типа проводимости. Проведено изучение особенностей дифракционного рассеяния рентгеновского излучения от полученного образца методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и картографирования рассеяния вблизи узла 111 Si обратной решетки. Определена средняя деформация 4×10^{-3} и оценены пористость $P \sim 0.6$ и толщина ~ 32 мкм сформированной пористой многослойной структуры. Толщина структуры ПК, восстановленная из рентгеновских данных, превышает толщину, определенную методом РЭМ (28.5 мкм), что объясняется сильным влиянием шероховатости и дефектов поверхности на зеркальное отражение. Показано, что, несмотря на неоднородную деформацию по глубине, пористая структура состоит преимущественно из когерентных кристаллитов и для ее описания может быть использована динамическая теория рассеяния. Установлено, что наблюдаемые «осцилляции» на КДО вызваны не периодическими, а непрерывными градиентными деформациями. Неоднородность границ между слоями вызывает релаксацию периодических упругих напряжений. Имеющаяся модуляция пористости по глубине образца (периодическое изменение зарядовой плотности) слабо влияет на формирование спутанной структуры КДО, характерной для сверхрешетки. Однако из-за вы-

сокой чувствительности к межплоскостному расстоянию кристаллической решетки метод высокоразрешающей дифрактометрии для диагностики пористых сверхрешеток имеет ряд ограничений. В первую очередь это связано с величиной градиента деформации и неоднородностями границ по глубине структуры. Модельные расчеты показывают, что даже деформации величиной выше 5×10^{-4} приводят к подавлению дифракционных максимумов от сверхрешетки.

Таким образом, с учетом сделанных замечаний дифрактометрию высокого разрешения можно успешно применять для диагностики сверхрешеток и модулированных пористых полупроводниковых структур.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 10-02-00527-а, № 10-02-00445-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимова А.И., Круткова Е.Ю., Головань Л.А. и др. // ЖЭТФ. 2007. Т. 132. Вып. 3. С. 680.
2. Lehmann V., Stengl R., Luigart A. // Mater. Sci. Eng. B. 2000. V. 11. P. 69.
3. Buttard D., Bellet D., Dolino G. et al. // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. № 11. P. 5814.
4. Emel'yanov V.I., Eremin K.I., Starkov V.V. et al. // Laser Phys. 2003. V. 13. № 10. P.1.
5. Ломов А.А., Караванский В.А., Васильев А.Л. и др. // Кристаллография. 2008. Т. 53. № 5. С. 800.

6. Иржак Д.В., Рощупкин Д.В., Старков В.В. и др. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтр. исслед. 2010. № 11. С. 82.
7. Lerondel G., Romestain R., Vial J.C. et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 196.
8. Punegov V.I., Lomov A.A. // Pis'ma Zh. Tekh. Fiz. 2008. V. 34. № 6. P. 30.
9. Фалеев Н.Н., Павлов К.М., Пунегов В.И. и др. // ФТП. 1999. Т. 33. Вып. 11. С. 1359.
10. Pietsch U., Holy V., Baumbach T. High- Resolution X-ray Scattering from Thin Films and Lateral Nanostructures. New York; Springer-Verlag, 2004. 408 p.
11. Чуев М.А., Ломов А.А., Имамов Р.М. // Кристаллография. 2006. Т. 51. № 2. С. 208.
12. Lomov A.A., Bellet D., Dolino G. // Phys. Status Solidi. B. 1995. V. 190. P. 219.
13. Ломов А.А., Бушугев В.А., Карцев А.А. и др. // Кристаллография. 2009. Т. 54. № 3. С. 410.
14. Korotchenkov G., Cho B.K. // Critical Rev. Solid State Mater. Sci. 2010. V. 35. P. 153.
15. Punegov V.I. // Phys. Status Solidi. A. 1993. V. 136. № 1. P. 9.