

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.226

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3300>

Особенности двухстадийного формирования структур макропористого и мезопористого кремния

А. С. Леньшин[✉], А. Н. Лукин, Я. А. Пешков, С. В. Канныкин, Б. Л. Агапов,
П. В. Середин, Э. П. Домашевская

Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Целью данной работы являлось формирование многослойных структур макропористого кремния и исследование их структурно-морфологических и оптических характеристик, по сравнению с характеристиками многослойных структур мезопористого кремния.

В работе представлены результаты развития методик формирования многослойных структур пористого кремния *por-Si* ступенчатым изменением тока при двухстадийных режимах электрохимического травления.

Методами сканирующей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии и рентгеновской рефлектометрии получены данные о морфологии, составе и пористости макропористых и мезопористых образцов кремния. Показано, что при двухстадийном росте пористых слоев кремния глубина залегания границы между слоями структуры определяется первичным режимом электрохимического травления, а общая толщина слоя растет с увеличением удельной плотности тока электрохимического травления.

Сравнительный анализ относительной интенсивности и тонкой структуры колебательных мод ИК-спектров свидетельствует о значительно более развитой удельной поверхности пор и большей сорбционной способности мезопористого кремния, по сравнению с макропористым кремнием.

Ключевые слова: макропористый кремний, мезопористый кремний, электрохимическое травление, пористость, ИК-спектры, рентгеновская рефлектометрия

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Воронежской области в рамках научного проекта № 19-42-363004. Работа по отработке методик формирования слоев пористого кремния различной пористости выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 19-72-10007. Часть работы выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FZGU-2020-0036 в рамках Государственного задания Вузам. Исследования проведены в Центре коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета (<http://ckp.vsu.ru>).

Для цитирования: Леньшин А. С., Лукин А. Н., Пешков Я. А., Канныкин С. В., Агапов Б. Л., Середин П. В., Домашевская Э. П. Особенности двухстадийного формирования структур макропористого и мезопористого кремния. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(1): 41–48. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3300>

For citation: Lenshin A. S., Lukin A. N., Peshkov Ya. A., Kannykin S. V., Agapov B. L., Seredin P. V., Domashevskaya E. P. Features of two-stage formation of macroporous and mesoporous silicon structures. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021; 23 (1): 41–48. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3300>

✉ Леньшин Александр Сергеевич, e-mail: lenshinas@phys.vsu.ru

© Леньшин А. С., Лукин А. Н., Пешков Я. А., Канныкин С. В., Агапов Б. Л., Середин П. В., Домашевская Э. П., 2021



1. Введение

Использование пористого кремния *por-Si* в качестве одного из материалов современной твердотельной функциональной электроники обусловлено наличием у этого материала многих практически полезных функциональных характеристик и его совместимостью с большинством технологических производственных процессов. Известно, что в зависимости от методики получения *por-Si* может обладать чрезвычайно большой площадью удельной поверхности пор (до 500 м²/г), высокой реакционной способностью и интенсивной фотолюминесценцией (ФЛ) в видимом диапазоне длин волн [1–4].

Ранее в XX веке до введения в научную терминологию понятия «нано» и наноразмерной шкалы по классификации IUPAC поры радиусом до 0.2 нм называли субмикropорами, поры радиусом 0.2–1.0 нм – микropорами, радиусом 1–25 нм – мезопорами, а радиусом более 25 нм – макропорами [5]. В настоящее время имеются варианты систематизации пористых материалов по их морфологии и физико-химическим свойствам. Независимо от размера пор, пористый кремний принято характеризовать таким параметром, как «пористость» *P*, то есть отношением объёма пор к общему объёму пористого слоя образца, а также средним размером элементов структуры. При малом показателе пористости свойства *por-Si* будут близки к свойствам кристаллического кремния, но при его увеличении могут сильно изменяться. Например, при значении пористости *P* не менее 50 %, в образцах *por-Si* обнаруживается фотолюминесценция [6].

Пористый кремний в зависимости от исходного материала, пористости и условий формирования обладает широким интервалом величин удельного сопротивления (10^{-2} – 10^{11} Ом·см), диэлектрической проницаемости (1.75–12) и показателя преломления (1.2–3.5) [7]. В ряде работ показано [1–4], что изменением режимов формирования *por-Si* и постобработки его поверхности можно достаточно эффективно

управлять морфологией, составом поверхности, оптическими и адсорбционными свойствами *por-Si* [6].

На структурах пористого кремния продемонстрированы возможности создания газовых сенсоров, оптических сенсоров и сенсоров влажности. Использование многостадийных режимов формирования пористого слоя на монокристаллическом кремнии также может быть перспективно для тонкой подстройки его поверхностных и объёмных функциональных характеристик с целью дальнейшего формирования на его поверхности тонких слоев таких современных материалов нанoeлектроники, как металлооксидные структуры или структуры типа АЗВ5 [1–4, 8–10].

Целью данной работы являлось исследование формирования многослойных структур макропористого кремния и их структурно-морфологических и оптических характеристик по сравнению с характеристиками многослойных структур мезопористого кремния, полученными нами ранее [11].

2. Экспериментальная часть

Многослойные структуры пористого кремния (далее называемые «макропористый кремний») были сформированы на поверхности подложек кристаллического кремния *c-Si*(100) с удельным сопротивлением 0.3 Ом·см, легированного фосфором. Электрохимическое травления (ЭХТ) осуществлялось в растворе плавиковой кислоты и диметилформамида с добавлением перекиси водорода и серной кислоты при периодическом изменении плотности тока. При этом в процессе двухстадийного ЭХТ ступенчато изменялась плотность тока. Режимы электрохимического травления приведены в табл. 1.

Образцы получены в режимах, аналогичных тем, в которых были синтезированы образцы мезопористого кремния в нашей предыдущей работе [11]. Изменялся только состав раствора ЭХТ в сторону меньшего содержания плавико-

Таблица 1. Режимы получения образцов пористого кремния

№	Режим травления	Плотность анодного тока, мА/см ²	Время травления, минуты
1	одностадийный	15	10
2	одностадийный	50	10
3	двухстадийный	50/15	5/5
4	двухстадийный	15/50	5/5

вой кислоты. Исследования морфологических особенностей образцов были проведены методом сканирующей электронной микроскопии СЭМ (JEOL JSM 6380 LV).

ИК-спектры многослойных структур были получены на ИК-Фурье спектрометре Vertex 70 (Bruker) с использованием приставки для спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) [9] в интервале $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. ИК-спектры сняты по истечении двух недель после получения образцов.

Для определения пористости поверхностного слоя *por*-Si толщиной около 10 нм образцы, полученные при одностадийном ЭХТ, были исследованы методом рентгеновской рефлектометрии (XRR) на лабораторном дифрактометре ARL X'TRA (Cu $K\alpha$) в геометрии Брегга–Брента в интервале малых углов ($2\theta = 0.1\text{--}1^\circ$).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Структурно-морфологические данные СЭМ

На рис. 1 представлены микрофотографии СЭМ сколов образцов макропористого *por*-Si со средним диаметром основного вида пор около 150–200 нм, полученных в одностадийных и двухстадийных режимах ЭХТ с плотностями тока анодирования 15 мА/см^2 (№1) и 50 мА/см^2 (№2), $50/15\text{ мА/см}^2$ (№3) и $15/50\text{ мА/см}^2$ (№4).

Анализ данных СЭМ показывает, что при увеличении плотности тока в указанном диапазоне происходит увеличение толщины пористого слоя и размера пор, но, в отличие от мезопористого кремния [11], полученного при тех же режимах ЭХТ (рис. 2), частичного растрескивания пористого слоя не происходит, и граница между пористыми слоями менее выражена. Так, тол-

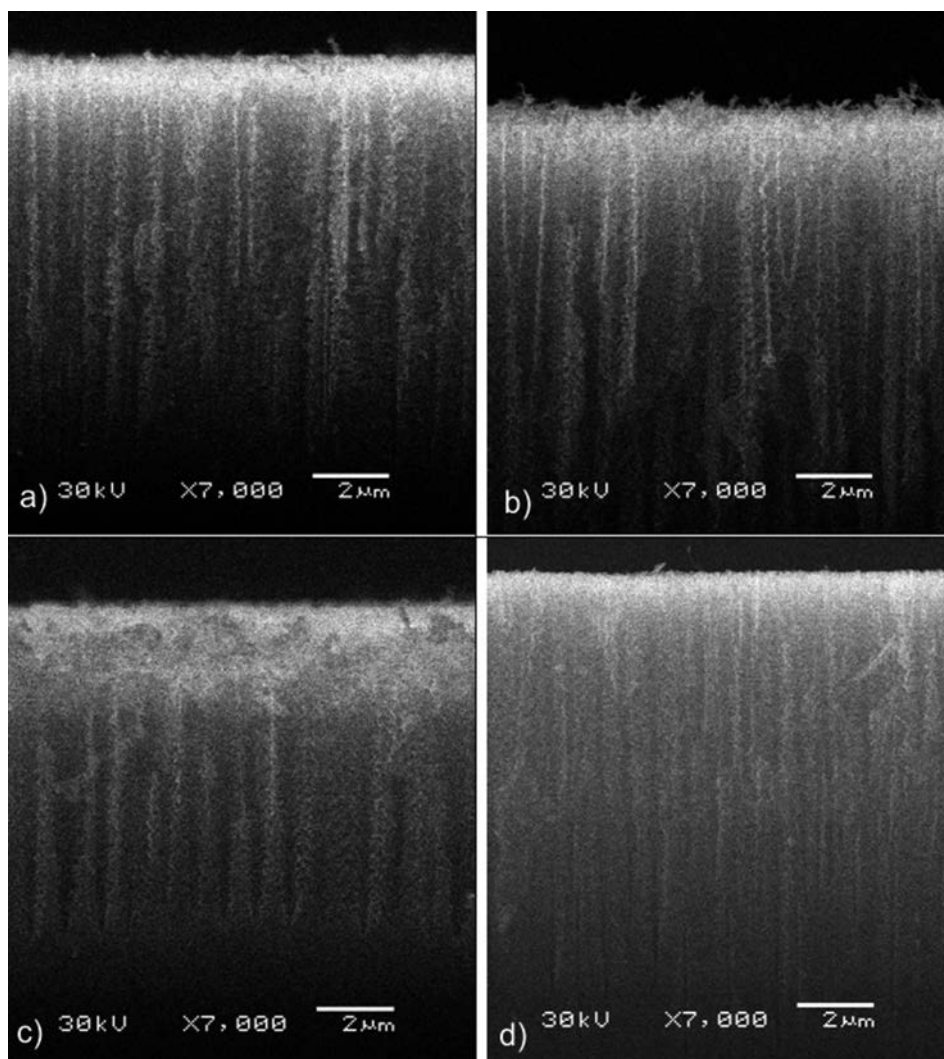


Рис. 1. СЭМ-изображения сколов образцов макропористого кремния, полученных в режимах одно- и двухстадийного травления: а) №1, $j_a = 15\text{ мА/см}^2$; б) №2, $j_a = 50\text{ мА/см}^2$, в) №3, $j_a = 50/15\text{ мА/см}^2$; д) №4, $j_a = 15/50\text{ мА/см}^2$

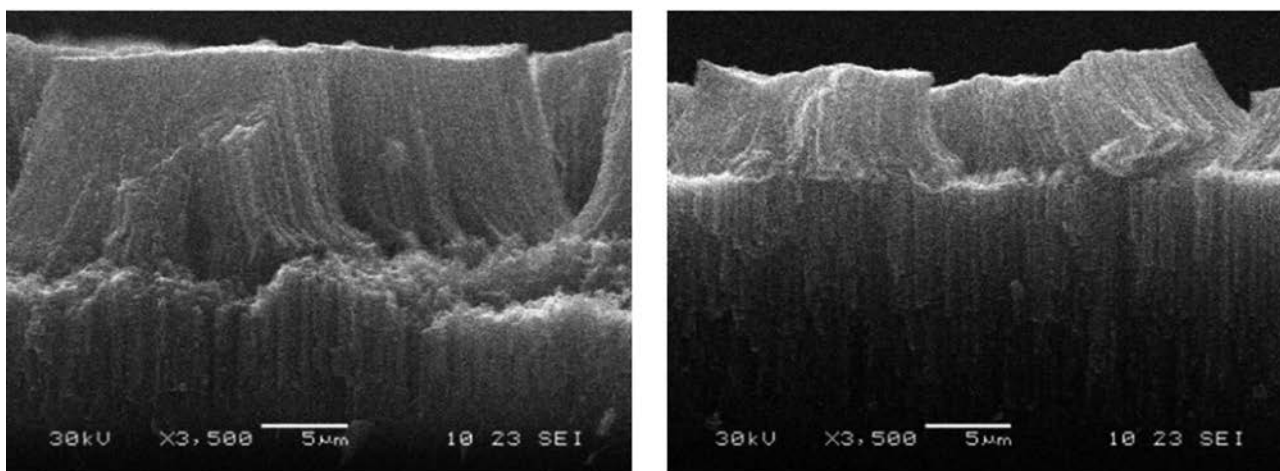


Рис. 2. СЭМ-изображения сколов образцов мезопористого кремния, полученных в режимах двухстадийного травления: а) №208, $j_a = 50/15$ mA/cm²; б) №207, $j_a = 15/50$ mA/cm² [8]

щина пористого слоя образца №1, полученного в одностадийном режиме при плотности тока $j = 15$ mA/cm², составила ~ 15 мкм, а толщина пористого слоя для образца 2, полученного при плотности тока $j = 50$ mA/cm², составила ~ 25 мкм (рис. 1). Средний диаметр основного вида пор в образцах составил 150–200 нм.

Меньшую толщину слоя макропористого кремния по сравнению с мезопористым, а также отсутствие расслоения в поверхностном слое можно объяснить меньшей концентрацией плавиковой кислоты в растворе ЭХТ. С учетом времени травления 10 мин скорость травления пористого слоя составила ~ 1.5 и 2.5 мкм/мин для образцов № 1 и № 2 соответственно, и возросла в полтора раза при более, чем трехкратном росте плотности тока (как и в случае мезопористого кремния). При этом средний размер вертикальных пор у мезопористого кремния составлял ~ 50 - 100 нм.

Для образцов № 3 и № 4 (рис. 1с, d), полученных в двухстадийных режимах изменения плотности тока анодирования, т. е. в режиме убывания ($j = 50/15$ mA/cm²) и нарастания ($j = 15/50$ mA/cm²) плотности тока ЭХТ, толщина пористого слоя образцов составила ~ 15 и ~ 18 мкм соответственно. Анализ изображений сколов образцов позволяет сделать вывод, что глубина залегания границы между слоями структуры, как и в случае мезопористого кремния, определяется первичным режимом ЭХТ [11].

3.2. ИК-спектры макропористого и мезопористого кремния

Для получения информации о составе химических связей в пористых слоях все образцы ма-

кро- и мезопористого кремния были исследованы методом ИК-спектроскопии.

На рис. 3 представлены ИК-спектры НПВО, демонстрирующие влияние увеличения плотности тока ЭХТ и изменения последовательности величин токов при двухстадийном ЭХТ на состав химических связей образцов макропористого кремния. На этих ИК-спектрах наблюдается мода одинаковой интенсивности, соответствующая колебаниям связей Si–Si (616 см⁻¹), и полоса 1000–1200 см⁻¹, соответствующая связям Si–O–Si. Полоса Si–O–Si наиболее четко и интенсивно проявляется в образце № 4, полученном в двухстадийном режиме ЭХТ, $j_a = 15/50$ mA/cm². Кроме того, на ИК-спектрах появляются малоинтенсивные особенности в областях ~ 900 см⁻¹, и 2060–2120 см⁻¹, характерные для различных конфигураций связей Si–H_x и O_x–SiH_y. Приведенные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными ранее для различных однослойных структур пористого кремния [9].

На рис. 4 приведены ИК-спектры НПВО образцов мезопористого кремния, полученные в режимах одно- и двухстадийного травления с разной последовательностью изменения величин токов ЭХТ. С первого взгляда на эти спектры бросается в глаза их значительно большая интенсивность и ярко выраженная структурированность всех мод, едва намечившихся на ИК-спектрах образцов макропористого кремния, приведенных на рис. 3. При этом самыми интенсивными и четко структурированными в спектрах мезопористого кремния являются моды в области 400–1200 см⁻¹, характерные для данного материала [9], соответствующие колебаниям связей Si–Si (616 см⁻¹), Si–H_x (664, 906, 2100–

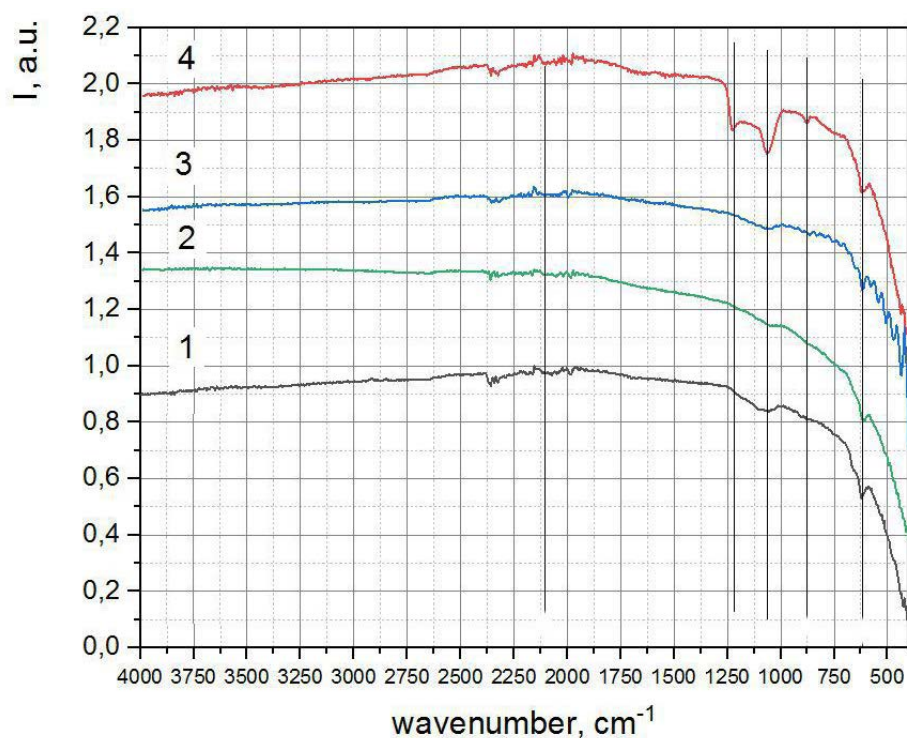


Рис. 3. ИК–спектры образцов макропористого кремния, полученных в режимах одно- и двухстадийного травления: а) № 1, $j_a = 15$ мА/см²; б) № 2, $j_a = 50$ мА/см²; в) № 3, $j_a = 50/15$ мА/см²; д) № 4, $j_a = 15/50$ мА/см²

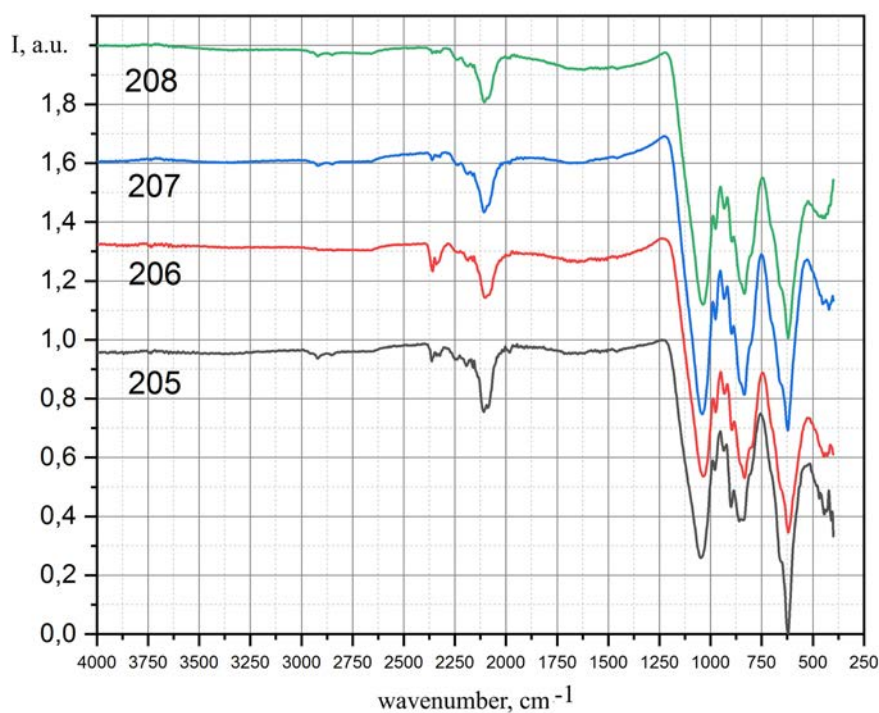


Рис. 4. ИК–спектры образцов мезопористого кремния, полученных в режимах одно- и двухстадийного травления: № 205, $j_a = 15$ мА/см²; № 206, $j_a = 50$ мА/см²; № 207, $j_a = 15/50$ мА/см²; № 208, $j_a = 50/15$ мА/см²

2250 см⁻¹), Si–O–Si (490, 1060–1170 см⁻¹), O₂–Si–OH (~ 830 см⁻¹), O₃–SiH (880 см⁻¹).

Кроме того, на спектрах образцов присутствуют заметные полосы в области 2060–2120 см⁻¹, характерные для различных конфигураций связей Si–H_x и O_x–SiH_y и адсорбированному CO₂ (2360 см⁻¹). Наличие этих связей говорит о значительно большей сорбционной способности мезопористого кремния с большей удельной поверхностью более мелких пор, по сравнению с макропористым кремнием.

Сравнивая спектры мезопористых образцов, полученных в одностадийных режимах (№ 205 и № 206), следует отметить, что с увеличением плотности тока ЭХТ растет относительная интенсивность полос поглощения в областях 750–900 см⁻¹ (Si–H_x, O₂–Si–OH, O_x–SiH_y связи) и полосы 1000–1200 см⁻¹, соответствующей связям Si–O–Si. В совокупности с данными СЭМ это свидетельствует об увеличении удельной площади поверхности пористого слоя S_{уд} для образцов, полученных с более высокой плотностью тока ЭХТ. При этом увеличение S_{уд} способствует более активному взаимодействию материала с окружающей средой, что приводит к более сильному окислению пористого слоя и адсорбции на нем водородных и гидроксильных групп [8, 9].

Аналогичная картина наблюдается при изменении последовательности изменения величин плотности тока в процессе ЭХТ. На ИК-спектре образца № 207, полученного в двухста-

дийном режиме j_a = 15/50 мА/см², наблюдаются более интенсивные по сравнению со спектром «одностадийного» образца № 205 (полученного в режиме с минимальной плотностью тока, j_a = 15 мА/см²) полосы поглощения 750–900 см⁻¹ и 1000–1200 см⁻¹, соответствующие Si–O–Si, Si–H_x, O₂–Si–OH, O_x–SiH_y связям. Эти же моды менее интенсивны по сравнению со спектром образца, полученного с максимальной плотностью тока ЭХТ (№ 208, j_a = 50/15 мА/см²) в двухстадийном режиме

Таким образом, сравнительный анализ относительной интенсивности и тонкой структуры колебательных мод ИК-спектров свидетельствует о значительно более развитой удельной поверхности пор и большей сорбционной способности мезопористого кремния, по сравнению с макропористым кремнием.

3.3. Рентгеновская рефлектометрия

На рис. 5 представлены рентгеновские рефлектограммы XRR образцов мезо- и макропористого кремния (№ 206 и № 2), полученных в одностадийных режимах, и кремниевой подложки монокристаллического кремния Si(100), на которой формировались пористые слои. Результаты показывают, что после прохождения критического угла θ_c полного внешнего отражения (ПВО) рентгеновского излучения, при котором интенсивность отраженного рентгеновского излучения падает наполовину, интенсивность кривых XRR начинает заметно снижаться. При этом значения критических углов ПВО для трех исследованных образцов заметно различаются. Критический угол ПВО для монокристаллической пластины кремния c-Si равен θ_{c-Si} = 0.223°, что хорошо согласуется с теоретическими расчётами (0.226°). В тоже время значения критических углов для макро- и мезопористого кремния существенно меньше: θ_{c-PS} = 0.186° и θ_{c-P.S} = 0.105° соответственно.

Пористость (P) поверхностного слоя образцов можно оценить из соотношения (1), приведенного в работе [12]:

$$P(\%) = \left[1 - \left(\theta_{c-PS} / \theta_{c-Si} \right)^2 \right] \times 100, \quad (1)$$

где θ_{c-Si} – критический угол ПВО монокристаллического кремния c-Si, θ_{c-PS} – критический угол ПВО пористого слоя образцов макро- или мезопористого кремния. В соответствии с соотношением (1), величина пористости мезопористого кремния P = 79 % в 2.5 раза превышает соответствующую величину макропористого кремния P = 31%.

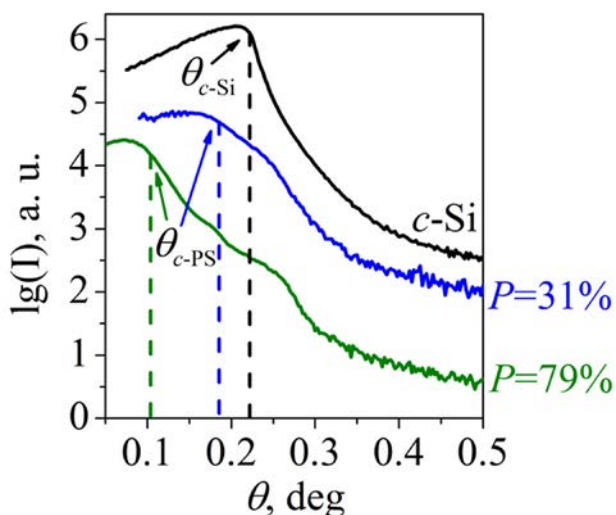


Рис. 5. XRR профили образцов макро- (синяя кривая) и мезопористого кремния (зеленая кривая) и монокристаллической кремниевой подложки c-Si. Пунктирными линиями обозначены положения критических углов ПВО

Измерения фотолюминесценции образцов пористого кремния по методике, описанной в работе [13], показали отсутствие ФЛ у образца макропористого кремния с пористостью 31 % (образец № 2) и наличие характерной ФЛ для образца № 206 мезопористого кремния с пористостью $P = 79$ %. Это соответствует известным литературным данным, согласно которым пористый кремний начинает люминесцировать при показателе пористости P выше 50 % [13, 14].

4. Заключение

В работе представлены результаты, связанные с развитием методик двухстадийного формирования многослойных структур пористого кремния различной пористости и различным размером пор.

С использованием метода сканирующей электронной микроскопии показано, что при двухстадийном росте пористых слоев кремния глубина залегания границы между слоями структуры определяется первичным режимом электрохимического травления, а общая толщина слоя растет с увеличением удельной плотности тока ЭХТ.

Средний диаметр основного вида пор в образцах макропористого кремния составляет 150–200 нм, тогда как средний диаметр вертикальных пор у мезопористого кремния в два-три раза меньше и составлял ~ 50–100 нм.

Сравнительный анализ относительной интенсивности и тонкой структуры колебательных мод ИК-спектров показывает, что многослойные образцы макропористого кремния менее окислены по сравнению с образцами мезопористого кремния, и поверхность пор содержит меньшее количество связей типа Si–ОН и Si–Н.

Определенная методом рентгеновской рефлектометрии величина пористости поверхностного слоя мезопористого кремния $P = 79$ % в 2.5 раза превышает соответствующую величину макропористого кремния $P = 31$ %, что находится в соответствии со значительно более развитой удельной поверхностью пор и большей сорбционной способностью мезопористого кремния по сравнению с макропористым кремнием.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Pacholski C. Photonic crystal sensors based on porous silicon. *Sensors*. 2013;13(4): 4694–4713. <https://doi.org/10.3390/s130404694>
2. Harraz F. A. Porous silicon chemical sensors and biosensors: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014;202: 897–912. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.06.048>
3. Qian M., Bao X. Q., Wang L. W., Lu X., Shao J., Chen X. S. Structural tailoring of multilayer porous silicon for photonic crystal application. *Journal of Crystal Growth*. 2006;292(2): 347–350. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.04.033>
4. Леньшин А. С., Кашкаров В. М., Турищев С. Ю., Смирнов М. С., Домашевская Э. П. Влияние естественного старения на фотолюминесценцию пористого кремния. *Письма в журнал технической физики*. 2011;37(17): 1–8. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/14289>
5. Хейфец Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982. 320 с.
6. Canham L. *Handbook of porous silicon*. Switzerland: Springer International Publishing; 2014. 733 p.
7. Зимин С. П. Пористый кремний – материал с новыми свойствами. *Соровский образовательный журнал*. 2004;8(1): 101–107. Режим доступа: http://window.edu.ru/resource/217/21217/files/0401_101.pdf
8. Середин П. В., Леньшин А. С., Голощапов Д. Л., Лукин А. Н., Арсентьев И. Н., Бондарев А. Д., Тарасов И. С. Исследование наноразмерных пленок Al_2O_3 , полученных на пористом кремнии методом ионно-плазменного распыления. *ФТП*. 2015;49(7): 936–941. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/41967>
9. Seredin P. V., Lenshin A. S., Mizerov A. M., Leiste H., Rinke M. Structural, optical and morphological properties of hybrid heterostructures on the basis of GaN grown on compliant substrate por-Si(111). *Applied Surface Science*. 2019;476: 1049–1060. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.239>
10. Seredin P. V., Leiste H., Lenshin A. S., Mizerov A. M. Effect of the transition porous silicon layer on the properties of hybrid GaN/SiC/por-Si/Si(111) heterostructures. *Applied Surface Science*. 2020;508(145267): 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145267>
11. Леньшин А. С., Барков К. А., Скопинцева Н. Г., Агапов Б. Л., Домашевская Э. П. Влияние режимов электрохимического травления при одностадийном и двухстадийном формировании

пористого кремния на степень окисления его поверхностных слоев в естественных условиях. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2019;21(4): 534–543. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/2364>

12. Buttard D., Dolino G., Bellet D., Baumbach T., Rieutord F. X-ray reflectivity investigation of thin p-type porous silicon layers. *Solid State Communications*. 1998;109(1): 1–5. [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(98\)00531-6](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(98)00531-6)

13. Lenshin A. S., Seredin P. V., Agapov B. L., Minakov D. A., Kashkarov V. M. Preparation and degradation of the optical properties of nano-, meso-, and macroporous silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2015;30: 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.09.040>

14. Ксенофонтова О. И., Васин А. В., Егоров В. В., Бобыль А. В., Солдатенков Ф. Ю., Теруков Е. И., Улин В. П., Улин Н. В., Киселев О. И. Пористый кремний и его применение в биологии и медицине. *ЖТФ*. 2014;84(1): 67–78. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/27127>

Информация об авторах

Леньшин Александр Сергеевич, к. ф.-м. н., в. н. с. кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: lenshinas@phys.vsu.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>.

Лукин Анатолий Николаевич, к. ф.-м. н., доцент кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, Воро-

неж, Российская Федерация; e-mail: skr_49@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6521-8009>.

Пешков Ярослав Анатольевич, аспирант кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Tangar77@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0939-0466>.

Канькин Сергей Владимирович, к. ф.-м. н., доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: svkannykin@gmail.com. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8756-5722>.

Агапов Борис Львович, к. т. н., Центр коллективного пользования научным оборудованием, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: b.agapov2010@yandex.ru.

Середин Павел Владимирович, д. ф.-м. н., зав. каф. кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: paul@phys.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6724-0063>.

Домашевская Эвелина Павловна, д. ф.-м. н., профессор кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ftt@phys.vsu.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6354-4799>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 05.02.2021; одобрена после рецензирования 15.02.2021; принята к публикации 15.03.2021; опубликована онлайн 25.03.2021.