Uzbek Journal of Physics
25(1), 33-39, 2023. DOI: https//doi.org/ 10.52304/.v25i1.403

Фотолюминесценция и спектры комбинационного рассеяния наноструктурированного пористого кремния

Рустам Ашуров, М.М. Адилов, Т.К. Турдалиев*

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, ул. Дурмон йули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан

Получена 14.01.2023, revised 15.03.2023

* Corresponding author: e-mail: temurturdaliev@gmail.com, Phone: +998 97 747 85 24

Предложена методика получения наноструктурированного пористого кремния электрохимическим травлением монокристаллических кремниевых пластин. Приведены результаты исследований полученных образцов методами комбинационного рассеяния света, которые не содержат характерных для аморфного кремния пиков, что показывает отсутствие аморфной составляющей в образцах. Также смещение пика в сторону уменьшения энергий, то есть так называемый «красный сдвиг», указывает на присутствие нанокристаллитов в структуре пористого кремния. Выявлено, что образцы обладают устойчивой интенсивной фотолюминесценцией в области 700–900 нм с максимумами ~771–772 нм, что является характерной типичной особенностью фотолюминесценции нанокристаллических кремниевых структур. Спектры фотолюминесценции с большой шириной полосы излучения предположительно обусловлены разбросом размеров и, возможно, формы наночастиц.

Ключевые слова: пористый кремний, электрохимическое травление, спектроскопия комбинационного рассеяния, нанокремний, фотолюминесценция, солнечные элементы.

A technique obtaining nanostructured porous silicon by electrochemical etching of single-crystal silicon wafers is proposed. The results of studies obtained by the methods of Raman scattering of light are presented. They have not characteristic peaks of amorphous silicon, and shows the absence of an amorphous component in the samples. As well as a shift of the peak towards lower energies, that is, to the so-called "red shift" indicates the presence of nanocrystallites in the structure of porous silicon. It was also revealed that the samples have a stable intense photoluminescence in the region of 700–900 nm with maxima of ~771–772 nm, which is a characteristic typical feature of the photoluminescence of nanocrystalline silicon structures. The photoluminescence spectra with a large emission band width are presumably due to the scatter in the size and, possibly, shape of the nanoparticles.

Keywords: porous silicon, electrochemical etching, Raman spectroscopy, nanosilicon, photoluminescence, solar cells.

I. Введение

Пористый кремний (ПК), благодаря своим уникальным физическим свойствам, обусловленным наноразмерной структурой, которые не могут быть реализованы в объемном материале, представляет значительный интерес для использования в различных областях науки и техники. Существует ряд методов получения ПК [1-4] и постоянно растет число примеров его использования [5-7]. Так, ПК можно использовать для создания чувствительных датчиков [8-10], благодаря его большой площади поверхности при малых размерах применять для решения широкого спектра биологических и медицинских задач в области диагностики и лечения заболеваний, включая имплантологию и адресную доставку лекарственных средств [11-14]. ПК применим как в литий-

ионных аккумуляторах, где позволяет кратно увеличить их удельную энергоемкость по сравнению с традиционными анодными материалами [15-18], так и в проточных аккумуляторах [19], где обеспечивает увеличение рабочей поверхности электродов и тем самым повышение их эффективности. Кроме того, ПК с нанокристаллическими включениями перспективен для применения в технологии кремниевых солнечных элементов (СЭ) [20-22], введение в рабочее тело которых нанокристаллического кремния, благодаря присущим ему квантово-размерным эффектам, существенно повышает эффективность фотовольтаических структур. В [23] приведены результаты программного моделирования с одно- и двуслойными пористыми структурами, используемыми в роли антиотражающего покрытия для кремниевых СЭ в сравнении с таковыми без пористого слоя. Показано, что наличие пористого слоя позволяет более эффективно улавливать световое излучение и тем самым заметно повысить КПД СЭ.

В то же время, несмотря на освоенность методов получения ПК, в его технологии существует ряд проблем. Так, присутствие дефектного оксида кремния и аморфного кремния отрицательно сказывается на свойствах ПК структур. Кроме того, широкое прикладное применение ПК в электронных устройствах сдерживается сложностью управления свойствами получаемого пористого слоя и проблемами их деградации.

Цель данной работы состоит в отработке технологии электрохимического травления монокристаллических кремниевых пластин для формирования наноструктурированного ПК без аморфной составляющей с последующим структурным анализом.

II. Объект и методы исследования

Образцы наноструктурированного пористого кремния получали электрохимическим травлением по классической схеме (рис. 1) с использованием ячейки для электрохимической обработки, которая представляет собой пустотелый фторопластовый цилиндр (4) с диаметром центрального отверстия 15 мм, с размещенной на его нижнем торце исходной обрабатываемой кремниевой пластины (2). Цилиндр с пластиной и уплотнительной прокладкой из фторированной резины (3) удерживается на столике (1) из алюминия фиксаторами, которые обеспечивают плотное прижатие торца цилиндра и пластины к прокладке и столику, а уплотнительная прокладка из фторированной резины, деформируемая при прижиме не даёт протечь электролиту (5). В качестве электрода (6) использовали низкоомный графитовый стержень диметром 5 мм.

Свойства, получаемого данным методом ПК, зависят в общем случае от состава раствора электролита, времени травления, рабочего тока, а также от ряда характеристик самой исходной кремниевой пластины.

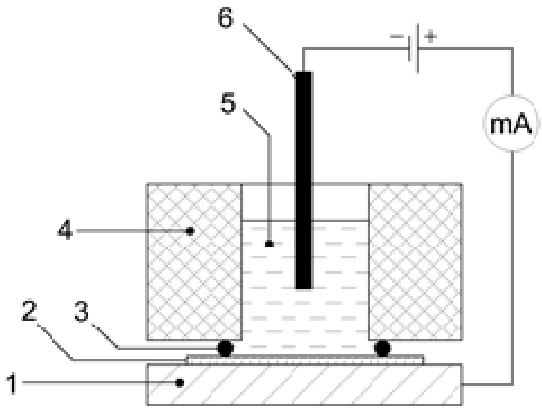


Рисунок 1. Схема ячейки для электрохимического травления: 1 – столик из алюминия, 2 – кремниевая пластина, 3 – уплотнительная прокладка, 4 – фторопластовый цилиндр, 5 – электролит, 6 – графитовый электрод.

В качестве исходного материала применяли пластины из монокристаллического кремния марки КЭС 0,01 (111) и толщиной ~0.4 мм, а в качестве электролита – раствор плавиковой и уксусной кислот в дистиллированной воде, взятых в соотношении 1:1:2. После помещения кремниевой пластины в ячейку травления для очистки ее поверхности от естественного слоя SiO_2 в ячейку на 1–1.5 мин заливали 15% водный раствор плавиковой кислоты, а затем упомянутый электролит и получали ПК травлением при постоянной плотности тока 15 мА/см^2 и с варьированием времени травления в интервалах 15, 30, 60 и 120 секунд. Образцам, подвергнутым процессу травления с указанной различной длительностью присвоены номера соответственно № 1-4. Контроль тока и времени процесса осуществляли с помощью программируемого блока питания Rigol DP832. Важной особенностью проведенных нами процессов травления было поддержание постоянной температуры реагентов и стенок аппаратуры, что обеспечивало высокую воспроизводимость результа-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

тов. После завершения травления образцы промывали в деионизированной воде и подвергали сушке в азотной среде.

Исследования полученных образцов проводились использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) на спектрометре InVia Raman (Renishaw, Великобритания) с разрешением ≤0.5см$^{-1}$ в видимом диапазоне. Светосила >30% обеспечивала высокое разрешение при максимальной стабильности. Воспроизводимость ≤0.1см$^{-1}$. В ходе измерений использованы лазер с длиной волны 785 нм с диаметром пятна лазера на образце 60 мкм, дифракционная решетка с периодом 1200 штр./мм, а в качестве регистрирующего устройства штатный детектор Renishaw CCD Camera. Мощность лазера 1 мВт. Применялся объектив ×50. Время экспозиции 10 с.

Наличие эффекта фотолюминесценции у образцов ПК оценивали с применением в качестве источника возбуждения He-Cd лазера с длиной волны излучения 325 нм с номинальной энергией 20 мВт, с возможностью фокусирования на поверхности образца пятна диаметром 10 мкм, с дифракционной решеткой с периодом 1200 штр./мм и с использованием в качестве регистрирующего устройства штатного детектора Renishaw CCD Camera. Мощность излучения на поверхности образца варьировали в зависимости от выходного сигнала на детекторе. Объектив ×15 uv использован для фокусировки возбуждающего света и сбора излучения. Время экспозиции 10 с, режим “extended”.

Условие единообразия режимов измерений жестко соблюдалось как при исследованиях образцов методом комбинационного рассеяния света, так и при исследовании фотолюминесценции.

III. Описание и анализ результатов

Слои ПК в общем случае могут включать в себя участки или островки, идентифицируемые как кристаллический кремний, стереохимический и дефектный оксид кремния, а также разупорядоченный и аморфный кремний [24]. Спектры КРС образцов № 1-4 демонстрируют относительно симметричные пики. На рис. 2 приведен спектр КРС образца №4.

Известно, что спектр КРС аморфного кремния в нанокомпозитах кремния, как правило, характеризуется четырьмя полосами 480, 380, 301 и 150 см$^{-1}$ [25, 26]. Именно они используются для обнаружения аморфной составляющей и определения соотношения между кристаллической и аморфной составляющими в структуре образцов.

Для этого определяют и сопоставляют интегральные интенсивности полос, соответствующих кристаллической и аморфной составляющим образцов. Результаты аппроксимации спектров КРС четырех образцов ПК, выполненной с использованием штатной опции программного обеспечения спектрометра InViaRaman, подтверждают отсутствие аморфного кремния в образцах.

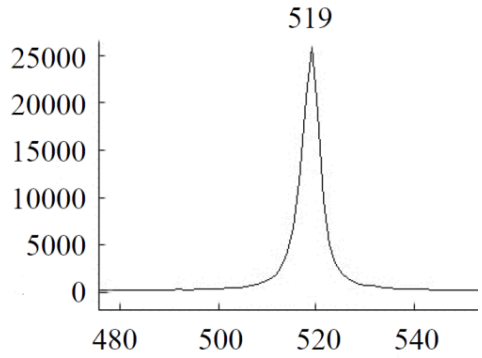


Рисунок 2. Спектр комбинационного рассеяния (КРС) образца №4.

На рис. 3 представлены в качестве типичного примера результаты аппроксимации спектра КРС образца № 4. По [24] линия 514 см$^{-1}$ соответствует нанокристаллической фазе, а максимум при 523 см$^{-1}$ связан с дефектами кристаллической фазы.

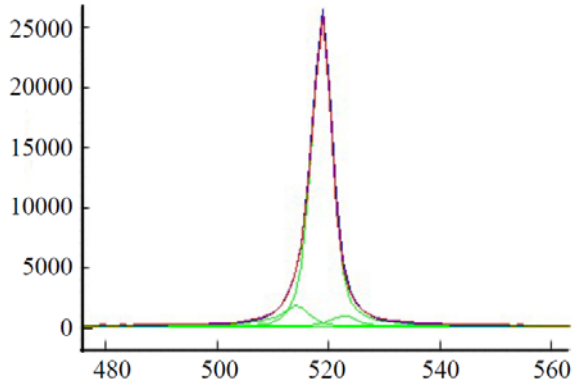


Рисунок 3. Результаты аппроксимации спектра КРС образца № 4.

Как уже отмечалось, линии, соответствующие аморфной фазе, в полученных спектрах не наблюдались. Можно сделать вывод, что выращенные образцы имеют нанокристаллическую структуру и не имеют аморфной составляющей.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Для объемного монокристаллического кремния, как известно, в спектре КРС проявляется резкая и симметричная полоса ~520 $см^{-1}$. Длинноволновый сдвиг в спектрах КРС нанокристаллов кремния зависит от размера наночастиц [24, 27, 28]. Уменьшение размера частиц приводит к смещению в сторону уменьшения энергий, то есть к так называемому «красному сдвигу».

Теоретические и экспериментальные результаты [24, 27, 28] позволяют с достаточно высокой степенью точности определять размеры наночастиц по соответствующим «красным сдвигам», то есть с помощью наших результатов спектроскопии комбинационного рассеяния света можно получить информацию о размере частиц в полученном нами ПК через величину сдвига максимума от полосы, соответствующей кристаллическому кремнию. Используя методику [23, 27, 28], можно с высокой долей уверенности предположить, что размер наночастиц в наших образцах лежит в пределах от 25 до 40 нм.

С учетом «красного сдвига» и того, что в процессе травления пор возможно образование кристаллов кремния различных размеров, можно объяснить и уширение пиков в полученных спектрах. Естественно, что определенный вклад в уширение полос вносят и дефекты кристаллической фазы.

Так, анализ спектров КРС указывает на значительное различие в интенсивностях полос. Например, для образца, полученного при длительности травления 15 с, максимальная интенсивность ~5000 отн. ед., для образцов, подвергнутыхтравлению с длительностью 30, 60 и 120 с, максимальные интенсивности~1500, 2400 и 25000 отн.ед. соответственно.

Предполагается, что увеличение интенсивности полос напрямую связано с ростом толщины соответствующих пленок. Данный результат важен для оптимизации параметров технологического процесса синтеза пористого наноструктурированного кремния.

Из спектров фотолюминесценции (рис. 4) видно, что образцы обладают устойчивой интенсивной фотолюминесценцией в области 700–900 нм с максимумами ~771–772 нм, что является характерной типичной особенностью фотолюминесценции нанокристаллических кремниевых структур [29], связанной с излучательной рекомбинацией в наноразмерных кристаллах кремния. Максимумы фотолюминесценции в области 771–772 нм свидетельствуют, что в их

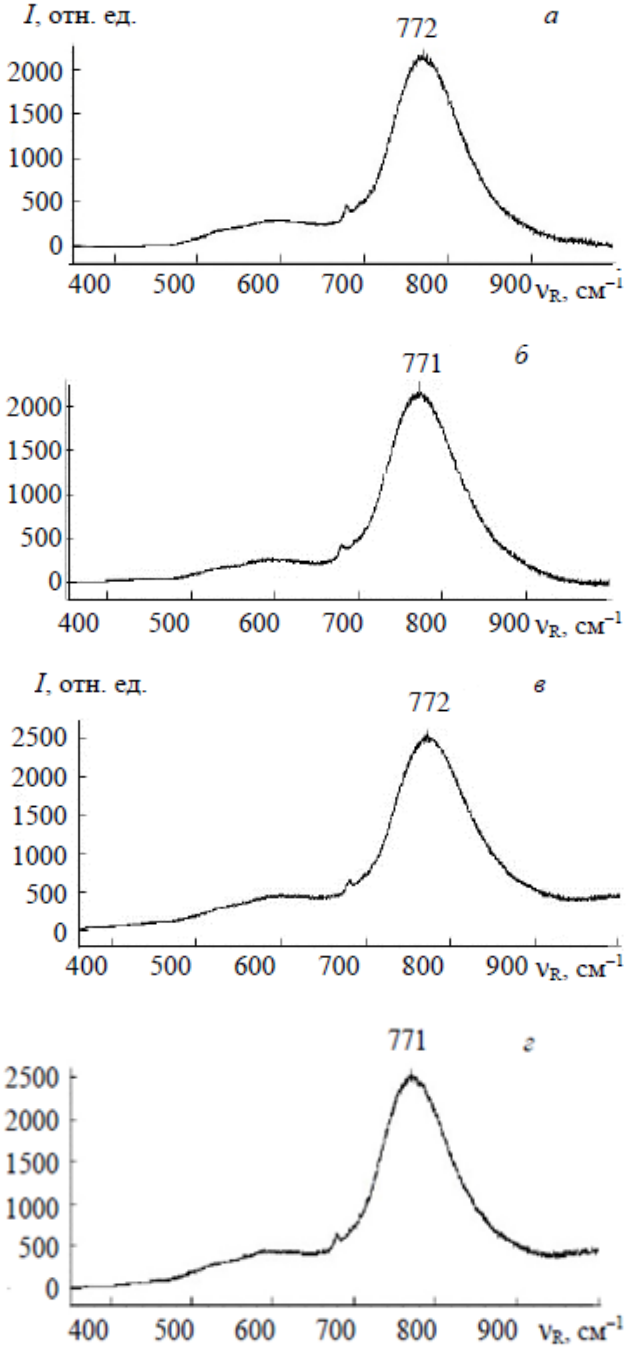


Рисунок 4. Спектры фотолюминесценции образцов № 1–4 (а-г), различающихся длительностью процесса травления.

фазовом составе отсутствует дефектный оксид кремния, наличие которого в поверхностном слое ПК, как известно [30, 31], способствует снижению фотолюминесцентных свойств и приводит к

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

смещению максимума фотолюминесценции в коротковолновую сторону. На нанокристаллическую структуру полученных нами образцов указывает и то, что, согласно квантово-химической модели [32-34], причиной фотолюминесценции в наночастицах кремния являются размерные ограничения, из-за которых усиливается перекрывание электронных и дырочных волновых функций и повышается скорость излучательных процессов релаксации

Большая ширина полосы излучения предположительно обусловлена не механизмом излучательных процессов, а уширением спектральных линий из-за негомогенности материала и указанного выше разброса размеров и, возможно, формы наночастиц.

Отметим, что существует ряд альтернативных моделей возникновения люминесценции в ПК, одна из которых предполагает появление фотолюминесценции в результате возникновения связей между водородом и кремнием. При этом условием их появления является образование аморфного слоя на поверхности структур ПК. Подобное имеет место при гидрировании ПК [35]. Согласно другой модели [36, 37], причиной возникновения фотолюминесценции являются дефекты на границе раздела между кремнием и оксидом кремния.

Корректная оценка применимости той или иной модели для каждого рассматриваемого случая возможна только с учетом конкретных условий получения образцов ПК.

IV. Заключение

Описана простая, но хорошо воспроизводимая на практике технология получения наноструктурированного пористого кремния методом электрохимического травления пластин монокристаллического кремния с обеспечением контроля и поддержания на заданном уровне температуры процесса. Результаты исследований образцов пористого кремния методом комбинационного рассеяния света показали, что они имеют кристаллическую структуру, причем уширение пиков КРС свидетельствует о размерном разнообразии наночастиц пористого кремния в образцах, а также о наличии дефектов кристаллической фазы. Аппроксимация спектров комбинационного рассеяния света подтверждает отсутствие аморфного кремния в образцах. Образцы пористого кремния демонстрируют устойчивую интенсивную фотолюминесценцию в области 700–900 нм, что подтверждает их наноразмерность и кристалличность, а положение максимумов фотолюминесценции в области 771–772 нм указывает на отсутствие в фазовом составе образцов дефектного оксида кремния.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников центра коллективного пользования Института ионно-плазменных и лазерных технологий за поддержку и содействие в проведении аналитических исследований образцов. Особая благодарность выражается с.н.с. Абдурахманову Б.М. за полезную критику и помощь в обсуждении результатов и подготовке рукописи.

Метаданные

The photoluminescence spectra and Raman scattering spectra of nanostructured porous silicon

Rustam Ашуров, М.М. Адилов, Т.К. Турдалиев

[1]Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Sciences, Durmon yuli str. 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

A technique obtaining nanostructured porous silicon by electrochemical etching of single-crystal silicon wafers is proposed. The results of studies obtained by the methods of Raman scattering of light are presented. They have not characteristic peaks of amorphous silicon, and shows the absence of an amorphous component in the samples. As well as a shift of the peak towards lower energies, that is, to the so-called "red shift" indicates the presence of nanocrystallites in the structure of porous silicon. It was also revealed that the samples have a stable intense photoluminescence in the region of 700–900 nm with maxima of ~771–772 nm, which is a characteristic typical feature of the photoluminescence of nanocrystalline silicon structures. The photoluminescence spectra with a large emission band width are presumably due to the scatter in the size and, possibly, shape of the nanoparticles.

Keywords: porous silicon, electrochemical etching, Raman spectroscopy, nanosilicon, photoluminescence, solar cells

Литература (References)

[1] H. Föll, M. Christophersen, J. Carstensen, G. Hasse. Materials Science and Engineering: R: Reports **39**(4), 93 (2002). https://doi.org/10.1016/s0927-796x(02)00090-6

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

[2] F.F. Merkushev, M.A. Gerasimova, A.E. Krum, I.N. Mashukov. Vlijanie sposoba osveshhenija na strukturu poristykh sloev pri elektrokhimicheskom travlenii kremniya. Molodezh' i Nauka: sbornik materialov H Jubilejnoj Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashhennoj 80-letiju obrazovaniya Krasnoyarskogo kraya [elektronnyj resurs] (Krasnoyarsk, Sibirskij federal' nyj institut, (2014). https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/19394

[3] R. Suryana, N.Q. Aini. Journal of Physics and its Applications **4**(2), 28. (2022). https://doi.org/10.14710/jpa.v4i2.12664.

[4] Orest Kuntyi, Galyna Zozulya, Mariana Shepida. Advances in Materials Science and Engineering. Article ID 1482877, 15 pages, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/1482877.

[5] Canham, Leigh (Ed.) Handbook of Porous Silicon. ISBN 978-3-319-71380-9 (2018).

[6] O.A. Kashin, K.V. Krukovskii, A.I. Lotkov. Opportunities and prospects for the use of porous silicon to create a polymer-free drug coating on intravascular stents. AIP Conference Proceedings **2051**, Issue 1, 20119 (2018). https://doi.org/10.1063/1.5083362.

[7] X. Sun, P. Sharma, G. Parish, A. Keating. Microporous and Mesoporous Materials **312**, 110808 (2021). https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110808.

[8] R.F. Balderas-Valadez, V. Agarwal, C. Pacholski. RSC Advances **6**(26), 21430. (2016). https://doi.org/10.1039/c5ra26816h.

[9] E.E. Antunez, M.A. Martin, N.H. Voelcker. Porous Silicon for Biomedical Applications. ISBN 978-0-12-821677-4, p 359 (2021). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821677-4.00001-x

[10] L. De Stefano. Sensors **19**(21), 4776. (2019). https://doi.org/10.3390/s19214776

[11] G.G. Savenkov, V.A. Morozov, A.G. Zegrja, N.V. Ulin, V.P. Ulin, A.A. Lukin, V.A. Bragin, I.A. Os'kin, Ju.M. Mihajlov. Fizika i Tehnika Poluprovodnikov **51**(4), 501. (2017). https://doi.org/10.21883/ftp.2017.04.44342.8391.

[12] E.M. Loginova, D.A. Shishkina, M.A. Zhuravleva. Journal of Physics: Conference Series, **2086**(1) (2021). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2086/1/012114.

[13] E. Anglin, L. Cheng, W. Freeman, Sailor. Advanced Drug Delivery Reviews **60**(11), 1266 (2008). https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.03.017

[14] L.T. Canham. Porous Silicon for Biomedical Applications ISBN 9780857097118, pages 3-20, (2014). https://doi.org/10.1533/9780857097156.1.3).

[15] E. Luais, F. Ghamouss, J. Wolfman, S. Desplobain, G. Gautier, F. Tran-Van, J. Sakai. Journal of Power Sources **274**, 693 (2015). https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.084

[16] Z. Xiao, C. Wang, L. Song, Y. Zheng, T. Long. Journal of Solid State Electrochemistry **26**(5), 1125 (2022). https://doi.org/10.1007/s10008-022-05141-x

[17] T. Yang, Y. Gao, Y. Tang, Y. Zhang, X. Li, L. Liu. Journal of Nanoparticle Research **23**(9) (2021). https://doi.org/10.1007/s11051-021-05280-8

[18] F. Zhang, W. Zhu, T. Li, Y. Yuan, J. Yin, J. Jiang, L. Yang. Frontiers in Chemistry **10**, 889563 (2022). https://doi.org/10.3389/fchem.2022.889563).

[19] Kh.B. Ashurov, B.M. Abdurakhmanov, S.C. Iskandarov, T.K. Turdaliev, A.M. Salimboev, M.M. Adilov, I. Abdusaidov. J. Applied Solar Energy **55**(2), 119 (2019). https://doi.org/10.3103/s0003701x19020038.

[20] T. Dzhafarov, A. Bayramov. Handbook of Porous Silicon. ISB N978-3-319-04508-5, 1-14 (2017). https://doi.org/10.1007/978-3-319-04508-5_95-2.

[21] N.H. Maniya, J. Ashokan, D.N. Srivastava. AIP Conference Proceedings **1961**, Issue 1, 30019 (2018). https://doi.org/10.1063/1.5035221.

[22] M. Balucani, K. Kholostov, V. Varlamava, F. Palma, M. Izzi, L. Serenelli, M. Tucci. IEEE 15-th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO, 2015). https://doi.org/10.1109/nano.2015.7388710.

[23] A.F.A. Rahim, M.A. Ahmed, N.S.M. Razali, R. Radzali, A. Mahmood, I.H. Hamzah, E. Noorsal. Acta Physica Polonica A **135**(4), 637 (2019). https://doi.org/10.12693/ aphyspola.135.637.

[24] G. Faraci, S. Gibilisco, P. Russo, A.R. Pennisi, S. La Rosa. Physical Review B **73**(3) (2006). https://doi.org/10.1103/physrevb.73.033307.

[25] V.A. Volodin, D.I. Koshelev. Journal of Raman Spectroscopy **44**(12), 1760 (2013). https://doi.org/10.1002/jrs.4408.

[26] K. Shrestha, D. Whitfield, V.C. Lopes, A.J. Syllaios, C.L. Littler. MRS Proceedings **1757**, 1-6 (2014). https://doi.org/10.1557/opl.2014.962

[27] C. Meier, S. Lüttjohann, V.G. Kravets, H. Nienhaus, A. Lorke, H. Wiggers. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures **32**(1-2), 155 (2006). https://doi.org/10.1016/j.physe.2005.12.030

[28] P. Mishra, K.P. Jain. Materials Science and Engineering B **95**(3), 202 (2002). https://doi.org/10.1016/s0921-5107(02)00234-9.

[29] Y.-J. Jung, J.-H. Yoon, R.G. Elliman, A.R. Wilkinson. Journal of Applied Physics **104**(8), 083518 (2008). https://doi.org/10.1063/1.3002913.

[30] S. Turishchev, A. Lenshin, E. Domashevskaya, V. Kashkarov, V. Terekhov, K. Pankov, D. Khoviv. Physica Status Solidi C **6**(7), 1651 (2009). https://doi.org/10.1002/pssc.200881015

[31] V.A. Moshnikov, I. Gracheva, A.S. Lenshin, Y.M. Spivak, M.G. Anchkov, V.V. Kuznetsov, J.M. Olchowik. Journal of Non-Crystalline Solids **358**(3), 590 (2012). https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.017.

[32] D. Jurbergs, E. Rogojina, L. Mangolini, U. Kortshagen. Applied Physics Letters **88**(23), 233116 (2006). https://doi.org/10.1063/1.2210788.

[33] G. A. Kachurin, V. A. Volodin, D. I. Tetel'baum. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov (FTP) **39**, № 5, 582 (2005).

[34] N.E. Korsunskaja, T.R. Stara, L.Ju. Homenkova, E.V. Svezhencova, N.N. Mel'nichenko, F.F. Sizov. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov **44**, № 1, 82 (2010).

[35] J. Salonen, V.-P. Lehto, E. Laine. Applied Surface Science **120**(3-4), 191 (1997). https://doi.org/10.1016/s0169-4332(97)00385-1.

[36] V. Kashkarov, I. Nazarikov, A. Lenshin, V. Terekhov, S. Turishchev, B. Agapov, K. Pankov, E. Domashevskaya. Physica Status Solidi C **6**(7), 1557 (2009). https://doi.org/10.1002/pssc.200881019.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

[37] A.S. Len'shin, E V. Maraeva. Izvestiya SPbGEU (Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyi elektrotehnicheskii universitet) № 6, 9 (2011).

Наноструктурали ғовваклик кремнийнинг Раман спектри ва фотолюминесценциси

Рустам Ашуров, М.М. Адилов, Т.К. Турдалиев

[1]ЎзРФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Дурмон йули 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон

Электро-кимёвий йўл билан наноструктурага эга бўлган ғовваклик кремний олиш усули таклиф этилди. Олинган наъмуналарнинг Раман спектрометрияси усулида тахлили натижалари келтирилди, унга кўра, намуналарда аморф кремнийга хос бўлган пиклар йўклиги ва энергиянинг камайиш тарафга силжишининг натижасида, ғовваклик кремний қатлами нано кристаллитларнинг мавжудлиги ва аморф кремнийнинг йўқлиги хулоса қилинди. Шунингдек, наъмуналар 700–900 нм да юқори интенсивликдаги фотолюминесценцияга эга эканлиги ва унинг максимал нуқтаси 771 нм бўлганлиги аниқланди, бу нанокристалл кремнийнинг ўзига хос хусусияти хисобланади.

Калит сўзлар: ғовакли кремний, электро-кимёвий ўйма, Раман спектроскопияси, нанокремний, фотолюминес-ценция, қуёш элементлари

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.