

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики полупроводников

**Исследование оптических свойств пористого кремния и наноразмерных
структур на его основе**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 204 группы

направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

факультета nano- и биомедицинских технологий

Овсянникова Дмитрия Сергеевича

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Ревзина Е.М.

фамилия, инициалы

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Михайлов А.И.

фамилия, инициалы

Саратов 2017

Введение

Материалы, содержащие наноразмерные структуры, привлекают серьёзное внимание в силу своих уникальных физических свойств. Такие объекты должны характеризоваться квазиатомной энергетической структурой электронных состояний с вытекающими из этого особыми оптическими и электрофизическими свойствами, высокой адсорбционной способностью и химической активностью. Поэтому основные закономерности изменения электронного спектра и обусловленные ими физические свойства при переходе к наноразмерным объектам остаются в центре внимания физики наноструктур и являются особенно актуальными. К тому же, специфические особенности взаимодействия между частицами нанометровых размеров и материалом окружающей их матрицы, которая используется для пассивации и стабилизации их свойств, до сих пор мало изучены. Исследования полупроводниковых систем на основе кремния и его соединений являются особенно перспективными по целому ряду причин. Во-первых, кремний – это основной материал микроэлектроники, как в настоящее время, так и в обозримом будущем. Во-вторых, уменьшение размеров элементов полупроводниковых приборов является основной тенденцией в микроэлектронике, что неизбежно привело современные технологии в мир наноэлектроники. Наконец, способность наноматериалов на основе кремния достаточно интенсивно излучать видимый свет при комнатной температуре, в отличие от объемного кристаллического кремния, должно привести к созданию элементов микросхем с возможностью совместной оптической и электрической обработки информации. Создание функционализированных пористых материалов является современным перспективным направлением материаловедения. На основе функциональных материалов создаются биосенсоры, системы адресной доставки лекарств, светоизлучающие и фоточувствительные структуры, детекторы радиационного излучения.

В связи с этим **актуально** изучение и применение эффекта фотолюминесценции, полупроводниковых систем на основе кремния, в биомедицинских целях.

В связи с этим **целью** данной работы является получение пористого кремния с различной морфологией, изучение оптических свойств полученного пористого кремния, при помощи рамановской спектроскопии, построение спектров люминесценции и расчет диаметров квантово-размерных частиц, кремниевых подложек после процесса анодирования.

Структура магистерской работы состоит из введения, двух глав, заключения и библиографического описания (74 источника).

Общая характеристика работы

Во **введении** обосновывается тема, объясняется актуальность данной тематики, формулируется цель работы, состоящая в получении и изучении оптических свойств пористого кремния с различной морфологией и положение, выносимое на защиту.

В **первой главе** «Обзор литературы» проводится обзор научной литературы по данной тематике. Рассматриваются методы получения пористого кремния и его уникальные свойства. Перечислены основные методы получения ПК их преимущества и недостатки. Описаны уникальные свойства, которые приобретает кремний после травления.

Также говорится о применении пористого кремния в разных областях. Пористый кремний лежит в основе действия ряда полупроводниковых приборов – HF-тестер, датчики биомолекул, датчики газа, конденсаторы. Существенную роль в образовании пор играют такие параметры, как: ориентация кристалла, плотность тока анодирования, время травления, наличие в исходной подложке примесей, концентрация кислоты, которой осуществляется травление.

Рассматриваются методы заполнения пористого кремния методом осаждения металла в поры. Описывается изготовления нанокompозитов, двухстороннего пористого кремния, ультратонких пластин ПК.

Во **второй** главе «Результаты получения и изучения оптических свойств ПК и их обсуждение» приводятся результаты травления некоторых, из полученных образцов ПК и их спектры фотолюминесценции. Использовались образцы, с разной ориентацией кристалла и типом легирования. Для изучения оптических свойств образцы анодировали, при разных настройках плотности тока и времени. Получена и описана серия образцов с разным диаметром пор и толщиной пористого слоя. Морфология поверхности полученных структур была изучена с помощью сканирующего электронного микроскопа. Для изучения оптических свойств образцов, были получены спектры фотолюминесценции при помощи рамановской спектроскопии. Были построены спектры фотолюминесценции образцов и с их помощью рассчитаны диаметры квантово-размерных частиц, для каждого образца. Расчеты проводились по формуле (1):

$$\Delta E_g = \Delta E_{g0} + \Delta E, \quad (1)$$

где ΔE_g – ширины запрещенной зоны ПК, ΔE_{g0} – ширина запрещенной зоны объемного кремния. ΔE , определяется по формуле (2):

$$\Delta E = \frac{\hbar^2}{2 \cdot m^* \cdot L^2}, \quad (2)$$

где m^* – эффективная масса. В нашем случае L является диаметром квантово-размерной частицы, d .

Из полученных данных были сделаны выводы об эффективности фотолюминесценции полученных образцов.

Заключение

Основные результаты работы:

1) Анализ литературы по тематике работы показал, что в настоящее время особый научный и практический интерес представляет эффект фотолюминесценция, и его дальнейшее применение в биомедицинских целях.

2) Получены серии образцов пористого кремния, отличающиеся по времени травления и плотности тока травления, а так же по удельному сопротивлению и примесям. По данным СЭМ было показано, что при увеличении плотности тока анодирования в серии наблюдается увеличение концентрации выходов пор на единицу поверхности, что связано с увеличением количества прошедшего электричества в единицу времени. Так же концентрации выходов пор на единицу поверхности, зависит от удельного сопротивления исходного материала. При этом наблюдается увеличение диаметра пор при возрастании плотности тока анодирования, а также увеличивается толщина пористого слоя. В зависимости от удельного сопротивления исходного материала, меняется глубина пористого слоя и диаметр пор. С увеличением удельного сопротивления образца, увеличивается диаметр пор, уменьшается толщина пористого слоя.

3) На всех образцах наблюдается люминесценция. Наиболее ярко выраженный эффект люминесценции наблюдается на образцах с крупным диаметром пор ~ 120 нм. Диаметр квантово-размерных частиц больше у легированных образцов. Соответственно, кремний легированный бором, люминесцирует хуже, так как, более мелкие частицы обладают наибольшей интенсивностью свечения. Так же на размер частиц влияет удельное сопротивление объемного кремния – чем оно меньше, тем крупнее частицы. Стоит отметить, что эта зависимость выражена более наглядно на образцах с примесью. Помимо этого, при воздействии на образец более высокой плотностью тока, частицы на поверхности становятся крупнее. При режимах

с более низкой плотностью тока 10-20 мА/см², время травления, влияет не существенно. Толщина пористого слоя практически не влияет на эффект фотолюминесценции.

4) В ходе работы, все поставленные задачи были выполнены, все цели достигнуты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Cowburn, R.P. Where have all the transistors gone? / R.P. Cowburn// Science 2006, 311, 183–184.
2. «Электрохимические методы получения пористых материалов для топливных элементов»: в 2 ч. / Под ред. В.А. Мошникова и Е.И. Терукова. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 288с.
3. Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине / Под общ. ред. Акад. РАН В.Я. Шевченко, акад. РАН О. И. Киселева, проф. В. Н. Соколова. СПб: Химиздат, 2015. 367с.
4. Cowburn, R.P. Where have all the transistors gone? Science 2006, 311, 183–184.
5. Allwood, D.A.; Xiong, G.; Cooke, M.D.; Cowburn, R.P. Magneto-optical Kerr effect analysis of magnetic nanostructures./ D.A. Allwood ; G. Xiong; M.D. Cooke D: Appl. Phys. 2003, №36, 2175–2182
6. Canham, L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers/ L.T. Canham// Appl. Phys. Lett. 1990, №57, 1046–1048.
7. Smith, R.L. and Collins, S.D. Porous silicon formation mechanisms/ R.L. Smith and S.D. Collins// J. App. Phys., Vol. 71,№.8, 15 April 1992
8. Canham, L.T.; Stewart, M.P.; Buriak, J.M.; Reeves, C.L.; Anderson, M.; Squire, E.K.; Allock, P.; Snow, P.A. Derivatized porous silicon mirrors: Implantable optical components with slow resorbability./ Canham, L.T.; Stewart, M.P.; Buriak, J.M.; Reeves, C.L.; Anderson, M.; Squire, E.K.; Allock, P.// Phys. Status Solidi A Appl. Res. 2000, 182, 521–525.
9. Canham, L.T. Nanoscale semiconducting silicon as a nutritional food additive. / Canham, L.T. // Nanotechnology 2007, 18, 1–6.
10. Herino, R. Impregnation of porous silicon. In Properties of Porous Silicon; / Herino, R.// Canham, L., Ed.;INSPEC: London, UK, 1997.

11. Huang, Y.M. Photoluminescence of copper-doped porous silicon. / Huang, Y.M.// *Appl. Phys. Lett.* 1996, 69,2855–2857.
12. Zacharatos, F.; Nassiopoulou, A.G. Copper-filled macroporous Si and cavity underneath for microchannel heat sink technology. /Zacharatos, F.; Nassiopoulou, A.G. // *Phys. Status Solidi A Appl. Res.* 2008, 205, 2513–2517.
13. Granitzer, P.; Rumpf, K.; Pölt, P.; Simic, S.; Krenn, H. Three-dimensional quasi-regular arrays of Ni nanostructures grown within the pores of a porous silicon layer - magnetic characteristics. / Granitzer, P.; Rumpf, K.; Pölt, P.; Simic, S.; Krenn, H. // *Phys. Status Solidi C* 2008, 5, 3580–3583.
14. Boarino, L.; Baratto, C.; Geobaldo, F.; Amato, G.; Comini, E.; Rossi, A.M.; Faglia, G.; Lerondel, G.; Sberveglieri, G. NO₂ monitoring at room temperature by a porous silicon gas sensor. / Boarino, L.; Baratto, C.; Geobaldo, F.; Amato, G.; Comini, E.; Rossi, A.M.; Faglia, G.; Lerondel, G.; Sberveglieri, G. // *Mater. Sci. Eng. B* 2000, 69–70, 210–214.
15. Pacholski, C.; Sartor, M; Sailor, M.J.; Cunin, F.; Miskelly, G.M. Biosensing using porous silicon double-layer interferometers: Reflective interferometric Fourier Transform Spectroscopy. / Pacholski, C.; Sartor, M; Sailor, M.J.; Cunin, F.; Miskelly, G.M. // *J. Am.Chem. Soc.* 2005, 127, 11636–11645.
16. Sailor, M.J. Sensor applications of porous silicon. In *Properties of Porous Silicon*; / Sailor, M.J. // Canham, L.,Ed.; INSPEC: London, UK, 1997.
17. Lauerhaas, J.M.; Credo, G.M.; Heinrich, J.L.; Sailor, M.J. Reversible luminescence quenching of porous silicon by solvents. / Lauerhaas, J.M.; Credo, G.M.; Heinrich, J.L.; Sailor, M.J. // *J. Am. Chem. Soc.* 1992, 114, 1911–1912.
18. Sancho, A.; Arizti, F.; Gracia, F.J. Porous silicon for the development of capacitive microstructures. / Sancho, A.; Arizti, F.; Gracia, F.J. // *Micrelectron. Eng.* 2009, 86, 2144–2148.
19. Menna, P.; Tsuo, S. Solar cells using porous silicon. In *Properties of Porous Silicon*; / Menna, P.; Tsuo, S. // Canham, L., Ed.; INSPEC: London, UK, 1997.

20. Vitanov, P.; Goranova, E.; Stavrov, V.; Ivanov, P.; Singh, P.K. Fabrication of buried contact in silicon solar cells using porous silicon. / Vitanov, P.; Goranova, E.; Stavrov, V.; Ivanov, P.; Singh, P.K. // *Solar Energy Mater. Solar Cell.* 2009, 93, 297–300.
21. Whitehead, M.A.; Fan, D.; Mukherjee, P.; Akkaraju, G.R.; Canham, L.T.; Coffey, J.L. High-porosity poly(ϵ -caprolactone)/mesoporous silicon scaffolds: Calcium phosphate deposition and biological response to bone precursor cells. / Whitehead, M.A.; Fan, D.; Mukherjee, P.; Akkaraju, G.R.; Canham, L.T.; Coffey, J.L. // *Tissue Eng. A* 2008, 14, 195–206.
22. Park, J.H.; Gu, L.; Maltzahn, G.; Ruoslahti, E.; Bhatia, S.N.; Sailor, M.J. Biodegradable luminescent porous silicon nanoparticles for in vivo applications. / Park, J.H.; Gu, L.; Maltzahn, G.; Ruoslahti, E.; Bhatia, S.N.; Sailor, M.J. // *Nat. Mater.* 2009, 8, 331–336.
23. Lantiat, D.; Toudert, J.; Babonneau, D.; Camelio, S. ; Tromas, C. ; Simonot, L. Self-organization and optical response of silver nanoparticles dispersed in a dielectric matrix. / Lantiat, D.; Toudert, J.; Babonneau, D.; Camelio, S. ; Tromas, C. ; Simonot, L. // *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2007, 15, 150–157.
24. Weissmüller, J.; Newman, R.C.; Jin, H.-J.; Hodge, A.M.; Kysar, J.W. Nanoporous metals by alloy corrosion: Formation and mechanical properties. / Weissmüller, J.; Newman, R.C.; Jin, H.-J.; Hodge, A.M.; Kysar, J.W. // *Mater. Res. Bull.* 2009, 34, 577–586.
25. Whitney, T.M.; Jiang, J.S.; Searson, P.C.; Chien, C.L. Fabrication of magnetic properties of arrays of metallic nanowires. / Whitney, T.M.; Jiang, J.S.; Searson, P.C.; Chien, C.L. // *Science* 1993, 261, 1316–1319.
26. Kompan, M.E.; Gorodetski, A.E.; Tarasova, I.L. Self formation of porous silicon structure: Primary microscopic mechanism of pore separation. / Kompan, M.E.; Gorodetski, A.E.; Tarasova, I.L. // *Solid State Phenom.* 2004, 97–98, 181–184.
27. Helbing, D.; Vicsek, T. Optimal self-organization. / Helbing, D.; Vicsek, T. // *New J. Phys.* 1999, 1, 13.1–13.17.

28. Masuda, H.; Hasegawa, F.; Ono, S. Self-ordering of cell arrangement of anodic porous alumina formed in sulphuric acid solution. / Masuda, H.; Hasegawa, F.; Ono, S. // J. Electrochem. Soc. 1997, 144, L127–L130.
29. Masuda, H.; Fukuda, K. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. / Masuda, H.; Fukuda, K. // Science 1995, 268, 1466–1468.
30. Zacharatos, F.; Gianneta, V.; Nassiopoulou, A.G. Highly ordered hexagonally arranged sub-200 nm diameter vertical cylindrical pores on p-type Si using non-lithographic pre-patterning of the Si substrate. / Zacharatos, F.; Gianneta, V.; Nassiopoulou, A.G. // Phys. Status Solidi A Appl. Res. 2009, 206, 1286–1289.
31. Zacharatos, F.; Gianneta, V.; Nassiopoulou, A.G. Highly ordered hexagonally arranged nanostructures on silicon through a self-assembled silicon-integrated porous anodic alumina masking layer. / Zacharatos, F.; Gianneta, V.; Nassiopoulou, A.G. // Nanotechnology 2008, 19, 495306.
32. Kang, Y.; Jorne, J. Morphological stability analysis of porous silicon formation. / Kang, Y.; Jorne, J. // J. Electrochem. Soc. 1993, 140, 2258–2265.
33. Lehmann, V.; Gösele, U. Porous silicon formation: A quantum wire effect. Appl. Phys. Lett. 1991, 58, 856.
34. Makushok, Y.E.; Parkhutik, V.P.; Martinez-Duart, J.M.; Albella, J.M. Morphology of passive films formed during electrochemical anodization of materials. / Makushok, Y.E.; Parkhutik, V.P.; Martinez-Duart, J.M.; Albella, J.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994, 27, 661–669.
35. Smith, R.L.; Chuang, S.F.; Collins, S.D. A theoretical model of the formation morphologies of porous silicon. / Smith, R.L.; Chuang, S.F.; Collins, S.D. // J. Electron. Mater. 1988, 17, 533–541.
36. John, G.C.; Singh, V.A. Self-organization in porous silicon formation / John, G.C.; Singh, V.A. // Phys. Rev. B, 1997, 56, 4638–4641.

37. Jakubowicz, J.; Szlaferek, A. Computational simulations of pore nucleation in silicon (111), *Electrochem.* / Jakubowicz, J.; Szlaferek, A. // *Comm.* 2008, 10, 329–334.
38. Furuta, H.; Matsuda, T.; Yamanaka, C.; Ikeya, M. Self-organized pattern formation in porous silicon using a lattice model with quantum confinement effect. / Furuta, H.; Matsuda, T.; Yamanaka, C.; Ikeya, M // *J. Phys. Soc. Jap.* 1999, 68, 2218–2220.
39. Claussen, J.C.; Carstensen, J.; Christophersen, M.; Langa, S.; Föll, H. Open-loop control of pore formation in semiconductor etching. / Claussen, J.C.; Carstensen, J.; Christophersen, M.; Langa, S.; Föll, H. // *Proc. Int. Conf. Phys. Control* 2003, 3, 895–900.
40. Emel'yanov, V.I.; Igumnov, V.V.; Starkov, V.V. The dynamics of self-organization of hexagonal pore arrays during anodic etching and oxidation of semiconductors and metals. / Emel'yanov, V.I.; Igumnov, V.V.; Starkov, V.V. // *Tech. Phys. Lett.* 2004, 30, 438–440.
41. Emel'yanov, V.I.; Eremin, K.I.; Starkov, V.V.; Gavrilin, E.Y. Defect-deformation mechanism of the formation of a pore ensemble in semiconductor and metal etching: theory and experiment. / Emel'yanov, V.I.; Igumnov, V.V.; Starkov, V.V. // *Laser Phys.* 2003, 13, 1442–1452.
42. Lehmann, V.; Stengl, R.; Luigart, A. On the morphology and the electrochemical formation mechanism of mesoporous silicon. / Lehmann, V.; Stengl, R.; Luigart, A. // *Mater. Sci. Eng. B* 2000, 69–70, 11–22.
43. Kompan, M.E. Mechanism of primary self-organization in porous silicon with regular structure. *Phys.* / Kompan, M.E. // *Solid State* 2003, 45, 948–952.
44. Kleinmann, P.; Badel, X.; Linnros, J. Toward the formation of three-dimensional nanostructures by electrochemical etching of silicon. / Kleinmann, P.; Badel, X.; Linnros, J. // *Appl. Phys. Lett.* 2005, 86, 183108.

45. Bisi, O.; Ossicini, S. ; Pavesi, L. Porous Silicon : a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics. / Bisi, O.; Ossicini, S. ; Pavesi, L. // Surf. Sci. Rep. 2000, 38, 1–126.
46. Granitzer, P; Rumpf, K; Pölt, P.; Reichmann, A.; Krenn, H. Self-assembled mesoporous silicon in the crossover between irregular and regular arrangement applicable for Ni filling. / Granitzer, P; Rumpf, K; Pölt, P.; Reichmann, A.; Krenn, H. // Phys. E 2007, 38, 205.
47. Rumpf, K.; Granitzer, P.; Pölt, P.; Krenn, H. Transition metals specifically electrodeposited into porous silicon. / Rumpf, K.; Granitzer, P.; Pölt, P.; Krenn, H. // Phys. Status Solidi C 2009, 6, 1592–1595.
48. Rönnebeck, S.; Ottow, S.; Carstensen, J.; Föll, H. Crystal orientation of macropore formation in n-Si with backside-illumination in HF-electrolyte. / Rönnebeck, S.; Ottow, S.; Carstensen, J.; Föll, H. // J. Porous Mater. 2000, 7, 353–356.
49. Halimaoui, A. Porous silicon: material processing, properties and applications. In Porous Silicon Science and Technology; Vial, J.C., Derrien, J., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 1995; Winter School Les Houches, 8–12 February 1994, Les Editions de Physique.
50. Nakagawa, T.; Sugiyama, H.; Koshida, N. Fabrication of periodic Si nanostructure by controlled anodization. / Nakagawa, T.; Sugiyama, H.; Koshida, N. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998, 37, 7186–7189.
51. Hippo, D.; Nakamine, Y.; Urakawa, K.; Tsuchiya, Y.; Mizuta, H.; Koshida, N.; Oda, S. Formation mechanism of 100-nm scale periodic structures in silicon using magnetic-field-assisted anodization. / Hippo, D.; Nakamine, Y.; Urakawa, K.; Tsuchiya, Y.; Mizuta, H.; Koshida, N.; Oda, S. // Jpn. J. Appl. Phys. 2008, 47, 7398–7402.
52. Gelloz, B.; Masunaga, M.; Shirasawa, T.; Mentek, R.; Ohta, T.; Koshida, N. Enhanced controllability of periodic silicon nanostructures by magnetic field anodization. ECS Trans. 2008,16, 195–200.

53. Loni, A.; Canham, L.T.; Berger, M.G.; Arens-Fischer, R.; Münder, H.; Lüth, H.; Arrand, H.F.; Benson, T.M. Porous silicon multilayer optical waveguides. / Loni, A.; Canham, L.T.; Berger, M.G.; Arens-Fischer, R.; Münder, H.; Lüth, H.; Arrand, H.F.; Benson, T.M. // *Thin Solid Films* 1996, 276, 143–146.

54. Wehrspohn, R.B. Linear and non-linear optical experiments based on macroporous silicon photonic crystals. In *Nanophotonic Materials, Photonic Crystals, Plasmonics and Metamaterials*; Wehrspohn, R.B., Kitzerow, H.-S., Busch, K., Eds.; Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2008.

55. Perova, T.S.; Tolmachev, V.A.; Astrova, E.V.; Zharova, Yu.A.; O'Neill, S.M. Tunable one-dimensional photonic crystal structures based on grooved Si infiltrated with liquid crystal E7. / Perova, T.S.; Tolmachev, V.A.; Astrova, E.V.; Zharova, Yu.A.; O'Neill, S.M.// *Phys. Status Solidi C* 2007, 4, 1961–1965.

56. Granitzer, P.; Rumpf, K.; Pölt, P.; Simic, S.; Krenn, H. Three dimensional quasi regular arrays of Ni nanostructures grown within the pores of a porous silicon layer—magnetic characteristics. / Granitzer, P.; Rumpf, K.; Pölt, P.; Simic, S.; Krenn, H.// *Phys. Status Solidi C* 2008, 5, 3580.

57. Pirota, K.R.; Navas, D.; Hernandez-Velez, M.; Nielsch, K.; Vazquez, M. Novel magnetic materials prepared by electrodeposition techniques: arrays of nanowires and multi-layered microwires. / Pirota, K.R.; Navas, D.; Hernandez-Velez, M.; Nielsch, K.; Vazquez, M.// *J. Alloys Compd.* 2004, 369, 18–26.

58. Jeske, M.; Schultze, J.W.; Thönissen, M.; Münder, H. Electrodeposition of metals into porous silicon. / Jeske, M.; Schultze, J.W.; Thönissen, M.; Münder, H. // *Thin Solid Films* 1995, 255, 63–66.

59. Ronkel, F.; Schultze, J.W.; Arens-Fischer, R. Electrical contact to porous silicon by electrodeposition of iron. / Ronkel, F.; Schultze, J.W.; Arens-Fischer, R. // *Thin Solid Films* 1996, 276, 40–43.

60. Steiner, P.; Kozlowski, F.; Lang, W. Electroluminescence from porous silicon after metal deposition into the pores. / Steiner, P.; Kozlowski, F.; Lang, W. // *Thin Solid Films* 1995, 255, 49–51.

61. Jeske, M.; Schultze, J.W.; Munder, H. Porous silicon: Base material for nanotechnologies. / Jeske, M.; Schultze, J.W.; Munder, H. // *Electrochim. Acta* 1995, 40, 1435–1438.
62. Fang, Ch.; Foca, E.; Xu, S.; Carstensen, J.; Foll, H. Deep silicon macropores filled with Copper by electrodeposition. / Fang, Ch.; Foca, E.; Xu, S.; Carstensen, J.; Foll, H. // *J. Electrochem. Soc.* 2007, 154, D45–D49.
63. Fukami, K.; Kobayashi, K.; Matsumoto, T.; Kawamura, Y.L.; Sakka, T.; Ogata, Y.H. Electrodeposition of noble metals into ordered macropores in p-type silicon. / Fukami, K.; Kobayashi, K.; Matsumoto, T.; Kawamura, Y.L.; Sakka, T.; Ogata, Y.H. // *J. Electrochem. Soc.* 2008, 155, D443–D448.
64. Bandarenka, H.; Balucani, M.; Crescenzi, R.; Ferrari, A. Formation of composite nanostructures by corrosive deposition of copper into porous silicon. / Bandarenka, H.; Balucani, M.; Crescenzi, R.; Ferrari, A. // *Superlattices Microstruct.* 2008, 44, 583–587.
65. Sasano, J.; Jorne, J.; Yoshimi, N.; Tsuboi, T.; Sakka, T.; Ogata, Y.H. Effects of chloride ion on Copper deposition into porous silicon. In *Fundamental Aspects of Electrochemical Deposition and Dissolution*; Matlosz, M., Landolt, D., Agoaki, R., Sato, Y., Talbot, J.B., Eds.; The Electrochemical Society: Pennington, NJ, USA, 2000.
66. Fukami, K.; Tanaka, Y.; Chourou, M.L.; Sakka, T.; Ogata, Y.H. Filling of mesoporous silicon with copper by electrodeposition from an aqueous solution. / Fukami, K.; Tanaka, Y.; Chourou, M.L.; Sakka, T.; Ogata, Y.H. // *Electrochim. Acta* 2009, 54, 2197–2202.
67. Ogata, Y.H.; Kobayashi, K.; Motoyama, M. Electrochemical metal deposition on silicon. / Ogata, Y.H.; Kobayashi, K.; Motoyama, M. // *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 2006, 10, 163–172.
68. Sasano, J.; Schmuki, P.; Sakka, T.; Ogata, Y.H. Laser-assisted nickel deposition onto porous silicon. / Sasano, J.; Schmuki, P.; Sakka, T.; Ogata, Y.H. // *Phys. Status Solidi A Appl. Res.* 2003, 197, 46–50.

69. Santinacci, L.; Djenizian, T.; Schwaller, P.; Suter, T.; Etcheberry, A.; Schmuki, P. Selective electrochemical gold deposition onto p-Si (1000) surfaces. / Santinacci, L.; Djenizian, T.; Schwaller, P.; Suter, T.; Etcheberry, A.; Schmuki, P. // *J. Phys. D.: Appl. Phys.* 2008, 41,175301.
70. Aylett, B.J.; Harding, I.S.; Earwaker, L.G.; Forcey, K.; Giaddui, T. Metallization of porous silicon by chemical vapour infiltration and deposition. / Aylett, B.J.; Harding, I.S.; Earwaker, L.G.; Forcey, K.; Giaddui, T. // *Thin Solid Films* 1996, 276, 253–256.
71. Pileni, M.P.; Feltin, N.; Moumen, N. Nanosized ferrite particles – preparation characterization and magnetic properties. In *Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers*; Häfeli, U., Schütt, W., Teller, J., Zborowski, M., Eds.; Plenum Press: New York, NY, USA, 1997.
72. Canham, L.T. Biomedical applications of porous silicon. In *Properties of Porous Silicon*; Canham, L.T., Ed.; IEEE Press: London, UK, 1997.
73. Canham, L.T. Bioactive silicon structure fabrication through nanoetching techniques. / Canham, L.T. // *Adv.Mater.* 1995, 7, 1033–1037.
74. Coffey, J.L.; Whitehead, M.A.; Nagesha, D.K.; Mukherjee, P.; Akkaraju, G.; Totolici, M; Saffie, R.S.; Canham, L.T. Porous silicon-based scaffolds for tissue engineering and other biomedical applications. *Phys. Status Solidi A Appl. Res.* 2005, 202, 1451–1455.