

**В.М. Юров**

Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова,  
Казахстан, г. Караганда, e-mail: exciton@list.ru

## ТОЛЩИНА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Полупроводниковые материалы с наноразмерными структурными элементами являются перспективным материалом для современной электроники. Благодаря такой структуре пористый кремний демонстрирует уникальные физико-химические свойства, которыми не обладает монокристаллический кремний. В литературе описываются два способа получения слоев пористого кремния. Это химическое окрашивающее травление без приложения внешнего электрического поля и анодное электрохимическое травление кремниевой пластины во внешнем электрическом поле. В настоящей работе обсуждается проблема поверхностного слоя пористого кремния. Слой толщиной  $h = d$  названа слоем  $d(I)$ , а слой при  $h \approx 10d$  – слоем  $d(II)$  атомарно-гладкого кремния. При  $h \approx 10d$  начинает проявляться размерная зависимость физических свойств материала и такая структура называется наноструктурой. При  $h = d$  в поверхностном слое происходит фазовый переход. Он сопровождается резкими изменениями физических свойств, например, прямой эффект Холла-Петча меняется на обратный. Проведен анализ работ по описанию свойств пористого кремния, монокристаллического кремния.

Показано, что, начиная с пористости 80%, кремний по своим свойствам слоя  $d(II)_{Si}$  выходит за наноструктуру по Глейтеру. Для большинства чистых металлов толщина поверхностного слоя  $d(I)$  не превышает 3 нм (для  $d(II) \sim 30$  нм).

**Ключевые слова:** пористый кремний, поверхностный слой, атомный объем, наноструктура.

V.M. Yurov

E.A. Buketov Karaganda State University,  
Kazakhstan, Karaganda, e-mail: exciton@list.ru

### Thickness of the surface layer of porous silicon

Semiconductor materials with nanoscale structural elements are promising materials for modern electronics. Due to this structure, porous silicon exhibits unique physicochemical properties that single crystal silicon does not possess. The literature describes two methods for producing layers of porous silicon. This is chemical staining etching without applying an external electric field and anodic electrochemical etching of a silicon wafer in an external electric field. In this paper, we discuss the problem of the surface layer of porous silicon. A layer of thickness  $h = d$  is called a  $d(I)$  layer, and a layer at  $h \approx 10d$  is called a  $d(II)$  layer of atomically smooth silicon. At  $h \approx 10d$ , the dimensional dependence of the physical properties of the material begins to appear, and such a structure is called a nanostructure. At  $h = d$ , a phase transition occurs in the surface layer. It is accompanied by sharp changes in physical properties, for example, the direct Hall-Petch effect is reversed. The analysis of the work describing the properties of porous silicon, single-crystal silicon is carried out.

It has been shown that, starting from 80% porosity, silicon, by its properties of the  $d(II)$  Si layer, extends beyond the Glater nanostructure. For most pure metals, the thickness of the surface layer  $d(I)$  does not exceed 3 nm (for  $d(II) \sim 30$  nm).

**Key words:** porous silicon, surface layer, atomic volume, nanostructure.

В.М. Юров

Е.А. Букетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті,  
Қазақстан, Қарағанды қ., e-mail: exciton@list.ru

### Кеуекті кремнийдің беткі қабатының қалыңдығы

Нанокөлік құрылымдық элементтері бар жартылай өткізгіш материалдар қазіргі электроника үшін перспективті материалдар болып табылады. Бұл құрылымның арқасында кеуекті кремний жалғыз кристалды кремнийде болмайтын ерекше физика-химиялық

қасиеттерге ие. Әдебиетте кеуекті кремний қабаттарын шығарудың екі әдісі сипатталған. Бұл сыртқы электр өрісін қолданбай химиялық бояу және сыртқы электр өрісінде кремний қабаттарын анодтық электрохимиялық сүйрету. Осы жұмыста кеуекті кремнийдің үстіңгі қабатының проблемасы талқыланады. Қалыңдығы  $h=d$  қабаты  $d(l)$  қабаты,  $h \approx 10d$  деңгейіндегі қабат атомдық тегіс кремнийдің  $d(II)$  қабаты деп аталады.  $h \approx 10d$  кезінде материалдың физикалық қасиеттерінің өлшемдік тәуелділігі пайда бола бастайды және мұндай құрылым наноқұрылым деп аталады.  $h=d$  кезінде беткі қабатта фазалық ауысу жүреді. Ол физикалық қасиеттердің күрт өзгеруімен қатар жүреді, мысалы, Хол-Петчтің тікелей эффектісі кері өзгереді. Кеуекті кремнийдің, бір кристалды кремнийдің қасиеттерін сипаттайтын жұмыстарға талдау жасалды.

80% кремний кеуектігінен бастап  $d(II)_{Si}$  қабатының қасиеттері бойынша Глейтер бойынша наноқұрылымнан шығады. Көптеген таза металдар үшін  $d(l)$  беткі қабатының қалыңдығы 3 нм ( $d(II)$  үшін  $\sim 30$  нм) аспайды.

**Түйін сөздер:** кеуекті кремний, беткі қабат, атом көлемі, наноқұрылым.

## Введение

Пористый кремний (ПК), как материал, впервые был получен еще в 1955 году [1] и представляет собой монокристаллический кремний (с-Si). В кремнии в результате химического или электрохимического травления образовалось огромное количество различных по размеру пустот, называемых пораами, как правило, произвольной геометрии, то есть поры образуются под произвольным углом к поверхности кремниевого образца. Первоначально данный материал исследовался учёными с целью получения на его основе толстых диэлектрических слоёв для изоляции в интегральных схемах.

Несмотря на разнообразие возможных методов формирования пористого кремния, наиболее распространенным способом остается электрохимическое травление пластин кристаллического кремния [2, 3].

Разнообразные исследования с помощью электронной микроскопии показывают, что пористый слой морфологически может быть очень разнообразен. Он должен состоять из кристаллического кремния в самых разнообразных морфологических проявлениях, вплоть до квантоворазмерных особенностей [4, 5]. Отметим также достаточно очевидный факт, заключающийся в том, что пористый кремний с малой пористостью и с пористостью высокой существенно отличаются друг от друга не только структурными свойствами, но также оптическими и электрическими [6, 7].

Благодаря возможности создания пористых структур с заданными оптическими свойствами пористый кремний (ПК) используется в солнечной энергетике в качестве антиотражающих текстурированных покрытий, в литературе

такие структуры получили название «черный кремний» [8-12]. Светоизлучающие свойства, возникающие из-за эффектов квантового удержания, биоразлагаемость, а также биологическая активность наноструктурного кремния, применяется во многих областях биомедицинских и фармацевтических исследований, в частности в качестве биомаркеров и контейнеров для точечной доставки лекарств, в том числе пролонгированного действия [13, 14]. Большой интерес проявляется к разработке и исследованию стабильных и воспроизводимых по характеристикам мембран, способных к сепарации молекул по размерам [15].

Приведем несколько российских диссертаций, где подробно описаны свойства пористого кремния [16-20] и присутствует обширная библиография.

Свойства монокристаллического кремния, а затем и пористого кремния начали изучаться еще в конце 70 годов прошлого столетия казахстанскими учеными [21-29]. Ими был обнаружен режим травления кремния, при котором происходит отделение тонких слоев (пластин) монокристаллического кремния без образования пористого слоя на лицевой поверхности пластин. Представлены результаты исследования скрытых дефектных слоев пористого и непористого кремния, структура которых зависит от условий электрохимического анодного травления и параметров образцов.

Казахстанские ученые показали, что основным препятствием для применения пористого кремния в оптоэлектронике является нестабильность его люминесцентных свойств и деградация фотолюминесценции, как в процессе старения на воздухе, так и под действием термического воздействия, кроме того терми-

ческие обработки поверхности пористого кремния существенно изменяют локализацию поверхностного состояния. Уменьшение интенсивности люминесценции обусловлено уходом от поверхности атома водорода, что увеличивает центры безызлучательных рекомбинаций на поверхности пористого кремния.

### Описание модели

В работах [30, 31] обобщена, предложенная нами, модель поверхностного слоя атомарно-гладких металлов. Схематически эта модель представлена на рис. 1.

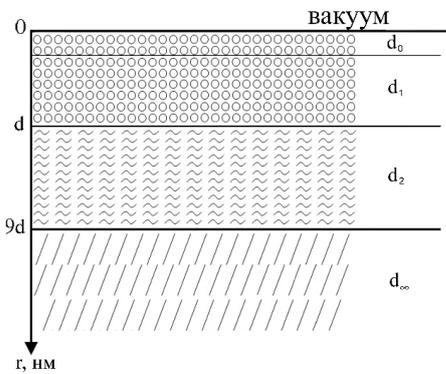


Рисунок 1 – Схематическое изображение поверхностного слоя

Слой де Бройля  $d_0 = \lambda_{dB} = h/p$  для металлов составляет от 0,01 до 0,1 нм. В этом слое начинаются квантовые размерные эффекты. К основным квантово размерным структурам относятся структуры с двумерным электронным газом – эпитаксиальные пленки, МДП-структуры, гетероструктуры и т.д.; структуры с одномерным газом – квантовые нити или проволоки; структуры с нульмерным газом – квантовые точки, ящики, кристаллиты [32].

Для определения толщины поверхностного слоя различных соединений нами использовалась размерная зависимость некоторого физического свойства  $A(r)$ .

Слой  $d_1 = d$  описывается зависимостью:

$$A(r) = A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{d+r}\right), \quad d_0 \leq r \leq d. \quad (1)$$

В слое  $d(I)$  с атомами чистых металлов происходит реконструкция и релаксация,

связанная с перестройкой поверхности [33]. Для золота постоянная решетки равна  $a=0,41$  нм и поверхность перестраивается на расстоянии ( $d(I)_{Au}=1,2/0,41 \approx 3$ ) трех атомных монослоев. Размерные эффекты в слое  $d(I)$  определяются всем коллективом атомов в системе (коллективные процессы). Такие «квазиклассические» размерные эффекты наблюдаются только в наночастицах и наноструктурах [34].

Слой  $d_2$  описывается зависимостью:

$$A(r) = A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{r}\right), \quad r \gg d. \quad (2)$$

Параметр  $d$  связан с поверхностным натяжением  $\sigma$  формулой:

$$d = \frac{2\sigma v}{RT}, \quad (3)$$

здесь  $\sigma$  – поверхностное натяжение массивного образца;  $v$  – объем одного моля;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура. В [30], показано, что с точностью до 3% выполняется:

$$\sigma = 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m, \quad (4)$$

где  $T_m$  – температура плавления твердого тела (К). Соотношение выполняется для всех металлов и для других кристаллических соединений. При  $T = T_m$  получим:

$$d(I) = 0.17 \cdot 10^{-3} v. \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что толщина поверхностного слоя  $d(I)$  определяется одним фундаментальным параметром – молярным (атомным) объемом элемента ( $v = M/\rho$ ,  $M$  – молярная масса (г/моль),  $\rho$  – плотность (г/см<sup>3</sup>)), который периодически изменяется в соответствие с таблицей Д.И. Менделеева.

Слой  $d(II)$  простирается примерно до размера  $d(II) \approx 10d = d_\infty$  где начинается объемная фаза. С этого размера начинаются размерные свойства. Под наноматериалами принято понимать материалы, основные структурные элементы которых не превышают нанотехнологической границы  $\sim 100$  нм, по крайней мере в одном направлении [35]. Ряд исследователей высказывает мнение, что верхний предел (максимальный размер элементов)

для наноструктур должен быть связан с неким критическим характерным параметром: длиной свободного пробега носителей в явлениях переноса, размерами доменов/доменных стенок, диаметром петли Франка-Рида для скольжения дислокаций и т.п. [34]. Значить в слое  $d(\Pi)$  должно быть много размерных эффектов, связанных с оптикой, магнетизмом и другими физическими свойствами согласно уравнению 2.

### Монокристаллический и пористый кремний

Монокристаллический кремний имеет атомную (молярную) массу  $M = 28,086$  (г/моль), плотность  $2,33$  (г/см<sup>3</sup>) и параметр решетки (кубическая, алмазная)  $a = 0,357$  нм. Тогда из уравнении (5) следует:

$$d(I)_{Si} = 2,1 \text{ нм} \quad (6)$$

Эту толщину экспериментально можно определить с помощью скользящих рентгеновских лучей в режиме полного внутреннего отражения. В работе [36] это величина составила  $\sim 2$  нм, что почти совпадает с (6). Это подтверждает уравнение (5).

Итак, слой  $d(I)_{Si}$  атомарно-гладкого монокристаллического кремния представляет

собой наноструктуру. Число частиц кремния в монослое равно  $n = d(I)_{Si}/a \approx 4$ . То есть слой  $d(I)_{Si}$  содержит 4 атомные плоскости кремния. А слой  $d(\Pi)_{Si} \approx 21$  нм также представляет наноструктуру по Глейтеру [37]. Толщина де Бройля равна  $d_0 = 0,116$  нм.

Существующая номенклатура, принятая Международным союзом теоретической и прикладной химии IUPAC, выделяет три категории размера пор в зависимости от их диаметра: микропористый  $< 2$  нм, мезопористый  $2-50$  нм и макропористый  $> 50$  нм [38].

Важной характеристикой p-Si является степень его пористости  $P$ , определяемая как:

$$P = 1 - \rho_{ПК} / \rho_{Si}, \quad (7)$$

где  $\rho_{ПК}$  – плотность пористого кремния (ПК),  $\rho_{Si}$  – плотность монокристалла.

Если подставить уравнение (7) в уравнение (5), то получим:

$$d(I)_{ПП} = d(I)_{Si} / (1 - P). \quad (8)$$

Типичное значение пористости имеет значение 40-70 %, а при сверхкритическом высушивании [39] достигает 95 %. Из уравнения (8) вытекает следующая таблица 1.

**Таблица 1** – Толщина поверхностного слоя при различных значениях пористости

$P, \%$	40	50	60	70	80	90
$d(I)_{ПК}, \text{ нм}$	3,5	4,2	5,25	7,0	10,5	21
$d(\Pi)_{ПК}, \text{ нм}$	35	42	52,5	70	105	210

Таблица 1 показывает, что пористость кремния существенно влияет на свойства наноструктур. Это было также показано в работе [36], но там не приводились количественные данные (как в табл. 1) из-за сложности проведения экспериментов. Структура пор в макропористом кремнии является неупорядоченной, в то время как в мезо и, в особенности, в нанопористом кремнии можно выделить отчетливое направление роста пор, соответствующее кристаллографическому направлению  $\langle 100 \rangle$  [40].

Вопросы, связанные с порообразованием, имеют большое разнообразие в описании и подходах к интерпретации протекающих процессов. Очевидно, что описание данных процес-

сов напрямую будет зависеть от конкретных химических свойств исходного монокристаллического Si, о чем свидетельствуют работы, описывающие попытки получить пористые структуры на других материалах и с отсутствием проявления в них квантово-размерного эффекта [41, 42].

Таблица 1 показывает, что, начиная с пористости 80 % кремний по своим свойствам слоя  $d(\Pi)_{Si}$  выходит за наноструктуру по Глейтеру [37]. Для большинства чистых металлов толщина поверхностного слоя  $d(I)$  не превышает 3 нм (для  $d(\Pi) \sim 30$  нм).

Характерной чертой пористого кремния является большая суммарная площадь его

внутренней поверхности. В зависимости от величины пористости и геометрии пор она может составлять для макропористого кремния от 10 до 100 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>, для мезопористого от 100 до 300 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup> и для нанопористого от 300 до 800 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup> [42].

Пористый кремний в зависимости от условий травления обладает широким интервалом величин удельного сопротивления 10<sup>-2</sup>-10<sup>11</sup> Ом·см [43].

Теплопроводность высокопористого кремния более чем на порядок ниже, чем у монокристаллического (~10 Вт/мК при 300 К) [42].

Оптические свойства пористого кремния также существенно отличаются от таковых для объемного материала. В частности, край спектра поглощения пористого слоя, отделённого от

подложки, в зависимости от пористости смещен в сторону больших  $h\nu$  относительно  $E_{g0}$  на 100-500 мэВ [43].

### Заключение

Полученные уравнения (5) и (8) позволяют эмпирически и с большой точностью рассчитать толщину поверхностного слоя  $d(I)$  атомарно-гладкого кристалла и его пористость. Тем самым узнать много нового о наноструктуре этого соединения.

*Работа выполнена по программе Министерства образования и науки Республики Казахстан. Гранты №0118PK000063 и №Ф.0781.*

### Литература

- 1 Uhlir B.A.. Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon //Bell Labs Technical Journal. – 1955. – Vol.35, №. 2. – P. 333-347.
- 2 Zangoie S., Jansson R., Arwin H. Microstructural control of porous silicon by electrochemical etching in mixed HCl or HF solutions //Applied Surface Science. – 1998. – Vol.136. – P. 123-130.
- 3 Hummel R.E., Chang S. Novel technique for preparing porous silicon // Appl. Phys. Lett. – 1992. – Vol.61, №16. – P. 1965-1967.
- 4 Mouffak Z. Quantum size effect from n-type porous silicon // Microelectronic Engineering. – 1998. – Vol.43-44. – P. 655-659.
- 5 Jung K.H., Shin S., Kwong D.L. Developments in Luminescent Porous Si //J. Electrochem. Soc. – 1993. – Vol.140, №10. – P. 3046-3064.
- 6 Ronkel F., Schultze J.W. Electrochemical Aspects Of Porous Silicon Formation //Journal of Porous Materials. – 2000. – №7. – P. 11-16.
- 7 Решина И.И., Гук Е.Г. Комбинационное рассеяние и люминесценция пористого кремния //ФТП. – 1993. – Т.27, №5. – С.728-735.
- 8 Oh J., Yuan H.-C., Branz H.M. An 18.2%-efficient black-silicon solar cell achieved through control of carrier recombination in nanostructures //Nature Nanotechnology. – 2012. – Vol.7. – P.743-748.
- 9 Wang Y., Liu Y.P., Lai T., Liang H.L. Selective nano-emitter fabricated by silver assisted chemical etch-back for multicrystalline solar cells. //RSC Advances. – 2013. – Vol. 3. – P. 15483-15489.
- 10 Repo P., Benick J., Vahanissi V., Schon J. et al. N-type black silicon solar cells //Energy Procedia. Energy Procedia. – 2013. – Vol.38. – P. 866-871.
- 11 Toor F., Branz H.M., Page M.R., Jones K.M. et al. Multi-scale surface texture to improve blue response of nanoporous black silicon solar cells. // Applied Physics Letters. – 2011. – Vol.99. – P. 103501-1-3.
- 12 Ao X., Tong X., Kim D.S., Zhang L. et al. Black silicon with controllable macropore array for enhanced photoelectron-chemical performance. //Applied Physics Letters. – 2012. – Vol.101. – P. 111901-1-4.
- 13 Pastor E., Matveeva E., Parkhutik V., Curiel-Esparza J. et al. Influence of porous silicon oxidation on its behaviour in simulated body fluid. // Physica Status Solidi C. – 2007. – Vol.4, №. 6. – P. 2136-2140.
- 14 Low S.P., Voelcker N.H., Canham L.T., Williams K.A. The biocompatibility of porous silicon in tissues of the eye // Biomaterials. – 2009. – Vol.30. – P. 2873-2880.
- 15 Velleman L., Shearer C.J., Ellis A.V., Losic D. et al. Fabrication of self-supporting porous silicon membranes and tuning transport properties by surface functionalization // Nanoscale. – 2010. – Vol.2. – P. 1756-1761.
- 16 Зимин С.П. Электрофизика пористого кремния и структур на его основе. – Диссер. доктора физ.-мат. наук, Ярославль, 2003. – 305 с.
- 17 Головань Л.А. Влияние структурных характеристик пористых полупроводников и диэлектриков на их оптические свойства. – Диссер. доктора физ.-мат. наук, Москва, 2008. – 251 с.
- 18 Демидова Н.Е. Транспорт тока, ЭПР и фотолюминесценция в пористом кремнии. – Автореф. кандидата физ.-мат. наук, Нижний Новгород, 2010. – 19 с.
- 19 Мартынов И.Л. Механизмы образования ионов нитроароматических молекул в газовой фазе и на поверхности пористого кремния при УФ-лазерном воздействии. – Автореф. кандидата физ.-мат. наук, Москва, 2011. – 22 с.
- 20 Гостева Е.А. Градиентно-пористые структуры кремния с графеноподобными слоями. – Диссер. кандидата физ.-мат., Москва, 2018. – 130 с.

- 21 Мұсабек Г.К. Формирование и оптические свойства слоев и многослойных структур на основе нанокристаллов кремния. – Диссер. доктора философии (PhD) в области физики. Республика Казахстан, Алматы, 2013. – 143 с.
- 22 Асанов Г.С. Динамический хаос в наноструктурированных автоколебательных системах. – Диссер. доктора философии (PhD) в области радиотехники, электроники и телекоммуникаций, Республика Казахстан, Алматы, 2014. – 108 с.
- 23 Жанабаев З.Ж., Асанов Г.С., Ибраимов М.К., Сагидолда Е. Генератор хаотических сигналов на наноразмерной пленке из пористого кремния // Инновационный патент KZ 23594, 15.12.2010. Опубликовано 15.12.2015, бюл. №12. – 4 с.
- 24 Айтмамбетов Р.М., Диханбаев К.К., Таурбаев Е.Т. Исследование влияния термического отжига на свойства пористого кремния, полученного с применением электролитов различного состава // Вестник КазНУ, серия физическая. – 2006. – №2 (22). – С. 101-109.
- 25 Taubayev Y.T., Timoshenko V.Yu., Maslova N.E., Gonchar K.A., Dihanbayev K.K., Nikulin V.E., Svanbayev E.A., and Taubayev T.I. Formation of luminescent nanocrystalline silicon films from a-Si:H by using rapid thermal annealing and wet chemical etching" // Вестник КазНУ, серия физическая. – 2009. – №4. – С. 67-72.
- 26 Тыныштыкбаев К.Б., Рябкин Ю.А., Токмолдин С.Ж., Айтмуқан Т., Рақыметов Б.А., Верменичев Р.Б. Особенности морфологии пористого кремния, полученного при длительном анодном травлении в электролите с внутренним источником тока. // Вестник Алматинского института энергетики и связи. – 2010, №1(8). – С. 36-40.
- 27 Тыныштыкбаев К.Б., Рябкин Ю.А., Токмолдин С.Ж., Рахметов Б.А., Айтмуқан Т. Водородно-индуцированное скалывание пластин кремния с помощью электрохимического травления // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. – 2012, №4. – С. 40-44.
- 28 Сартова Ж.Е., Азат С., Мансуров З.А., Whitby R.L.D. Производство диоксида кремния из рисовой шелухи и его применение. Обзор // Химический журнал Казахстана. – 2017. – №3(59). – С. 49-65.
- 29 Timoshenko V.Yu., Gonchar K.A., Maslova N.E., Taubayev Y.T. and Taubayev T.T. Electrochemical nanostructuring of semiconductor wafers by capillary-force-assisted method // Int. Journal of Nanoscience. – 2010. – Vol.9, No. 2. – P. 1-5.
- 30 Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч. Толщина поверхностного слоя, поверхностная энергия и атомный объем элемента. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 691-699.
- 31 Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких магнитных наноструктур // Нано- и микросистемная техника. – 2019. – №6. – С. 347-352.
- 32 Арутюнов К.Ю. Квантовые размерные эффекты в металлических наноструктурах // ДАН ВШ РАН. – 2015. – №3(28). – С. 7-16.
- 33 Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
- 34 Уваров Н.Ф., Болдырев В.В. Размерные эффекты в химии гетерогенных систем // Успехи химии. – 2001. – Т.70 (4). – С. 307-329.
- 35 Гусев А.И., Ремпель А.А.. Нанокристаллические материалы. – М.: Физматлит, 2000. – 224 с.
- 36 Балагуров Л.А., Павлов В.Ф., Петрова Е.А., Боронина Г.П. Исследование пористого кремния и его старения методами полного внешнего отражения рентгеновских лучей и инфракрасной спектроскопии. // ФТП. – 1997. – Т. 31, № 8. – С. 957-960.
- 37 Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta mater. – 2000. – Vol.48. – P. 1-29.
- 38 Korotcenkov G.. Porous Silicon: From Formation to Application: Formation and Properties. Vol. 1. CRC Press, 2015. – 423 p.
- 39 Lehmann V., Ronnebeck S. The Physics of Macropore Formation in Low-Doped p-Type Silicon // Journal of The Electrochemical Society. – 1999. – Vol.146, №. 8. – P. 2968-2975.
- 40 Allongue P., Henry de Villeneuve C., Pinsard L., Bernard M.C. Evidence for hydrogen incorporation during porous silicon formation // Applied Physics Letters. – 1995. – Vol.67. – P.941-943.
- 41 Cullis A.G., Canham L.T., Calcott P.D.J. The structural and luminescence properties of porous silicon // Applied Physics Reviews. – 1997. – Vol.82. – P. 909-965.
- 42 Трегулов В.В. Пористый кремний: технология, свойства, применение. – Рязань: Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. – 2011. – 124 с.
- 43 Белик Т. Ю. Особенности пористого кремния, полученного химическим травлением // Наноматериалы и нанотехнологии. – 2012. – №4. – С. 65-66.

#### References

- 1 B.A. Uhlir, Bell Labs Technical Journal, 35 (2), 333-347 (1955).
- 2 S. Zangoie, R. Jansson, and H.Arwin, Applied Surface Science, 136, 123-130 (1998).
- 3 R.E. Hummel and S. Chang Appl. Phys. Lett., 61 (16), 1965-1967 (1992).
- 4 Z. Mouffak, Microelectronic Engineering, 43-44, 655 – 659 (1998).
- 5 K.H. Jung, S. Shin, D.L. Kwong J. Electrochem. Soc., 140 (10), 3046-3064 (1993).
- 6 F. Ronkel, J.W. Schultze, J of Porous Materials, 7, 11-16 (2000).
- 7 I.I. Reshina, E.G. Gyk, FTP, 27 (5), 728-735 (1993). (in Russ)
- 8 J. Oh, H.-C. Yuan, and H.M. Branz, Nature Nanotechnology, 7, 743-748 (2012).
- 9 Y. Wang, Y.P. Liu, T. Lai, and H.L. Liang, RSC Advances, 3, 15483-15489 (2013).
- 10 P. Repo, J. Benick, V. Vahanissi, J. Schon et al, Energy Procedia. Energy Procedia, 38, 866-871 (2013).
- 11 F. Toor, H.M. Branz, M.R. Page, K.M. Jones et al, Applied Physics Letters, 99, 103501 (2011).

- 12 X. Ao, X. Tong, D.S. Kim, L. Zhang et al, *Applied Physics Letters*, 101, 111901 (2012).
- 13 E. Pastor, E. Matveeva, V. Parkhutik, J. Curiel-Esparza et al, *Physica Status Solidi C*, 4 (6), 2136-2140 (2007).
- 14 S.P. Low, N.H. Voelcker, L.T. Canham, K.A. Williams, *Biomaterials*, 30, 2873-2880 (2009).
- 15 L. Velleman, C.J. Shearer, A.V. Ellis, D. Losic et al, *Nanoscale*, 2, 1756-1761 (2010).
- 16 S.P. Zimin, *Elektrofizika poristogo kremniia i strýktýr na ego osnove*, Dissert. doktora fiz.-mat. naýk, Iaroslavl, 2003. – 305 s. (in Russ)
- 17 L.A. Golovan, *Vliianie strýktýrnykh karakteristik poristykh polýprovodnikov i dielektrikov na ih opticheskie svoistva*. – Dissert. doktora fiz.-mat. naýk, Moskva, 2008, 251 s. (in Russ)
- 18 N.E. Demidova, *Transport toka, EPR i fotolýmnestsentsiia v poristom kremniu*. – Avtoref. kandidata fiz.-mat. naýk, Nijni Novgorod, 2010, 19 s. (in Russ)
- 19 I.L. Martynov, *Mehanizmy obrazovaniia ionov nitroaromaticeskikh molekýl v gazovoi faze i na poverhnosti poristogo kremniia pri ÝF-lazernom vozdeistvii*. – Avtoref. kandidata fiz.-mat. naýk, Moskva, 2011, 22 s. (in Russ)
- 20 E.A. Gosteva, *Gradientno-poristye strýktýry kremniia s grafenopodobnymi sloiami*. – Dissert. kandidata fiz.-mat., Moskva, 2018, 130 s. (in Russ)
- 21 G.K. Musabek, *Formirovanie i opticheskie svoistva sloev i mnogoslounykh strýktýr na osnove nanokristallov kremniia*. Dissert. doktora filosofii (PhD) v oblasti fiziki. Respýblika Kazahstan, Almaty, 2013, 143 s. (in Russ)
- 22 G.S. Asanov, *Dinamicheski haos v nanostrýktýrirovannykh avtokolebatelnykh sistemakh*. – Dissert. doktora filosofii (PhD) v oblasti radiotekhniki, elektroniki i telekommýnikatsii, Respýblika Kazahstan, Almaty, 2014, 108 s. (in Russ)
- 23 Z.J. Janabaev, G.S. Asanov, M.K. Ibrahimov, E. Sagidolda *Generator haoticheskikh signalov na nanorazmernoii plenke iz poristogo kremniia*, Innovatsionnyi patent KZ 23594, 15.12.2010. Opýblikovan 15.12.2015, býl. №12, 4 s. (in Russ)
- 24 R.M. Aitmambetov, K.K. Dihanbaev, E.T. Taýrbaev, *Rec.Contr.Phys.*, 2 (22), 101-109 (2006). (in Russ)
- 25 Y.T. Taurbayev, V.Yu. Timoshenko, N.E. Maslova, et al, *Rec.Contr.Phys.*, 4, 67-72 (2009) (in Russ).
- 26 K.B. Tynyshtybaev, Iý.A. Riabikin, et al, *Vestnik Almatinskogo institýta energetiki i svyazi*, 1(8), 36-40 (2010). (in Russ)
- 27 K.B., Tynyshtybaev Iý.A. Riabikin, et al, *Izvestia VÝZov. Materialy elektronnoi tekhniki*, 4, 40-44 (2012). (in Russ)
- 28 J.E. Sartova, S. Azat, Z.A. Mansýrov, R.L.D. Whitby, *Himicheskii jýrnal Kazahstana*, 3(59), 49-65 (2017). (in Russ)
- 29 V.Yu. Timoshenko, K.A. Gonchar, et al, *Int. Journal of Nanoscience*, 9 (2), 1-5 (2010).
- 30 V.M. Iýrov, S.A. Gýchenko, and V.Ch. Laýrnas, *Fiziko-himicheskie aspekty izýcheniia klasterov, nanostrýktýr i nanomaterialov*, 10, 691-699 (2018). (in Russ)
- 31 V.M. Iýrov, V.Ch. Laýrnas, S.A. Gýchenko, *Nano- i mikrosistemnaia tekhnika*, 6, 347-352 (2019). (in Russ)
- 32 K.Iý. Arytýnov, *DAN VSh RAN*, 3 (28), 7-16 (2015). (in Russ)
- 33 K. Oýra, V.G. Lifshits, A.A. Saranin, A.V. Zotov, M. Kataiama, *Vvedenie v fiziký poverhnosti*, (Moscow, Naýka, 2006), 490 s. (in Russ)
- 34 N.F. Ývarov, V.V. Boldyrev, *Ýspehi himii*, 70 (4), 307-329 (2001). (in Russ)
- 35 A.I. Gýsev, A.A. Rempel, *Nanokristallicheskie materialy*, (Moscow, FizmatLit, 2000), 224 s. (in Russ)
- 36 L.A. Balagýrov, V.F. Pavlov, E.A. Petrova, G.P. Boronina, *FTP*, 31 (8), 957-960 (1997). (in Russ)
- 37 H. Gleiter, *Acta mater*, 48, 1-29 (2000).
- 38 G. Korotcenkov, *Porous Silicon: From Formation to Application: Formation and Properties*, Vol. 1, (CRC Press, 2015), 423 p.
- 39 V. Lehmann and S. Ronnebeck, *Journal of The Electrochemical Society*, 146 (8), 2968-2975 (1999).
- 40 P. Allongue, et al, *Applied Physics Letters*, 67, 941-943 (1995).
- 41 A.G. Cullis, et al, *Applied Physics Reviews*, 82, 909-965 (1997)
- 42 V.V. Tregýlov, *Poristy kremni: tehnologiia, svoistva, primeneniie*, (Riazan, Riaz. gos. ýn-t im. S.A. Esenina, 2011), 124 s. (in Russ)
- 43 T.Iý. Belik, *Nanomaterialy i nanotekhnologii*, 4, 65-66 (2012).