

(Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Аннотация

Исследованы образцы пленок пористого кремния, полученные методом электрохимического травления. Изучена морфология с помощью сканирующей зондовой микроскопии NTegra Theta. Установлено, что на электрические свойства тонких пленок пористого кремния очень сильно влияют различные факторы, например, сила тока, проходящего через пленку. Вольтамперная характеристика пористого кремния имеет сильно нелинейную, хаотическую область в определенном интервале напряжения. Зависимость тока от напряжения, соответствующая многократному туннелированию электронов, может быть использована для создания генераторов хаоса с широкополосным спектром.

Ключевые слова: пористый кремний, тонкие пленки, нелинейные свойства, туннельный эффект, фрактал.

Кілт сөздер: кеукті кремний, жұқа қабыршақтар, бейсызық қасиеттер, туннельді эффект, фрактал.

Keywords: porous silicon, thin films, nonlinear properties, tunnel effect, fractal.

Несмотря на то, что пористый кремний (ПК) был открыт во второй половине 50-х годов прошлого века, на сегодняшний день остается одним из актуальных объектов исследования в нанотехнологии в связи с широкой областью его применения. В работах [1, 2] можно получить более подробную информацию о ПК. Сведения о формировании и применении ПК приведены в работах [3, 4]. Существует множество методов получения ПК [5–7], каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Известно, что оптические свойства ПК определяются толщиной, формами и размерами пор, а также пористостью пленки [8]. Электрические свойства поверхности наноразмерного ПК изучены менее детально. Работа [9] посвящена электрическим свойствам ПК, который был получен методом электрохимического травления в электролите HF и C₂H₂OH (1:1). Время травления составляло 15 минут и пленки ПК имели толщину порядка нескольких микрон. Целью нашей работы являлось изучение электрических свойств наноразмерных пленок ПК, которые были получены при длительности травления около 5 секунд.

Экспериментальные результаты. Тонкие пленки пористого кремния были получены методом электрохимического травления в электролите, содержащем этаноламин в соотношении HF:ЭЭ – 1:1,5 (рисунок 1). В качестве исходной подложки были использованы готовые *p/n* структуры, где концентрация *n*-слоя составляла $10^{18} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

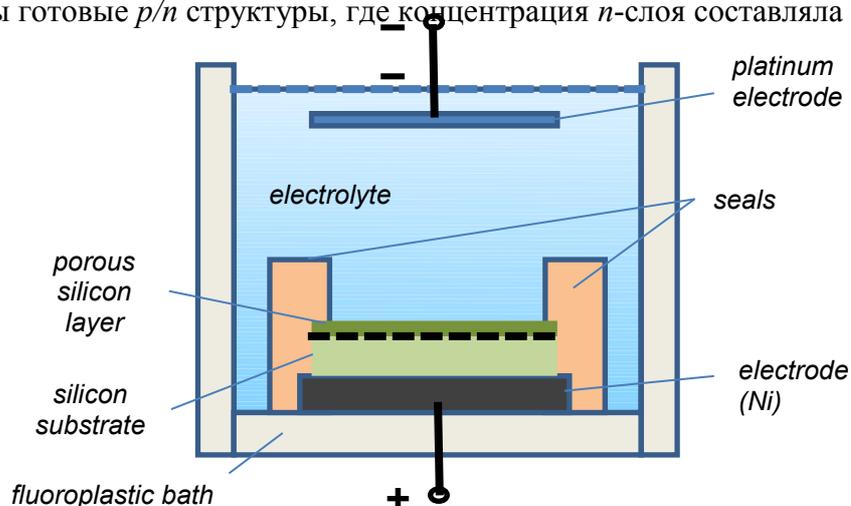
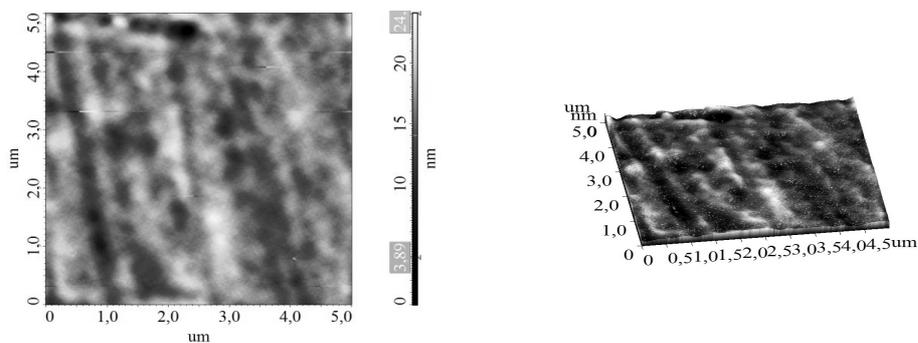


Рисунок 1 – Электролитическая ячейка для формирования слоев пористого кремния

Была исследована морфология пористой пленки с помощью сканирующей зондовой микро-скопии (СЗМ) NTegra Thermo.



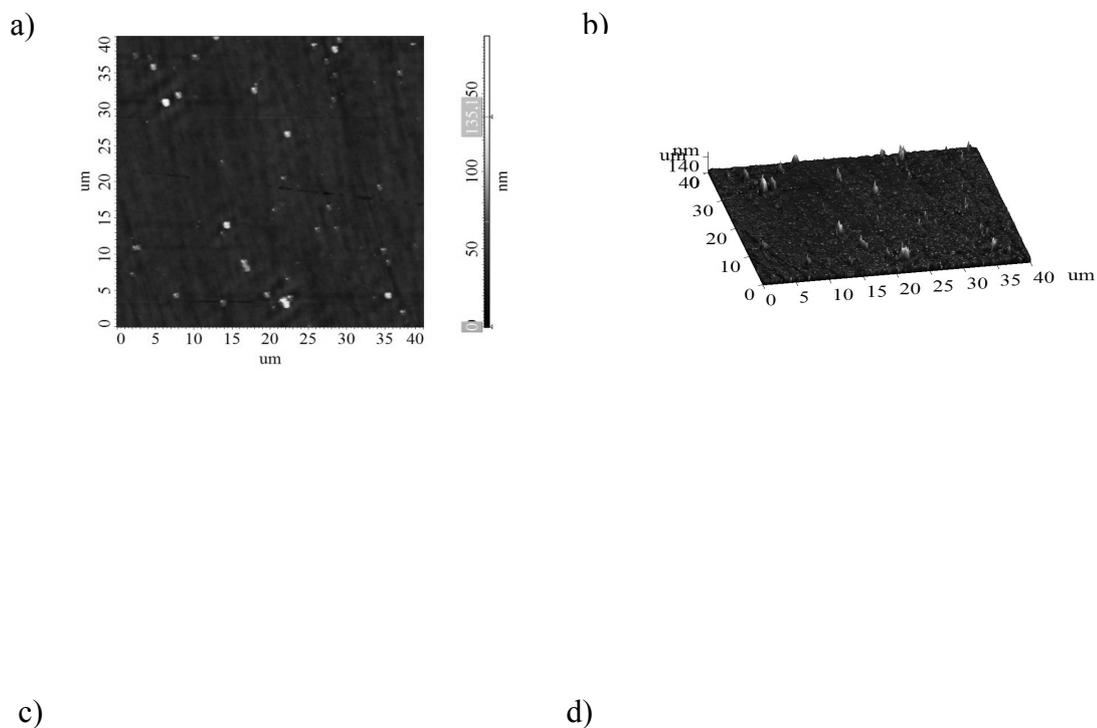


Рисунок 2 – Результаты сканирующей зондовой микроскопии: а) двумерное изображение пленки ПК,

разрешение 5:5 мкм; б) трехмерное изображение пленки ПК, разрешение 5:5 мкм; в) двумерное изображение пленки ПК, разрешение 40:40 мкм; г) трехмерное изображение пленки ПК, разрешение 40:40 мкм

Согласно результатам СЗМ наблюдается сильная неоднородность поверхности пленки ПК (рисунок 2). Также можно заметить, что на поверхности пленки присутствуют нитеобразные вы-ступы.

Для исследования электрических свойств пленки наносились контакты на поверхности ПК. Изучены закономерности протекания тока через неоднородную структуру поверхности ПК. На ри-сунке 3 показана вольтамперная характеристика ПК, при этом напряжение на тонкую пленку подавалось от -2В до 5В с шагом $0,1\text{В}$.

В вольтамперной характеристике тонкой пленки ПК имеется нелинейно меняющаяся область тока по напряжению в интервале от 2В до 4В . В районе напряжения 2В ток резко

падает на не-сколько единиц и до 4В наблюдается осциляция тока. Далее возрастает с ростом приложенного напряжения.

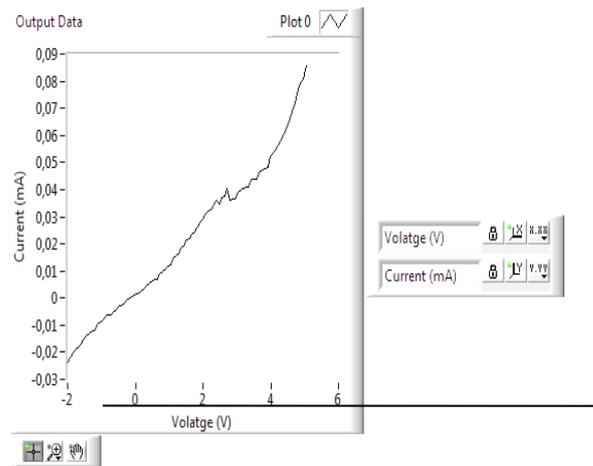


Рисунок 3 – Вольтамперная характеристика образца тонкой пленки пористого Si

Чтобы подробно исследовать нелинейную область, мы уменьшили интервал напряжения и получили в различных измерениях характеристики, показанные на рисунке 3.

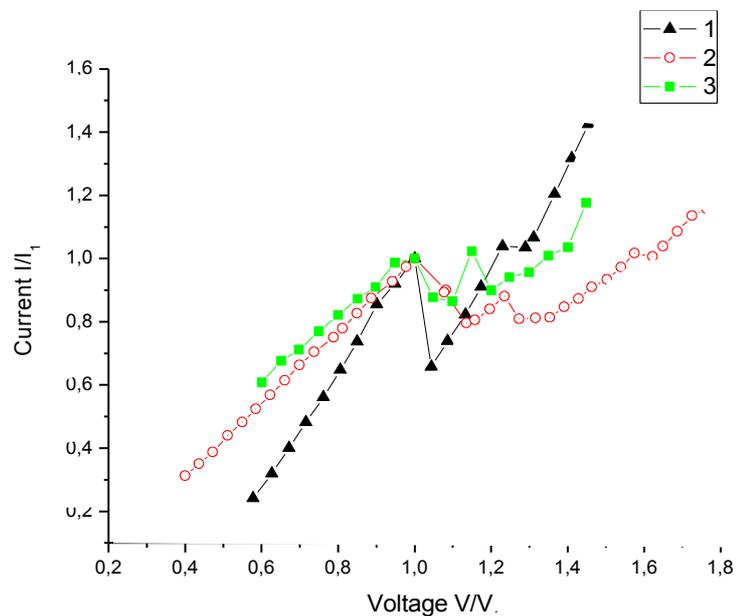


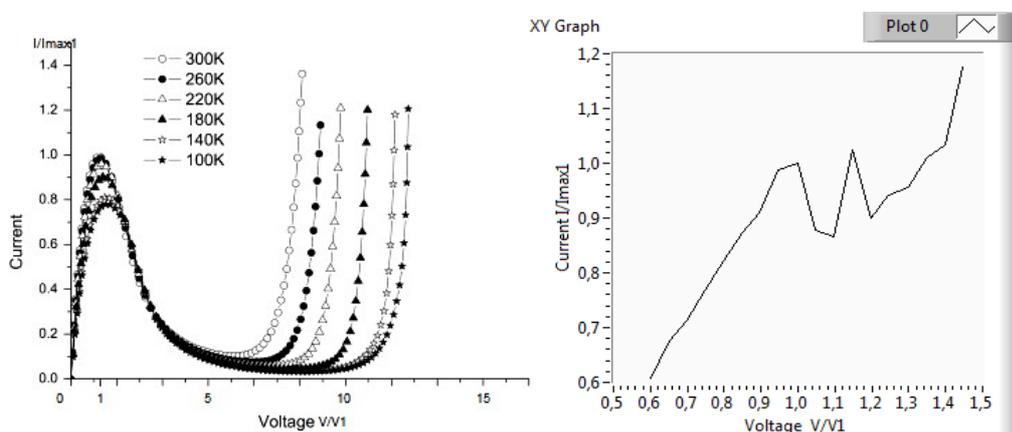
Рисунок 4 – Вольтамперные характеристики в относительных переменных.

I_1, V_1 – сила тока и напряжение, соответствующие первому пику.

V_1 : 1-1,706909V, 2-2,077985V, 3-1,515161V; I_1 : 1-13,765041mA, 2-6,266812mA, 3-0,029775mA

При повторении опытов (после прохождения тока значительной силы) в вольтамперных характеристиках уменьшается глубина минимума тока (рисунок 4).

Обсуждение результатов. Известно, что нелинейные элементы, у которых зависимость тока от напряжения имеет участок, где дифференциальное сопротивление (производная от напряжения по току) отрицательное, играют немаловажную роль в электронике и измерительной технике [10].



a)

b)

Рисунок 5 – Вольтамперные характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением:

a) N – типа туннельного диода [11], $I_1=1,0\text{mA}$, $V_1=0,06\text{V}$. b) для нанопленки ПК.
 $I_1=0,029775\text{mA}$, $V_1=1,515161\text{V}$

Вольтамперные характеристики нанопленок имеют осцилляционные пики (рисунок 5, б). Уменьшение силы тока с ростом напряжения означает существование структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Обычно этот эффект объясняется явлением туннелирования электронов через потенциальный барьер. В пленке пористого кремния имеются квантоворазмерные точечные, линейные, плоские структуры с различными потенциалами электрического поля. Из-за просачивания электронов через эти потенциальные барьеры, согласно соотношению неопределенностей, уменьшается число состояний, допускающих электрический ток. Это приведет к уменьшению силы тока и образованию пика в вольтамперной характеристике, хотя напряжение возрастает. С дальнейшим ростом напряжения образуются другие пики, обусловленные наличием структур с более высокими потенциальными барьерами.

Наряду с этим вольтамперные характеристики наноструктурированной пленки пористого кремния и обычных туннельных диодов имеют существенные различия (рисунок 5). Наши эксперименты показывают, что расстояние между пиками (в относительных единицах напряжения) на порядок меньше и пики более острые, имеют резонансный характер. Эти факты и рисунок 2 направляют на мысль о том, что нанопленки имеют фрактальное строение с иерархическими структурами различных геометрических масштабов. Соответствующие потенциалы электрического поля могут рассматриваться как нелинейные фрактальные меры [12–14].

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Cullis, AG., Canham, LT. & Calcott, PDJ. The structural and luminescence properties of porous silicon, *J App Phys*, **1997**, Vol 82, No 3, pp 909-965.
- 2 Canham, L, Editor, Properties of porous silicon, *INSPEC - The Institution of Electrical Engineers*, **1997**, United Kingdom.
- 3 Foll, H., Christophersen, M., Carstensen, J. & Hasse, G. Formation and application of porous silicon, *Materials Science and Engineering R*, **2002**, Vol. 39, pp. 93.
- 4 Parkhutik V. Porous silicon – mechanism of growth and applications. *Solid-state Electron*. **1999**, Vol.43, pp. 1121-1141.
- 5 Vasquez, RP., Fathauer, RW., George, T., Ksendzov, A. & Lin, TL. Electronic structure of light emitting porous Si, *Appl Phy Lett*, **1992**, Vol. 60, No. 8, pp. 1004-1006.
- 6 Beale, M. I. J., Benjamin, J. D., Uren, M. J., Chew, N. G. & Cullis, A. G. The formation of porous silicon by chemical stain etches, *J. Crys. Growth*, **1986**, Vol. 75, pp. 408.
- 7 Zubko, V.G., Smith, T.L. & Witt, A.N. Silicon Nanoparticles and Interstellar Extinction, *The Astrophysical Journal Letters*, **1999**, Vol. 511, pp. L57.
- 8 Andrea Edit Pap, Krisztian Kordas, Jouko Vahakangas, Antti Uusimaki, Seppo Leppavuori, Laurent Pilon, Sandor Szatmari. Optical properties of porous silicon. Part III: Comparison of experimental and theoretical results, *Optical Materials*, **2006**, Vol. 28, 506–513.
- 9 G. Algun, M.C. Arıkan, An Investigation of Electrical Properties of Porous Silicon, *Tr. J. of Physics*, **1999**, Vol. 23, 789 - 797.

10 MaoXiang Wang, , JianHua Yu1, ChengXiu Sun, Light emission characteristics and negative resistance phenomenon of Si-based metal/insulator/semiconductor tunnel junction. *Applied Surface Science*, **2000**, Vol. 161, Issues 1–2, 1, Pages 9–13.

11 S. Al-Harhi, A. Sellai, [Features of a tunnel diode oscillator at different temperatures](#), *Microelectronics Journal*, **2007**, Vol. 38, p817-822.

12 Zhanabaev Z. Zh. Fractal measures in nanoelectronics and neurodynamics. *Eurasian Physical Technical Journal*, **2012**, Vol. 9, No.1(17), P 3-13.

13 Z. Zh. Zhanabaev, T.Yu. Grevtseva, T.B. Danegulova, G.S. Asanov. Optical Properties in Nanostructured Semiconductor. *Journal of Computational and Teoretical Nanoscience*, **2013**, Vol. 10 (3), pp. 673-678.

14 Z. Zh. Zhanabaev, E.T.Kozhagulov. A generic model for scale-invariant neural networks. *Journal of Neuroscience and Neuroengineering*, **2013**, Vol. 2, No 2, pp. 1-5.

Резюме

З. Ж. Жанабаев, М. К. Ибраимов, Е. Сагидолда

(әл- Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы)

НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ КЕУЕКТІ КРЕМНИЙ ҚАБЫРШАҒЫНЫҢ

ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Электрхимиялық әдіспен алынған кеукті кремний қабыршақтары зерттелген. NTegra Thermo сканир-леуші зондық микроскобы арқылы үлгілердің морфологиясы алынды. Кремнийдің кеукті жұқа қабыршақ-тарына әртүрлі факторлар, мысалға, қабыршақ арқылы өтетін ток күшінің әсері бақыланды. Кернеудің белгілі бір аралығында кеукті кремнийдің вольт-амперлік сипаттамасы бейсызық хаосты болатыны көрсетілді. Токтың кернеуден тәуелділігі, яғни электрондардың көп реттік туннельденуі кеңжолақты спектрлі хаос генераторын жасауда қолданылуы мүмкін.

Кілт сөздер: кеукті кремний, жұқа қабыршақтар, бейсызық қасиеттер, туннельді эффект, фрактал.

Summary

Z. Zh. Zhanabaev, M. K. Ibraimov, E. Sagidolda

(al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan)

INVESTIGATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED POROUS SILICON FILMS

Samples of porous silicon films grown by electrochemical etching have been investigated. Morphology of the films has been studied by use of scanning probe microscope NTegra Thermo. We established that electrical properties of thin films of porous silicon are strongly influenced by various factors such as the strength of passing current through a film, etc. Current-voltage characteristic of the porous silicon has a strong non-linear and chaotic region in a certain range of voltage. Dependence of current on voltage corresponding to multiple electron tunneling can be used for development of generators of chaos with a broadband spectrum.

Keywords: porous silicon, thin films, nonlinear properties, tunnel effect, fractal.

Поступила 5.07.2013г.