Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 538.956

Оригинальная статья

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В СЛОЯХ POR - Si В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ЧАСТОТ

Ю.М. Спивак¹, Р.А. Кастро², М.П. Севрюгина³, М.А. Кузнецова¹, В.А. Мошников¹

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

²ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена»

191186, Россия, Санкт-Петербург, Набережная реки Мойки 48

³АО «Адмиралтейские верфи»

190121, Россия, Санкт-Петербург, наб. р. Фонтанки, 203

utkanageeva@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.170

Аннотация. Методом электрохимического анодного травления получен макропористый кремний с высокоомным мезопористым наноструктурированным «скин»-слоем на поверхности. Измерения частотных зависимостей диэлектрических коэффициентов полученных слоев пористого Si выполнены в частотном интервале $5 \cdot 10^{-3} < f < 10^6$ Гц при температуре 295 К и приложенном напряжении 1 В. Выявлен максимум тангенса угла диэлектрических потерь, который, наиболее вероятно, обусловлен преобладанием дипольно-релаксационного механизма поляризации. Обнаружено распределение релаксаторов по временам релаксации, предложена интерпретация полученных результатов с точки зрения строения пористого слоя.

Ключевые слова: пористый кремний, наноструктурированный слой, импеданс, интерфейс, диэлектрическая релаксация, низкочастотная диэлектрическая спектроскопия, ионно-электронной микроскопия.

1. Введение

Одним из перспективных методов получения наноструктурированных материалов является электрохимическое анодное растворение [1, 2]. К настоящему времени этим методом синтезированы многие материалы (пористые полупроводниковые материалы, оксиды металлов), в том числе и такой известный и востребованный материал как пористый кремний (*por-Si*) [2-8]. В результате электрохимического анодного растворения монокристаллического кремния в нем формируется система пор, а сам материал становится гетерофазным. В зависимости от технологических условий получения и характеристик исходного Si в *por-Si* может содержаться наноразмерный Si (кремниевый остов и/или вторично выделившийся кремний), SiO_2 и SiO_x , на интерфейсах и поверхности могут находиться различные по составу функциональные группы, адсорбированные поверхностью из электролита или окружающей среды [9, 10]. Для исследования состава такого сложного гетерофазного наноматериала, а также релаксационных процессов на его поверхности, эффективными являются методы оптической и низкочастотной

диэлектрической спектроскопии.

Конструктивно установка для измерений методом диэлектрической спектроскопии существенно усложняется при переходе в область низких частот. Тем не менее, именно эта область частот является наиболее интересной, т. к. большинство релаксационных процессов проявляют себя в этом диапазоне частот. Исследования такого рода могут быть осуществлены с применением спектрометра Concept-81 фирмы Novocontrol Technologies [11-12]. Установка состоит из частотного анализатора импеданса, измерительной ячейки, системы автоматического сбора данных с компьютерным интерфейсом, и позволяет проводить анализ диэлектрических и электропроводящих свойств материалов в диапазоне частот от 10^{-6} Гц до 10^9 Гц и температур от 173 К до 523 К.

При таких метрологических возможностях можно выявить особенности поляризационных процессов в широком классе материалов, например ионной проводимости и др. В связи с этим, целью данной работы являлось исследование процессов диэлектрической релаксации в слоях *por-Si* методом низкочастотной диэлектрической спектроскопии.

2. Методика исследований

В данной работе слои *por-Si* формировали в монокристаллическом кремнии марки КДБ-12(100) методом электрохимического анодного травления [9, 13]. В качестве электролита был использован водный раствор плавиковой кислоты с добавлением изопропанола. Травление осуществлялось при плотности анодного тока 30 мА/см^2 в течение 10 мин. Условия получения пористого кремния были выбраны таким образом, чтобы происходило формирование так называемого поверхностного слоя (так называемого «скин»-слоя), который, как правило, является гетерофазным [2, 14].

Исследования текстуры пористого слоя проводились с помощью с помощью ионно-электронной микроскопии (Helios Nanolab D449 (FEI Company) [15-17].

3. Морфология поверхности и текстура пористого кремния

Как видно из рис. 1 а, б при выбранных технологических условиях формируется макропористый кремний, поверхность которого частично закрыта поверхностным слоем. Толщина слоя *por-Si* составила 7,8–8,9 мкм. Диаметр пор составляет $\approx 2,2\text{--}2,7$ мкм. Текстура пористого слоя может быть охарактеризована следующим образом: поры колоннообразные, ориентированные в кристаллографическом направлении $\langle 100 \rangle$, форма дна пор несильно изогнутая, согласно классификации морфологии пористого кремния, приведенной в [18].

Рис. 1. Типичный вид скола слоя *por-Si* при увеличении а – $\times 5000$, б – $\times 15000$, в – вид поверхностного слоя при увеличении $\times 100000$.

Поверхностный слой (см. рис. 1 в) характеризуется толщиной 1,4–1,8 мкм. Этот слой является также пористым (мезопористым), диаметр пор составляет $\approx 37-40$ нм. Слой, по-видимому, механически напряженный, частично растрескавшийся по поверхности всего образца. Из-за интенсивного накопления отрицательного заряда на глубину пробега первичных электронов, то есть ухудшения условий выхода вторичных электронов (по сути, образуется барьерное электрическое поле), возникает изменение контраста изображения – «засветка», «заряд» отдельных участков поверхности. Наличие таких эффектов на изображениях ионно-электронной микроскопии позволило сделать вывод о высокоомности поверхностного слоя. Очевидно, формирование этого слоя происходило в процессе электрохимического анодного растворения *Si* и связано с выносом продуктов реакции на поверхность. Из литературных данных известно [5, 9, 10, 14, 19, 20], такой слой может состоять из смеси SiO_2 , SiO_x , аморфизированного кремния, фторсодержащих соединений и др. Причем, при формировании макропористого кремния происходит растворение значительного объема монокристаллического *Si*, а время технологического процесса в данном эксперименте невысоко – 10 мин., так что растворение этого слоя в электролите еще незначительно.

4. Результаты низкочастотной диэлектрической спектроскопии пористого кремния

Измерения частотных зависимостей диэлектрических коэффициентов слоев *por-Si* были выполнены с применением спектрометра Concept-81 в частотном интервале $5 \cdot 10^{-3} < f < 10^6$ Гц при температуре 295 К и приложенном напряжении 1 В.

На рис. 2 представлена частотная зависимость емкости $C(f)$ структуры со слоем пористого кремния. В области низких частот в интервале $5 \cdot 10^{-3} < f < 20$ Гц наблюдается монотонное уменьшение электрической емкости C , свидетельствующее о проявлении релаксационной поляризации.

Рис. 2. Частотная зависимость емкости C для *por-Si*.

В интервале частот $20 < f < 2 \cdot 10^3$ Гц емкость резко уменьшается с ростом частоты примерно на 50% в исследуемом интервале. Начиная со значения $f = 3 \cdot 10^3$ Гц и выше, емкость становится практически не зависящей от частоты переменного поля, что связано с упорядочением дипольных молекул в направлении электрического поля. Аналогичная зависимость емкости от частоты получена в работе [14] для структуры со слоем пористого кремния. Диэлектрический спектр включает в себя две дисперсионные области: основную и низкочастотную с особенностями, характерными для диэлектриков с релаксационным механизмом поляризации, и различными по значению частотными коэффициентами диэлектрической проницаемости K [13]:

$$K = \frac{\lg(\gamma C_1) - \lg(\gamma C_2)}{\lg f_2 - \lg f_1},$$

где γ – коэффициент, равный $\gamma = d/(\varepsilon_0 S)$ (d – толщина слоя, равная 10 мкм, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, S – площадь контакта), C_1 и

C_2 – значения емкости, определенные на частотах f_1 и f_2 . Параметры K , полученные для начальной и конечной областей релаксации, составили 0,04 и 0,12 соответственно.

Как видно из рис. 3, частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta(f)$ имеет выраженный максимум при частоте $f = 3 \cdot 10^2$ Гц. Такой вид зависимости характерен для дипольного механизма поляризации, когда увеличение значений $tg\delta$ происходит до тех пор, пока время релаксации дипольных молекул не достигнет значения $\tau = 1/2f$, затем наблюдается спад $tg\delta(f)$. Дисперсия $tg\delta$ на начальном участке исследуемого интервала частот связана с наличием потерь на сквозную проводимость.

Рис. 3. Частотная зависимость $tg\delta$ образцов слоев $por-Si$.

На рис. 4 представлена диаграмма Коула-Коула для исследуемой системы со слоем пористого кремния $por-Si$, которая представляет собой полуокружность с центром, лежащим ниже оси абсцисс. Данный вид диаграммы $\varepsilon'' = f(\varepsilon')$ свидетельствует о существовании распределения релаксаторов по временам релаксации и отличии полученных диэлектрических спектров от дебаевских, что является характерными для гетерогенных структур. Данное распределение может быть связано с проявлением различных по природе релаксационных процессов, или с распределением по концентрации диполей в структуре. В данном случае, наличие различных релаксационных процессов, может быть обусловлено гетерофазностью материала, существованием поверхностного высокоомного слоя. Как отмечалось ранее, этот слой содержит продукты реакции анодного растворения Si , разного рода примеси и др. Аппроксимация зависимости $tg\delta(f)$ в рамках приближения Гавриляк-Негами [21] позволила оценить значение наиболее вероятного времени

релаксации для случая симметричного распределения релаксаторов (модель Коула-Коула), которое оказалось равным $\tau_{HB} = 8,15 \cdot 10^{-3}$ с.

Рис. 4. Диаграмма Коула-Коула образцов слоев *por-Si*.

5. Заключение

Таким образом, в настоящей работе приведены результаты исследования структурных и диэлектрических свойств систем со слоями *por-Si*, полученными методом электрохимического анодного травления монокристаллического кремния.

Сложный характер частотной зависимости емкости и существование максимума тангенса угла диэлектрических потерь, скорее всего, обусловлены преобладанием дипольно-релаксационного механизма поляризации. Обнаруженное распределение релаксаторов по временам релаксации в исследуемой системе, может быть обусловлено сложностью структуры, особенностями поверхностного высокоомного слоя пористого кремния.

Библиографический список:

1. Nanostructured materials in electrochemistry / ed. by A. Eftekhari. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. – XXV, 463 p.
2. **Мошников, В.А.** Электрохимические методы получения пористых материалов для топливных элементов / В.А. Мошников, Ю.М. Спивак // В книге «Основы водородной энергетики»; под ред. В.А. Мошникова, Е.И. Терукова. – 1-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – Гл. 5. – С. 103-140.
3. Handbook of porous silicon / ed. by L. Canham. – Zug, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer International Publishing, 2014. – XVIII, 1017 p. DOI: 10.1007/978-3-319-05744-6.
4. **Белов, А.Н.** Процессы формирования наноструктур на основе пористых анодных оксидов металлов: дис. д-ра тех. наук: 05.27.06: защищена 29.03.2012 / Белов Алексей Николаевич. – М., Зеленоград: Национальный исследовательский университет

«МИЭТ», 2012. – 277 с.

5. **Moshnikov, V.A.** Porous silicon with embedded metal oxides for gas sensing applications / V.A. Moshnikov, I. E. Gracheva, A. S. Lenshin, et. al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2012. – V. 358. – I. 3. – P. 590-595. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.017.

6. **Korotcenkov, G.** Silicon porosification: state of the art / G. Korotcenkov, B. K. Cho // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2010. – V. 35. – I. 3. – P. 153-260. DOI: 10.1080/10408436.2010.495446.

7. **Lenshin, A.S.** Investigations of nanoreactors on the basis of p-type porous silicon: Electron structure and phase composition / A.S. Lenshin, V.M. Kashkarov, Yu.M. Spivak, V.A. Moshnikov // Materials Chemistry and Physics. – 2012. – V. 135. – I. 2-3. – P. 293-297. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2012.03.095.

8. **Акципетров, О.А.** Анизотропные фотонные кристаллы и микрорезонаторы на основе мезопористого кремния / О.А. Акципетров, Т.В. Долгова, И.В. Соболева, А.А. Федянин // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – Вып. 1. – С. 150-152.

9. **Леньшин, А.С.** Исследование электронного строения и фазового состава пористого кремния / А.С. Леньшин, В.М. Кашкаров, Ю.М. Спивак, В.А. Мошников // Физика и химия стекла. – 2012 – Т. 38. – Вып. 3. – С. 383-392.

10. **Леньшин, А.С.** Исследование электронного строения и химического состава пористого кремния, полученного на подложках *n*– и *p*–типа, методами XANES и ИК спектроскопии / А.С. Леньшин, В.М. Кашкаров, П.В. Середин, Ю.М. Спивак, В.А. Мошников // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – Вып. 9. – С. 1229-1234.

11. **Castro, R.A.** / Dispersion of dielectric parameters in modified arsenic triselenide layers / R.A. Castro, V.A. Bordovskii, G.I. Grabko // Technical Physics. – 2010. – V. 36. – I. 9. – P. 783-785. DOI: 10.1134/S1063785010090026.

12. **Castro, R.A.** Temperature dependence of the dielectric parameters of thin arsenic triselenide layers with high bismuth content / R.A. Castro, V.A. Bordovskii, G.I. Grabko // Technical Physics Letters. – 2010. – V. 36. – I. 10. – P. 966-968. DOI: 10.1134/S1063785010100275.

13. Пат. 122385 Российская Федерация, МПК C25D11/00 (2006.01), C25D19/00 (2006.01). Электрохимическая ячейка для получения пористых анодных оксидов металлов и полупроводников / П.Г. Травкин, Е.Н. Соколова, Ю.М. Спивак, В.А. Мошников; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – № 2012122692/02; заявл. 01.06.12, опубл. 27.11.12, Бюл. № 33. – 2 с.

14. **Зимин, С.П.** Электрофизика пористого кремния и структур на его основе: дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.10: защищена 06.11.2003 / Зимин Сергей Павлович. – Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2003. – 305 с.

15. **Канагеева, Ю.М.** Изучение структурно-морфологических особенностей макропористого кремния при препарировании образцов остросфокусированным ионным пучком / Ю.М. Канагеева, А.Ю. Савенко, В.В. Лучинин, В.А. Мошников, С.П. Зимин, Э.Ю. Бучин // Петербургский журнал электроники. – 2007. – № 1. – С. 30-34.

16. **Леньшин, А.С.** Исследования морфологических особенностей роста и оптических характеристик многослойных образцов пористого кремния, выращенных на подложках *n*–типа с эпитаксиально нанесенным p^+ –слоем / А.С. Леньшин, В.М. Кашкаров,

- П.В. Середин и др. // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – Вып. 8. – С. 1101-1107.
17. **Кузнецова, М.А.** Физико-технологические основы применения наноразмерной ионно-лучевой технологии при создании изделий микро- и наносистемной техники / М.А. Кузнецова, В.В. Лучинин, А.Ю. Савенко // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 8 (109). – С. 24-32.
18. **Zhang, X.G.** Morphology and formation mechanism of porous silicon / X.G. Zhang // In book: Modern Aspects of Electrochemistry. Modern Aspects of Electrochemistry. – V 39; ed. by C. Vayenas, R.E. White, M.E. Gamboa-Adelco. – Boston, MA: Springer, 2006. – P. 65-133. DOI: 10.1007/978-0-387-31701-4_2.
19. **Зимин, С.П.** Емкость структур с толстым слоем пористого кремния / С.П. Зимин, Е.П. Комаров // Письма в журнал технической физики. – 1996. – Т. 22. – Вып. 19. – С. 69-73.
20. **Зимин, С.П.** Прыжковая проводимость в мезопористом кремнии с малой пористостью, сформированном $p^+ - Si(B)$ / С.П. Зимин // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. – Вып. 11. – С. 1385-1387.
21. Broadband dielectric spectroscopy / ed. by F. Kremer, A. Schönhals. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. – XXI, 729 p. DOI: 10.1007/978-3-642-56120-7.

References:

1. Nanostructured materials in electrochemistry / ed. by A. Eftekhari. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. – XXV, 463 p.
2. **Moshnikov, V.A.** Ehlektrokhimicheskie metody polucheniya poristyykh materialov dlya toplivnykh ehlementov [Electrochemical methods of obtaining porous materials for fuel cells] / V.A. Moshnikov, YU.M. Spivak // V knige «Osnovy vodorodnoi ehnergetiki»; pod red. V.A. Moshnikova, E.I. Terukova. – 2-e izd. SPb.: Izd-vo SPBGEHTU «LEHTI», 2011. – Ch. 5. – P. 103-140. (In Russian).
3. Handbook of porous silicon / ed. by L. Canham. – Zug, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer International Publishing, 2014. – XVIII, 1017 p. DOI: 10.1007/978-3-319-05744-6.
4. **Belov, A.N.** Protsessy formirovaniya nanostruktur na osnove poristyykh anodnykh oksidov metallov [Formation processes of nanostructures based on porous anodic metal oxides]: dis. d-ra tekhn. nauk: 05.27.06: zashchishchena 29.03.2012 / Belov Aleksei Nikolaevich. – M., Zelenograd: Natsional'nyi issledovatel'skii universitet «MIEHT», 2012. – 277 p. (In Russian).
5. **Moshnikov, V.A.** Porous silicon with embedded metal oxides for gas sensing applications / V.A. Moshnikov, I. E. Gracheva, A. S. Lenshin, et. al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2012. – V. 358. – I. 3. – P. 590-595. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.017.
6. **Korotcenkov, G.** Silicon porosification: state of the art / G. Korotcenkov, B. K. Cho // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2010. – V. 35. – I. 3. – P. 153-260. DOI: 10.1080/10408436.2010.495446.
7. **Lenshin, A.S.** Investigations of nanoreactors on the basis of p-type porous silicon: Electron structure and phase composition / A.S. Lenshin, V.M. Kashkarov, Yu.M. Spivak, V.A. Moshnikov // Materials Chemistry and Physics. – 2012. – V. 135. – I. 2-3. – P. 293-297. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2012.03.095.
8. **Aktsipetrov, O.A.** Anisotropic photonic crystals and microcavities based on mesoporous silicon / O.A. Aktsipetrov, T.V. Dolgova, I.V. Soboleva, A.A. Fedyanin // Physics of the Solid State. – 2005. – V. 47. – I. 1. – P. 156-158. DOI: 10.1134/1.1853468.

9. Len'shin, A.S. Study of electronic structure and phase composition of porous silicon / A.S. Len'shin, V.M. Kashkarov, Y.M. Spivak, V.A. Moshnikov // *Glass Physics and Chemistry*. – 2012. – V. 38. – I. 3. – P. 315-321. DOI: 10.1134/S1087659612030091.
10. **Lenshin, A.S.** XANES AND IR spectroscopy study of the electronic structure and chemical composition of porous silicon on *n*- and *p*-type substrates / A.S. Lenshin, V.M. Kashkarov, P.V. Seredin, Y.M. Spivak, V.A. Moshnikov // *Semiconductors*. – 2011. – V. 45. – I. 9. – P. 1183-1188. DOI: 10.1134/S1063782611090168.
11. **Castro, R.A.** / Dispersion of dielectric parameters in modified arsenic triselenide layers / R.A. Castro, V.A. Bordovskii, G.I. Grabko // *Technical Physics*. – 2010. – V. 36. – I. 9. – P. 783-785. DOI: 10.1134/S1063785010090026.
12. **Castro, R.A.** Temperature dependence of the dielectric parameters of thin arsenic triselenide layers with high bismuth content / R.A. Castro, V.A. Bordovskii, G.I. Grabko // *Technical Physics Letters*. – 2010. – V. 36. – I. 10. – P. 966-968. DOI: 10.1134/S1063785010100275.
13. **Pat. 122385 Russian Federation, IPC C25D11/00 (2006.01), C25D19/00 (2006.01).** Ehlektrokhimicheskaya yacheika dlya polucheniya poristyykh anodnykh oksidov metallov i poluprovodnikov [Electrochemical cell for the production of porous anodic oxides of metals and semiconductors] / P.G. Travkin, E. N. Sokolova, YU. M. Spivak, V. A. Moshnikov; zayavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Sankt-Peterburgskii Gosudarstvennyi ehlektrotekhnicheskii universitet «LEHTI» im. V.I. Ul'yanova (Lenina). – № 2012122692/02; zayavl. 01.06.12, opubl. 27.11.12, Byul. № 33. – 2 p. (In Russian).
14. **Zimin, S.P.** Ehlektrofizika poristogo kremniya i struktur na ego osnove [Electrophysics of porous silicon and structures based on it]: dis. d-ra fiz.-mat. nauk: 01.04.10: zashchishchena 06.11.2003 / Zimin Sergei Pavlovich. – Yaroslavl': Yaroslavskii gosudarstvennyi universitet im. P.G. Demidova, 2003. – 305 p. (In Russian).
15. **Kanageeva, Yu.M.** Izuchenie strukturno-morfologicheskikh osobennostei makroporistogo kremniya pri preparirovanii obraztsov ostrosfokusirovannym ionnym puchkom [Study of the structural and morphological features of macroporous silicon during sample preparation with a sharply focused ion beam] / Yu.M. Kanageeva, A.Yu. Savenko, V.V. Luchinin, V.A. Moshnikov, S.P. Zimin, Eh.Yu. Buchin // *Peterburgskii zhurnal ehlektroniki*. – 2007. – № 1. – P. 30-34. (In Russian).
16. **Lenshin, A.S.** Study of the morphological growth features and optical characteristics of multilayer porous silicon samples grown on *n*-type substrates with an epitaxially deposited *p*⁺-layer / A.S. Lenshin, V.M. Kashkarov, P.V. Seredin, et al. // *Semiconductors*. – 2012. – V. 46. – I. 8. – P. 1079-1084. DOI: 10.1134/S1063782612080131.
17. **Kuznetsova, M.A.** Fiziko-tehnologicheskie osnovy primeneniya nanorazmernoi ionno-luchevoi tekhnologii pri sozdanii izdelii mikro- i nanosistemnoi tekhniki [Physico-technological foundations of the application of nanoscale ion-beam technology in the creation of products for micro- and nanosystem technology] / M.A. Kuznetsova, V.V. Luchinin, A.YU. Savenko // *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. – 2009. – № 8 (109). – P. 24-32.
18. **Zhang, X.G.** Morphology and formation mechanism of porous silicon / X.G. Zhang // In book: *Modern Aspects of Electrochemistry*. Modern Aspects of Electrochemistry. – V 39; ed. by C. Vayenas, R.E. White, M.E. Gamboa-Adelco. – Boston, MA: Springer, 2006. – P. 65-133. DOI: 10.1007/978-0-387-31701-4_2.
19. **Zimin, S.P.** Emkost' struktur s tolstym sloem poristogo kremniya [Capacity of structures with a thick layer of porous silicon] / S.P. Zimin, E.P. Komarov // *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. – 1996. – V. 22. – I. 19. – P. 69-73. (In Russian).

20. **Zimin, S.P.** Hopping conductivity in low-porosity mesoporous silicon formed on $p^+ - Si\langle B \rangle$ / S.P. Zimin // Semiconductors. – 2006. – V. 40. – I. 11. – P. 1350-1352. DOI: 10.1134/S1063782606110170.

21. Broadband dielectric spectroscopy / ed. by F. Kremer, A. Schönhalz. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. – XXI, 729 p. DOI: 10.1007/978-3-642-56120-7.

Original paper

DIELECTRIC RELAXATION IN POR-SI LAYERS AT LOW FREQUENCIES

Yu.M. Spivak¹, R.A. Castro², M.P. Sevryugina³, M.A. Kuznetsova¹, V.A. Moshnikov¹

¹*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia*

²*Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia*

³*JSC «Admiralty Shipyards», Saint Petersburg, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.170

Abstract: Macroporous silicon with a mesoporous nanostructured surface layer on its top was obtained by a method of electrochemical anodic etching. The frequency dependences of the dielectric coefficients for porous *Si* layers were measured in the frequency range $5 \cdot 10^{-3} < f < 10^6$ Hz at a temperature of 295 K and an applied voltage of 1 V. A maximum of the dielectric loss tangent is revealed, which is most likely due to the predominance of the dipole relaxation mechanism of polarization. The distribution of relaxers over relaxation times has been. An interpretation of the results obtained from the point of view of the structure of the porous layer is proposed.

Keywords: porous silicon, nanostructured layer, impedance, interface, dielectric relaxation, low-frequency dielectric spectroscopy, ion-electron microscopy.

Спивак Юлия Михайловна – к.ф.-м.н., докторант, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Кастро Арата Рене Алехандро – д.ф.-м.н., профессор кафедры физической электроники, ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

Севрюгина Мария Павловна – инженер по патентной и изобретательской работе I категории инновационного отдела АО «Адмиралтейские верфи»

Кузнецова Мария Александровна – к.т.н., инженер инжинирингового центра ЦМИД ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Мошников Вячеслав Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Yulia M. Spivak – Ph. D., Docent, Docent of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Rene A. Castro – Dr. Sc., Professor, Department of Physical Electronics, Herzen State Pedagogical University of Russia

Mariya P. Sevryugina – Patent and Invention Engineer (1st Category) of the Innovation Department, JSC «Admiralty Shipyards»

Maria A. Kuznetsova – Ph. D., Engineer, Engineering Center CMID, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Vjacheslav A. Moshnikov – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Поступила в редакцию/received: 12.09.2020; после рецензирования/revised: 5.10.2020; принята/accepted 16.10.2020.