

УДК 621.9.048.7

*Краткое сообщение*

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ ФОТО-ЭДС МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

Р.Р. Нагаплежева, М.М. Оракова, М.Ю. Кушхова, Ф.М. Цеева, Х.А. Мишаев  
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет  
им. Х.М. Бербекова»  
360004, Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 173  
nruzanna16@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.671

**Аннотация:** Плазменные технологии в последней четверти XX века совершили настоящую научно-технологическую революцию в микроэлектронике. Придя в мир технологии микроэлектроники в качестве необходимой альтернативы жидкостному травлению, исчерпавшему к тому времени свой ресурс, плазменные или «сухие» технологии стали основным инструментом создания элементов изделий электронной техники. XXI век, несомненно, начался и протекает под знаком совершенствования таких технологий в твердотельной электронике. Плазменные технологии включают совокупность методов нанесения тонких и сверхтонких слоев на подложку полупроводника, а также комплекс методов размерного травления таких слоев с заданными параметрами травления. Если рассматривать методики размерного травления с использованием сухих технологий, то всегда следует учитывать, что весь спектр таких методов широк. Одни способы, такие как радикальное и плазмохимическое травление, подразумевают мягкое, чисто химическое взаимодействие плазменной среды с материалом подложки, результатом чего является образование летучего продукта травления и его удаление (откачка) из плазменного объема. Другая группа «сухих» методик включает способы чисто физического воздействия высокоэнергетических частиц плазмы на поверхность материала и удаление атомов с поверхности только в результате распыления материала. Методом поверхностной фото-ЭДС исследована реальная поверхность монокристаллического кремния *p*-типа в интервале температур  $T=289-473$  К до и после плазменной обработки. Обнаружено существенное различие спектров поверхностных электронных состояний, полученных при нагревании и охлаждении образцов. Нагрев приводит к десорбции газов и диссоциации молекул воды в поверхностном слое, что уменьшает поверхностный потенциал на порядок.

*Ключевые слова:* плазма, фото-ЭДС, плазменная обработка поверхности, кремний, поверхностные электронные состояния.

### **1. Введение**

Современная промышленность предъявляет к материалам и изделиям ряд требований, часто несочетающихся друг с другом. Многие требования относятся к поверхности материала, из которого изготовлено изделие. Таким образом, именно свойства поверхностного слоя имеют важное значение и, в конечном итоге, от них зависят и характеристики изделия в целом.

Изменение химического состава или структуры поверхности твердого тела называется модификацией поверхности и реализуется путем

воздействия потока энергии, переносимой лучом лазера, мощным импульсным пучком заряженных частиц, плазмой или пучком ускоренных ионов, внедренных в приповерхностный слой вещества. Плазменные технологии в настоящее время широко используются для очистки и модификации различных поверхностей: изменяя только поверхностные свойства, они не затрагивают структуру материала [1, 2].

Для производства транзисторов диапазона сверхвысоких частот наиболее широко применяется кремний. Технологии кремния имеют множество применений в полупроводниковой технике, оптоэлектронике, химических, биологических сенсорах и других областях науки [3-7]. Опыт производства показывает, что на параметры транзисторов основное влияние оказывают длина затвора транзистора, свойства исходного полупроводника и паразитные сопротивления в цепях истока и затвора. Таким образом, актуален вопрос о качестве полупроводникового материала. Тем более, что с течением времени возрастает сложность и, как следствие, стоимость используемых структур, сочетающих в себе различные по электрофизическим свойствам слои толщиной до нескольких нанометров. Не менее важным фактором является разработка и использование технологии, минимально снижающей качество исходного полупроводника.

Процессы, происходящие в низкотемпературной плазме, используются для очистки поверхности подложек, травления рабочих слоев, удаления резиста и т.д. Применение плазменных технологий позволяет увеличить разрешающую способность, повысить производительность труда, дает возможность автоматизировать производство микросхем и перейти от жидкостных технологий к методам сухой вакуумной литографии. Хотя физические явления, происходящие в плазме и на поверхности подложек, до конца не исследованы, они весьма перспективны для изготовления различных изделий.

В работах [3, 8] были проведены исследования фото-ЭДС. Поверхностная обработка пластин кремния в различных условиях приводит к широкому изменению оптических и электрических свойств его поверхности. Изменения электрических и люминесцентных свойств кремния при адсорбции газов хорошо известны [9].

Локализованные электронные состояния играют определяющую роль в большом круге электронных явлений, происходящих на поверхности полупроводника. Наиболее важным с практической точки зрения, является случай поверхностных электронных состояний (ПЭС) на границе раздела диэлектрик – полупроводник. В связи с этим были проведены исследования методом поверхностной фото-ЭДС реальной

поверхности монокристаллического кремния *p*-типа при температурах  $T = 289\text{--}473\text{ К}$  до и после плазменной обработки.

## **2. Методика исследования и обсуждение результатов**

В работе исследовались образцы высокоомного кремния *p*-типа. Кристалл вырезался по направлению (111), размеры образца после стандартной обработки (шлифовка, полировка) составляли  $20 \times 5\text{ мм}$  [10, 11]. Затем образцы подвергались плазменной обработке. Плазменная обработка образцов проводилась на установке, созданной в КБГУ. Реактор установки изготовлен из стеклянного колпака, в котором размещаются обрабатываемые образцы. Вакуумная система предназначена для поддержания необходимого давления в камере во время процесса, которое составляет  $10^{-4}\text{ мм рт. ст.}$  и состоит из механического насоса. Вакуум в системе контролируется датчиком давления ПМТ-2. Система поддержания плазмы состоит из высоковольтного источника питания БЛ БНВЗ–09 № 216 и электродов, расположенных непосредственно в рабочей камере.

Во всех экспериментах значения давления внутри камеры *P* и расстояние между электродами *d* оставались неизменными:  $P = 10^{-4}\text{ мм рт. ст.}$ ,  $d = 10\text{ см.}$  Длительность обработки во всех экспериментах составляла 10 с, а напряжение на электродах менялось:  $U = 1,4\text{--}1,6\text{ кВ}$  с шагом 0,1 кВ. Далее методом поверхностной фото-ЭДС исследовали поверхность образца в интервале температур от 289 до 473 К, до и после плазменной обработки на установке, схема которой приведена в [11].

Исследуемый образец помещался в колодку с омическими контактами, в качестве омических контактов использовался сплав *In* с *Ga* в процентном соотношении 83,3:16,7. Образец освещался белым светом от источника (температура излучения  $1000 \pm 80^\circ\text{C}$ ). Сигнал с образца подавался на осциллограф. Параллельно к образцу подключалось нагрузочное сопротивление  $R = 10^4\text{ Ом.}$  По результатам исследований были построены зависимости поверхностного потенциала от температуры до и после плазменной обработки, показанные на рис. 1.

На рис. 1 представлены температурные зависимости поверхностного потенциала при облучении образца белым светом до плазменной обработки. Полученные зависимости свидетельствуют о том, что при повышении температуры поверхностный потенциал уменьшается по экспоненциальному закону. Причем нагрев образца до 413 К приводит к уменьшению поверхностного потенциала примерно в 10 раз. Дальнейшее нагревание до 473 К не вызывает существенного уменьшения поверхностного потенциала. С целью проверки воспроизводимости

результатов измерений поверхностного потенциала были проведены эксперименты при понижении температуры от 473 К до комнатной. Оказалось, что значения поверхностного потенциала при понижении температуры лежат гораздо ниже.

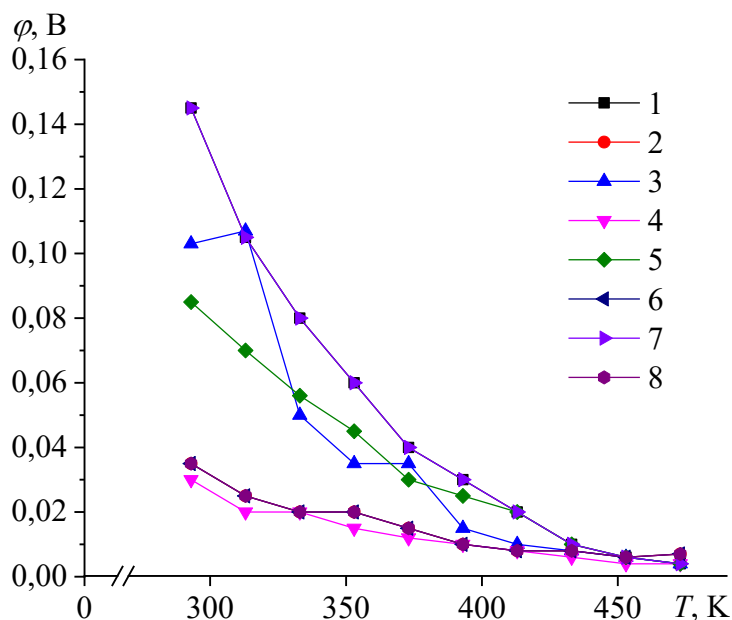


Рис. 1. Зависимость поверхностного потенциала  $\phi$  от температуры  $T$ : 1 – при повышении температуры до плазменной обработки; 2 – при понижении температуры до плазменной обработки; 3 – при повышении температуры после плазменной обработки при  $U=1,4$  кВ; 4 – при понижении температуры после плазменной обработки при  $U=1,4$  кВ; 5 – при повышении температуры после плазменной обработки при  $U=1,5$  кВ; 6 – при понижении температуры после плазменной обработки при  $U=1,5$  кВ; 7 – при повышении температуры после плазменной обработки при  $U=1,6$  кВ; 8 – при понижении температуры после плазменной обработки при  $U=1,6$  кВ.

Температурные зависимости поверхностного потенциала при облучении образца белым светом после плазменной обработки при напряжениях на электродах 1,4, 1,5, 1,6 кВ свидетельствуют о том, что после плазменной обработки поверхностный потенциал меньше, чем до обработки. При сравнительном анализе зависимости поверхностного потенциала от температуры до и после плазменной обработки, мы видим на графиках, что поверхностная фото-ЭДС после плазменной обработки уменьшается. Причем, чем выше напряжение на электродах, тем ниже значение поверхностного потенциала.

### 3. Заключение

Методом поверхностной фото-ЭДС исследована реальная поверхность монокристаллического кремния  $p$ -типа в интервале

температур  $T = 289 - 473$  К, до и после вакуумно-плазменной обработки. При сравнительном анализе зависимости поверхностного потенциала от температуры до и после плазменной обработки, мы видим на графиках, что поверхностная фото-ЭДС после плазменной обработки уменьшается с увеличением значения напряжения на электродах. Предполагаем, что это связано с тем, что обработка поверхности в плазме аргона, приводит к удалению с поверхности загрязнений и примесей, вызванных адсорбцией, удаление этих примесей приводит к уменьшению количества поверхностных электронных состояний, а значит и поверхностного потенциала. Адсорбционно – десорбционные процессы оказывают существенное влияние на энергетический спектр и кинетические параметры практически всех групп ПЭС. Благодаря этому изменяются заряд и потенциал поверхности, темп генерационных и рекомбинационных процессов и другие электрофизические свойства системы диэлектрик – полупроводник. В реальной атмосфере содержатся, как известно, молекулы воды. В первую очередь молекулы воды, адсорбируясь на поверхности, влияют на процессы, происходящие в таких структурах. Процессы диссоциации молекул воды напрямую связаны с возбуждением электронной подсистемы полупроводника. С другой стороны, процессы десорбции газов с поверхности оказывают сильное влияние на поверхностный потенциал, о чем свидетельствуют полученные результаты. Отличие зависимости поверхностного потенциала, при повышении температуры вероятнее всего связаны с десорбционными процессами.

#### **Библиографический список:**

1. **Данилин, Б.С.** Энергетическая эффективность процесса ионного распыления материалов и систем для его реализации / Б.С. Данилин, В.Ю. Киреев, В.К. Сырчин // Физика и химия обработки материалов. – 1979. – № 2. – С. 52-56.
2. **Ветошкин, В.М.** Экспериментальная установка для исследования вакуумноплазменных процессов обработки кварца: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.01: защищена 28.12.09 / Ветошкин Владимир Михайлович. – Ижевск: Удмуртский государственный университет, 2009. – 142 с.
3. Properties of porous silicon; ed. by L. Canham. – Tokyo: The Institution of Electrical Engineers of Japan, 2007. – 424 p.
4. **Bisi, O.** Porous silicon: A quantum sponge structure for silicon based optoelectronics / O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi // Surface Science Reports. – 2000. – V. 38. – I. 1-3. – P. 1-126. DOI: 10.1016/S0167-5729(99)00012-6.
5. Silicon nanocrystals. Fundamentals, synthesis and applications; ed. by L. Pavesi, R. Turan. – Weinheim: Wiley-VCH, 2010. – 648 p.
6. **de Stefano, L.** DNA optical detection based on porous silicon technology: from biosensors to biochips / L. de Stefano, P. Arcari, A. Lamberti et al. // Sensors. – 2007. – V. 7. – I. 2. – P. 214-221.
7. **Kilian, K.A.** Organic modification of mesoporous silicon rugate filters: The influence of nanoarchitecture on optical behavior / K.A. Kilian, T. Bocking, L.M.H. Lai et al. // International Journal of Nanotechnology. – 2008. – V. 5. – № 2/3. – P. 170-178. DOI: 10.1504/IJNT.2008.016914.
8. **Vashpanov, Yu.** Photo-EMF sensitivity of porous silicon thin layer–crystalline silicon heterojunction to ammonia adsorption / Yu. Vashpanov, J.I. Jung, K. D. Kwack // Sensors. – 2011. – V. 11. – I. 2. – P. 1321-1327. DOI: 10.3390/s110201321.
9. **Wang, Y.** A capacitive humidity sensor based on ordered macroporous silicon with thin film surface coating /

Y. Wang, S. Park, J.T.W. Yeow, A. Langner, F. Müller // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2010. – V. 149. – I. 1. – P. 136-142. DOI: 10.1016/j.snb.2010.06.010.

10. Люев, В.К. Влияние химической обработки и температуры на поверхностный потенциал монокристаллического кремния КДБ-10 (111) / В.К. Люев, И.В. Люев // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2015. – Вып. 7. – С. 354-357.

11. Люев, В.К. Температурная зависимость поверхностной фото-ЭДС монокристаллического кремния р-типа / В.К. Люев, И.В. Люев // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2015. – Вып. 7. – С. 350-353.

#### References:

1. Danilin B.S., Kireyev V.Yu., Syrchin V.K. Energeticheskaya effektivnost' protsessa ionnogo raspyleniya materialov i sistem dlya ego realizatsii [Energy efficiency of the process of ion sputtering of materials and systems for its implementation], *Fizika i khimiya obrabotki materialov [Physics and Chemistry of Materials Treatment]*, 1979, no. 2, pp. 52-56. (In Russian).

2. Vetoshkin V.M. *Ekspperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya vakuumnoplazmennyykh protsessov obrabotki kvartsa* [Experimental setup for the study of vacuum-plasma processing of quartz], Cand. tech. sci. diss. Izhevsk, Udmurtskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2009, 142 p. (In Russian).

3. *Properties of porous silicon*, ed. by L. Canham, Tokyo, The Institution of Electrical Engineers of Japan, 2007, 424 p.

4. Bisi O., Ossicini S., Pavese L. Porous silicon: A quantum sponge structure for silicon based optoelectronics, *Surface Science Reports*, 2000, vol. 38, issue 1-3, pp. 1-126. DOI: 10.1016/S0167-5729(99)00012-6.

5. *Silicon nanocrystals. Fundamentals, synthesis and applications*, ed. by L. Pavese, R. Turan. Weinheim, Wiley-VCH, 2010, 648 p.

6. de Stefano L., Arcari P., Lamberti A. et al. DNA optical detection based on porous silicon technology: from biosensors to biochips, *Sensors*, 2007, vol. 7, issue 2, pp. 214-221.

7. Kilian K.A., Bocking T., Lai L.M.H. et al. Organic modification of mesoporous silicon rugate filters: The influence of nanoarchitecture on optical behavior, *International Journal of Nanotechnology*, 2008, vol. 5, no. 2/3, pp. 170-178. DOI: 10.1504/IJNT.2008.016914.

8. Vashpanov Yu., Jung J.I., Kwack K.D. Photo-EMF sensitivity of porous silicon thin layer–crystalline silicon heterojunction to ammonia adsorption, *Sensors*, 2011, vol. 11, issue 2, pp. 1321-1327. DOI: 10.3390/s110201321.

9. Wang Y., Park S., Yeow J.T.W., Langner A., Müller F. A capacitive humidity sensor based on ordered macroporous silicon with thin film surface coating, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, vol. 149, issue 1, pp. 136-142. DOI: 10.1016/j.snb.2010.06.010.

10. Lyuev V.K., Lyuev I.V. Vliyanie khimicheskoy obrabotki i temperatury na poverkhnostnyj potentsial monokristallicheskogo kremniya KDB-10 (111) [Effect of chemical treatment and temperature on the surface potential of KDB-10 (111) single-crystal silicon], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2015, issue 7, pp. 354-357. (In Russian).

11. Lyuev V.K., Lyuev I.V. Temperaturnaya zavisimost' poverkhnostnoj foto-EDS monokristallicheskogo kremniya p-tipa [The temperature dependence of the surface potential of p-type monocrystalline silicon], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2015, issue 7, pp. 350-353. (In Russian).

*Short communication*

#### **INFLUENCE OF VACUUM-PLASMA TREATMENT MODES ON THE SURFACE PHOTO-EMF OF SINGLE-CRYSTAL SILICON**

R.R. Nagaplezheva, M.M. Orakova, M.Yu. Kushkhova, F.M. Tseeva, H.A. Mishaev  
*Kabardino-Balkarian State University of H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.671

**Abstract:** Plasma technologies in the last quarter of the twentieth century made a real scientific and technological revolution in microelectronics. Having come to the world of microelectronics technology as a necessary alternative to liquid etching, which had exhausted its resource by that time, plasma or «dry» technologies became the main tool for creating elements of electronic products. The 21st century, undoubtedly, began and proceeds under the sign of the improvement of such

technologies in solid-state electronics. Plasma technologies include a set of methods for depositing thin and ultrathin layers on a semiconductor substrate, as well as a set of methods for dimensional etching of such layers with specified etching parameters. If we consider the methods of size etching using dry technologies, it should always be taken into account that the whole range of such methods is wide. Some methods, such as radical and plasma-chemical etching, imply a mild, purely chemical interaction of the plasma medium with the substrate material, resulting in the formation of a volatile etch product and its removal (pumping) from the plasma volume. Another group of «dry» methods includes methods of purely physical impact of high-energy plasma particles on the surface of the material and the removal of atoms from the surface only as a result of sputtering of the material. The surface photo-EMF method was used to study the real surface of single-crystal p-type silicon in the temperature range  $T = 289\text{--}473\text{ K}$  before and after plasma treatment. A significant difference was found in the surface electronic states spectra obtained by heating and cooling the samples. Heating leads to desorption of gases and dissociation of water molecules in the surface layer, which reduces the surface potential by an order of magnitude.

*Keywords: plasma, photo-EMF, plasma surface treatment, silicon, surface electronic states.*

*Нагаплежеева Рузанна Руслановна – заместитель директора по учебной работе и качеству образования, старший преподаватель кафедры Электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»*

*Оракова Мариям Мустафаевна – старший преподаватель кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»*

*Кушхова Марианна Юрьевна – инженер-программист отдела электронных и дистанционных технологий обучения управления образовательной политики, ассистент кафедры информационных технологий в управлении техническими системами ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»*

*Цеева Фатимат Мухамедовна – к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры теоретической и экспериментальной физики ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»*

*Мишаев Хусейн Азаматович – студент I года обучения по направлению подготовки 11.04.01 Радиотехника ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»*

*Ruzanna R. Nagaplezheva – Deputy Director for Academic Affairs and Quality of Education, Senior Lecturer, Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University named after HM. Berbekov*

*Mariam M. Orakova – Senior Lecturer, Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University HM. Berbekov*

*Marianna Yu. Kushkhova – Software Engineer, Electronic and Distance Learning Technologies of the Department of Educational Policy Department; Assistant, Department of Information Technology in the Management of Technical Systems, Kabardino-Balkarian State University named after HM. Berbekov*

*Fatimat M. Tseeva – Ph. D., Senior Lecturer, Theoretical and Experimental Physics Department, Kabardino-Balkarian State University named after HM. Berbekov*

*Huseyn A. Mishaev – 1<sup>st</sup> year student, radio engineering speciality, Kabardino-Balkarian State University named after HM. Berbekov*

Поступила в редакцию/received: 09.09.2022; после рецензирования/revised: 11.10.2022; принята/accepted 15.10.2022.