МНОГОСЛОЙНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ КАК МИКРОМОЩНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

MULTILAYER SILICON NANOSTRUCTURES AS MICROPOWER SOURCES OF ENERGY

Б.Г.Грибов¹, д.х.н., К.В.Зиновьев¹, к.т.н., О.Н.Калашник², д.т.н., С.Г.Дорофеев³, к.х.н., (ORCID: 0000-0003-3820-4853),
Н.Н.Кононов⁴, к.ф.-м.н., Н.Н.Герасименко^{5,6}, д.ф.-м.н., (ORCID: 0000-0003-2067-3723),
Д.И.Смирнов^{5,6} (ORCID: 0000-0002-8617-3652), В.Н.Суханов⁶, к.т.н., Л.С.Суханова⁶, к.х.н., В.А.Четвериков^{1,7}
М.А.Шерметова⁶ (ORCID: 0000-0003-2293-849X) / suhi61@mail.ru

B.G.Gribov¹, Doctor of Chemical Sciences, K.V.Zinoviev¹, Candidate of Technical Sciences, O.N.Kalashnik², Doctor of Technical
Sciences, S.G.Dorofeev³, Candidate of Chemical Sciences, (ORCID: 0000-0003-3820-4853), N.N.Kononov⁴, Candidate of
Physical and Mathematical Sciences, N.N.Gerasimenko^{5,6}, Doctor of Physical and Mathematical sciences, (ORCID: 0000-0003-
2067-3723), D.I.Smirnov^{5,6} (ORCID: 0000-0002-8617-3652), V.N.Sukhanov⁶, Candidate of Technical Sciences, L.S.Sukhanova⁶,
Candidate of Chemical Sciences, V.A.Chetverikov^{1,7}, M.A.Shermetova⁶ (ORCID: 0000-0003-2293-849X)

DOI: 10.22184/1993-8578.2019.12.1.16.22

Получено: 5.06.2018 г.

В статье изучены многослойные структуры состава металл/кремний/металл на основе наночастиц кремния. Исследована способность этих структур генерировать электроэнергию за счет взаимодействия нанокремния и воды, находящейся в атмосферном воздухе. Показана перспектива использования многослойных кремниевых наноструктур в качестве элементарной ячейки микромощных батарей.

Multilayer structures composed of metal / silicon / metal based on Si-nanoparticles have been investigated. Studied is a possibility of such structures to generate electricity due to interaction of nano-silicon and water present in atmospheric air. The prospect of using multilayer Si-nanostructures as an elementary cell of micro-power batteries is shown.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое развитие технологии изготовления миниатюрных электронных приборов требует создания для них микроисточников и накопителей энергии. В качестве микроисточников энергии в настоящее время разрабатываются тонкопленочные микробатареи [1], однако из-за того, что область накопления энергии в таких батареях практически двумерна, требуются большие площади батарей для обеспечения значительной величины накопленной ими энергии. Для увеличения плотности запасенной энергии разрабатываются микробатареи, в которых вместо одного плоского электрода

используется матрица близко расположенных электродов специально выбранной формы (трехмерные электроды), получившие название 3D-батарей [2]. Пристальное внимание исследователей привлекают также микробатареи с пористыми электродами, которые способны пропускать окружающий воздух и воду, что позволяет уменьшить массу и стоимость источника энергии [3, 4].

В проблеме проектирования пористых электродов нано- и микрогабаритный кремний занимают важное место, поскольку их использование в наиболее технологичных Li-ion батареях позволяет увеличить их емкость почти в 10 раз [5].

¹ АО "НИИМЭ" / JSC "Molecular Electronics Research Institute".

² ЗАО "НИИ Материаловедения" / CJSC "Research Institute of Materials Science".

³ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова / Lomonosov Moscow State University.

⁴ Институт общей физики им. А.М.Прохорова Российской академии наук / Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences.

⁵ Физический институт РАН им. П.Н.Лебедева / The P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences.

⁶ Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники" / National Research University of Electronic Technology.

⁷ Московский физико-технический институт (государственный университет) / Moscow Institute of Physics and Technology (State University).

В настоящей работе сообщается о результатах исследования многослойных структур на основе наночастиц кремния, которые способны генерировать электроэнергию за счет взаимодействия нанокристаллического кремния и воды, находящейся в воздухе.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для формирования пленок из нанокристаллического кремния (nc-Si) использовались кремниевые наночастицы, полученные пиролизом силана [6] и диспропорционированием окиси кремния [7]. Средний диаметр наночастиц кремния, полученных пиролизом силана, составлял 15 нм, их внешние оболочки были частично окислены и представляли собой SiO_x ($0 \leq x \leq 2$). Наночастицы кремния, синтезированные в результате диспропорционирования SiO , имели средний диаметр ядра 2 нм и оксидную оболочку. Для приготовления слоистых структур на стеклянные подложки в вакууме напылялся металлический электрод (который в дальнейшем мы будем называть нижним) из алюминия, титана, индия или висмута. Затем на этот электрод посредством электрофореза или высоковольтного электрораспыления из зольей наносились пленки nc-Si, толщина которых изменялась в диапазоне от 50 нм до 1 мкм. Толщина пленок измерялась профилометром TalyStep, Taylor-Hobbsen. В некоторых случаях для нанесения пленок nc-Si использовалась алюминиевая подложка, которая служила нижним электродом. Такие образцы отжигались в вакууме 10^{-5} Торр при температуре столика 600 °С.

Рис.1. Геометрия изученного элемента: 1 – верхний электрод, 2 – пленка из нанокристаллического кремния, 3 – нижний электрод, 4 – сопротивление нагрузки

Fig.1. Geometry of the element: 1 – upper electrode, 2 – nanocrystalline silicon film, 3 – lower electrode, 4 – load resistance

Затем на полученную слоистую структуру в вакууме напылялся верхний металлический электрод из такого же набора металлов, что и нижний. Для некоторых образцов нижним электродом служил проводящий слой ИТО, нанесенный на стеклянную подложку. Геометрия изученных образцов показана на рис.1.

Для измерения ЭДС и вольтамперных характеристик использовались стенды, позволявшие регистрировать электрические характеристики

INTRODUCTION

Rapid development of miniature electronic devices fabrication technology makes it necessary to create micro-sources and energy storage systems. Nowadays, thin film micro batteries [1] are being developed as micro-sources of energy, but it is necessary to have large areas of batteries in order to provide a significant amount of accumulated electrical energy, because the energy accumulating structures are, practically, two-dimensional. In order to increase a stored energy density the micro-batteries with matrix of special shape electrodes (so called 3D electrodes)

placed close to each other (known as a 3D battery) instead of one flat electrode are being developed. Micro-batteries with porous electrodes capable to leak air and water are in a focus of research because of low weight and cost of such devices [3,4]. Nano- and micro-scale silicon plays an important role in design of porous electrodes because its use in Li-ion batteries allows of increasing their capacity approximately 10 times [5].

In this work we present results of the investigation of multilayer structures based on silicon nano-particles which are capable of generating electrical energy due to interaction of

nano-crystal silicon with the atmospheric air water.

FABRICATION OF SAMPLES AND MEASUREMENT METHODOLOGY

Silicon nanoparticles prepared by pyrolysis of silane [6] and disproportionation of silicon oxide [7] were used to form the nanocrystalline silicon (nc-Si) films. Silicon nanoparticles prepared by silane pyrolysis have average diameter about 15 nm, their external shells were partially oxidized as SiO_x (where $0 \leq x \leq 2$). Silicon nanoparticles synthesized due to disproportionation of SiO had an oxide shell and the average core diameter of 2 nm. To prepare the layered

Рис. 2. Зависимость величины ЭДС элемента от его температуры

Fig. 2. Dependence of element's EMF on its temperature

образцов в диапазоне температур 20–150 °C с точностью 0,1 °C. В качестве регистрирующих приборов использовались высокоомные 24-битные 4-канальные цифровые самописцы Эксперт-001 (Эконикс). Для исследования влияния вида окружающих газов на электрические характеристики образцов они помещались в вакуумную камеру с контролируемым составом, давлением и влажностью находящегося в ней газа.

structures, a metal electrode (hereinafter the lower electrode) has been manufactured in vacuum by physical deposition of aluminum, titan, indium or bismuth on glass substrates. Afterwards, the nc-Si films of thickness ranging from 50 nm to 1 μ m were deposited onto the surface of this electrode using electrophoresis or high-voltage electrical spraying method. Thickness of films was controlled by TalyStep (Taylor-Hobson) surface profilometer. In some cases an aluminum substrate was used as the lower electrode to deposit the nc-Si films. Samples were tempered in vacuum at 10^{-5} Torr and the stage temperature of 600 °C. Top

electrode was deposited in vacuum onto the layered structure using the same metals as for the lower one. Sometimes, in case of samples with ITO (indium tin oxide) the conductive layer placed on a glass substrate, we used it as the lower electrode. See geometry of the samples in Fig. 1.

To measure the electromotive force and volt-ampere characteristics, the stands capable of recording electrical properties of samples within the temperature range 20–150 °C with accuracy of 0.1 °C were used. The results were recorded using high-resistance 24-bits and 4-channels digital X-Y recorders Expert-001 (Econix). Samples were placed in a

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все исследованные нами образцы обнаруживают некоторую разность потенциалов, возникающую между верхним и нижним электродами. Величина этой разности потенциалов при температуре 20 °C находится в диапазоне от 10 мВ до 1,5 В в зависимости от вида электродов и способа нанесения пленки nc-Si. Наибольшие величины разности потенциалов (до 1,5 В) достигаются у структуры Al/nc-Si/Al после вакуумного отжига. При этом у всех исследованных образцов нижний электрод имел положительный потенциал относительно верхнего.

Температурная динамика ЭДС всех исследованных образцов была одинакова и заключалась в увеличении величины ЭДС с ростом температуры образца (см. рис. 2). Из приведенного рисунка видно, что величина ЭДС увеличивается практически линейно с ростом температуры в диапазоне 30–90 °C.

Важной особенностью наблюдаемой ЭДС является спонтанность ее возникновения, которая никак не связана с воздействием на структуру металл/пленка nc-Si/металл внешних электрических источников. На рис. 3 приведена временная зависимость разности потенциалов, возникающей на электродах ячейки слоистой структуры Al/пленка nc-Si/Al, которая предварительно была замкнута накоротко в течение 20 ч, а затем подключена к нагрузке 50 МОм. На этом же рисунке показано изменение температуры образца, которое происходит в диапазоне 1 °C и является следствием суточного колебания

vacuum chamber with controlled gas media (gas composition, pressure and humidity) to study the influence of the external gas mixture on them.

EXPERIMENTAL RESULTS AND THEIR DISCUSSION

It was observed that all samples exhibit a certain difference of potentials between the lower and upper electrodes. The value of this difference at 20 °C stays within 10 mV – 1.5 V, depending on electrode types and deposition methods. The maximum difference of potentials (up to 1.5 V) in Al/nc-Si/Al structures is achieved after the samples were tempered in vacuum. The

температуры в лаборатории, с учетом изменения температуры термостата.

Из рис.3 видно, что сразу же после соединения с нагрузкой напряжение на слоистой структуре быстро возрастает и, примерно через 1,5 ч, достигает максимума – 47 мВ. Затем напряжение начинает монотонно уменьшаться, однако если сопоставить его изменение с изменением температуры, то становится ясно, что изменение напряжения на нагрузке при временах, превышающих 1,5 ч, определяется суточным колебанием температуры в лаборатории. Другими словами, через 1,5 ч после соединения с нагрузкой удельная мощность, отдаваемая структурой Al/пленка nc-Si/Al во внешнюю цепь, выходит на стационарный режим и составляет $9 \cdot 10^{-4}$ мВт/гр. В этом стационарном режиме данная структура находилась несколько суток без заметных изменений.

Для установления причин, приводящих к возникновению ЭДС, исследуемые структуры помещались в вакуумную камеру, в которой можно было контролировать давление, температуру и состав газа. Зависимость разности потенциалов, создаваемой структурой Al/пленка nc-Si/Al на нагрузке в 1 МОм в зависимости от сорта окружающего ее газа, показана на рис.4. При измерениях использовался осушенный кислород, лабораторный воздух, сухой и влажный аргон. Кроме того, в камере во всех случаях находилось небольшое количество лабораторного воздуха, которое попадало в нее из балластного объема напускного клапана. Температура образца во всех измерениях составляла 24°C.

Рис.3. 1 – временная зависимость напряжения спонтанно создаваемого элементом на нагрузке 50 МОм после его полной разрядки в течение 20 ч, 2 – временной профиль температуры элемента

Fig.3. 1 – time dependence of voltage, spontaneously generated by the element at load of 50 MOhm after its full discharge during 20 hours, 2 – temporal temperature element profile

Из данных рис.4 следует, что в том случае, когда в окружении структуры Al/пленка nc-Si/Al присутствуют кислород и вода, в широком диапазоне соотношений этих компонентов напряжение, создаваемое на нагрузке, изменяется весьма слабо и резко падает при их отсутствии.

lower electrode always has a positive potential relatively to the upper one. Electromotive force temperature dynamic was the same for all samples and was increasing as the sample temperature became higher (See Fig.2). Obviously, the electromotive force value increases, practically, linearly with temperature growth in the region 30–90°C. It is important that the observed electromotive force appears spontaneously, without any influence of external electrical sources on the metal/film – nc-Si/metal structure. Fig.3 indicates the difference of potentials time dependence on Al/film – nc-Si/Al layered structure cell electrodes previously

shorted electrically for 20 hours and connected to the load of 50 MOhm. This figure presents the temperature changes of a sample in the range 1°C as a result of daily temperature fluctuations in the laboratory with taking into account the thermostat temperature shift. Fig.3 indicates rapid changes of voltage immediately after switching of the layered structure to the load and achievement of the maximum (47 mV) in 1.5 hour. Then this maximum of the voltage decreases monotonically according to the temperature changes, however, if compare its change with changes in the temperature it becomes evident that the

temperature changes in 1.5 hour depend on daily temperature fluctuations in the laboratory. In other words, after connecting to the load Al/film nc-Si/Al structure gives the specific capacity to the external circuit in 1.5 hour and stays stable and equal to $9 \cdot 10^{-4}$ mWt/gr. The structure remained stable for several days without visible changes.

To determine the reasons of electromotive force appearing, the structures were placed in a vacuum chamber with controllable pressure, temperature and gas composition. Fig.4 shows the difference in potentials dependence at 1 MOhm load on a type of gas in the chamber.

Рис.4. Влияние окружающей среды на напряжение, создаваемое структурой на нагрузке 1 МОм. 1 – кислород (относительная влажность 0,1%), 2 – комнатный воздух (относительная влажность 60%), 3 – смесь аргона, воды (влажность 100%) и кислорода в отношении $1:3 \cdot 10^{-2}:10^{-4}$, 4 – осушенный аргон, 5 – форвакуум ($P \sim 10^{-3}$ Торр). Температура образца 24°C

Fig.4. Influence of external media on the voltage produced by the structure on 1 MOhm load, 1 – oxygen (relative humidity is 0,1%), 2 – laboratory air (relative humidity is 60%), 3 – mixture of argon, water (humidity is 100%) and oxygen in the ratio $1:3 \cdot 10^{-2}:10^{-4}$, 4 – dry argon, 5 – prevacuum ($p \sim 10^{-3}$ Torr). Temperature of the sample is 24°C

Wet oxygen, laboratory air, dry and moist argon were used in measurements. Moreover, some quantity of laboratory air was present in the chamber due to the ballast volume leak valve operation. Temperature of the sample in all measurements was 24°C . Whenever the gas mixture in the chamber contains oxygen and water, Al/film nc-Si/Al structure has a slightly varying voltage on the load in the wide range of these components proportions and sharply decreases without them (see Fig.4).

Figure 5 presents the volt-ampere characteristics of Al/film nc-Si/Al structure measured in laboratory air and vacuum at pressure $P \sim 10^{-2}$ Torr.

The volt-ampere characteristics are non-symmetrical in the laboratory air media and the dependence of current on voltage is exponential with high accuracy at the forward biased current. This fact indicates that barrier layer of, primarily, unidirectional conductivity from the upper electrode to the lower one appears during preparation of the sample. The reasons leading to appearance of such barrier are not clear, but its presence helps to separate the electrical charges in Al/film nc-Si/Al structure more effectively. The volt-ampere characteristics in the laboratory air media exhibit a hysteresis effect which is similar to cases with

На рис.5 показаны вольтамперные характеристики (ВАХ), измеренные на структуре Al/пленка nc-Si/Al в лабораторном воздухе и в вакууме при давлении $P \sim 10^{-2}$ Торр. Из приведенных кривых видно, что в том случае, когда окружением образца является лабораторный воздух, ВАХ являются несимметричными, причем при прямых смещениях зависимость тока от напряжения с хорошей точностью является экспоненциальной. Этот факт указывает на то, что в процессе изготовления образца возникает барьерный слой, создающий преимущественно одностороннюю проводимость в направлении от верхнего электрода к нижнему. Причины, приводящие к возникновению подобного барьера, пока не ясны, однако его наличие, несомненно, способствует более эффективному разделению электрических зарядов в структуре Al/пленка nc-Si/Al.

ВАХ образца в лабораторном воздухе обнаруживает гистерезис, характерный для случаев, когда в структуре имеется квазиемкость. Величина удельной емкости структуры, рассчитанная по формуле

$$C = \frac{I}{m \frac{\Delta U}{\Delta t}} \quad \left(\text{здесь } \frac{\Delta U}{\Delta t} - \text{скорость изменения потенциала} \right)$$

ала на зажимах измеряемого образца, m – масса пленки nc-Si) при смещении $U = 0$, составляет 3 Ф/гр. Этот результат показывает, что когда структура Al/пленка nc-Si/Al находится в лабораторном воздухе, то она проявляет свойства суперконденсатора. ВАХ этой же структуры в вакууме гистерезиса не обнаруживает.

quasi-capacity. The specific capacity value is calculated by the formula

$$C = \frac{I}{m \frac{\Delta U}{\Delta t}} \quad \left(\text{here } \frac{\Delta U}{\Delta t} - \text{rate of potential variation} \right)$$

on the sample contacts, m – weight of the nc-Si film) at voltage bias $U = 0$ is equal to 3 F/gr. It means that when Al/film nc-Si/Al structure is in the laboratory air media it has the super capacitor properties. The volt-ampere characteristics of this structure in vacuum have no hysteresis effect.

As the electromotive force in measured structures arises in air (oxygen) and water media only, it can be explained as follows. In all cases the

Так как ЭДС в изученных структурах возникает только в присутствии воздуха (кислорода) и воды, то объяснить ее возникновение можно следующим образом. Верхний электрод структуры металл/пленка nc-Si/металл во всех случаях напылялся на пленку нанокристаллического кремния, имеющую неровности. Поэтому поверхность верхнего электрода, повторяя неровности пленки, также должна иметь аналогичный рельеф. Кроме того, в верхнем электроде, также из-за микронеровностей, возможно появление микроотверстий, из-за чего такой электрод превращается в микропористую мембрану, способную пропускать воду и кислород (в составе воздуха).

В работах [8, 9] показано, что наноразмерный кремний активно реагирует с водой, вытесняя из нее водород в количестве до 14% от веса кремния. При этом скорость генерации водорода особенно высокая, если размер частиц нанокремния составляет 10 нм и менее. Можно предположить, что вода (влажность воздуха), проходя через верхний электрод, взаимодействует с нанокремнием согласно реакции:

В результате наночастицы кремния и прилегающий к ним верхний электрод заряжаются отрицательно. Протоны диффундируют вглубь структуры, поскольку пленки нанокремния, использованные в данных структурах, проявляют ярко выраженную протонную проводимость [10].

upper electrode of metal/ film nc-Si / metal structure was deposited onto the nanocrystalline silicon irregular surface. So, the upper electrode surface should be irregular according to the film's relief too. Moreover, upper electrode may have micro-holes capable to leak water and oxygen (as a part of air) and may be considered as a microporous membrane. It was shown [8, 9] that nano-sized silicon reacts with water and pushes out hydrogen up to 14% of the silicon weight. When size of nano-silicon particles is 10 nm and less, the hydrogen generation rate is especially high. We suggest that water (moisture from the air) passing

through the upper electrode reacts with nano-silicon in accordance with the following reaction:

The upper electrode and nano-sized silicon particles are charged negatively. Protons diffuse inside the structure as the nano-silicon films used in such structures have strongly pronounced proton conductivity [10].

CONCLUSIONS

Multilayer metal/silicon/metal structures based on nano-sized silicon particles have been prepared

and studied. It was discovered that these structures are capable of generating electricity because of interaction between nano-silicon and air water. Electromotive force value depends on the sample temperature and outer media, e.g. air moisture and oxygen. Specific power may be produced on an external load under the influence of the electromotive force and may reach up to $2 \cdot 10^{-3}$ to $5 \cdot 10^{-2}$ mWt/gr within the temperature range 20–115°C. In future these structures may be used as an elementary micro-power battery cell – power sources for the needs of microelectronics and in other industries. ■

Рис.5. Вольт-амперные характеристики структуры Al/пленка nc-Si/Al, измеренные в лабораторном воздухе (1) и в вакууме при давлении $P \sim 10^{-2}$ Торр (2). Прямое напряжение соответствует положительному потенциалу верхнего электрода, величина нагрузки составляет 1 МОм. Температура образца 24 °C

Fig.5. Volt-ampere characteristics of Al/film nc-Si/Al structure measured in laboratory air (1) and in vacuum at pressure $P \sim 10^{-2}$ Torr (2). Direct voltage corresponds to the positive potential of the upper electrode, load is 1 MOhm, temperature of the sample is 24 °C

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены и исследованы многослойные структуры состава металл/кремний/металл на основе наночастиц кремния. Установлено, что эти структуры

способны генерировать электроэнергию за счет взаимодействия нанокремния и воды, находящейся в атмосферном воздухе. Величина обнаруженной ЭДС зависит от температуры образца, а также от его окружения, то есть от влажности окружающего образец газа и от наличия в нем кислорода. Под действием ЭДС на внешней нагрузке может выделяться удельная мощность от $2 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ мВт/гр в диапазоне температур 20–115°C. В перспективе такие структуры могут быть использованы в качестве элементарной ячейки микромощных батарей – источников питания в микроэлектронике и других областях.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Souquet, J. L., Duclot, M. Solid State Ionics 2002, 148, p. 375.
2. Long J.W., Dunn B., Rolison D.R. and White H.S. Three-Dimensional Battery Architectures. Chem. Rev. v. 10, (2004), p. 4463–4492.
3. Capsoni D., Bini M., Ferrari S., Quartarone E., Mustarelli P. Recent advances in the development of Li-air batteries. Journal of Power Sources 220 (2012), p. 253–263.
4. Kraytsberg A., Ein-Eli Y. Review on Li-air batteries – Opportunities, limitations and perspective. Journal of Power Sources 196 (2011), p. 886–893.
5. Wu H., Zheng G., Liu N., Carney T.J., Yang Y. and Cui Y. Engineering Empty Space between Si Nanoparticles for Lithium-Ion Battery Anodes. Nano Lett. 2012, 12, 904–909.
6. Kuz'min G.P., Karasev M.E., Khokhlov E.M., Kononov N.N., Korovin S.B., Plotnichenko V.G., Polyakov S.N., Pustovoy V.I. and Tikhonovitch O.V. Nanosize Silicon Powders: The Structure and Optical Properties Laser Physics. v. 10, 2000, p. 939–945.
7. Dorofeev S.G., Ischenko A.A., Kononov N.N., Fetisov G.V. Effect of annealing temperature on the optical properties of nanosilicon produced from silicon monoxide. Current Applied Physics 12 (2012), p. 718–725.
8. Goller B., Kovalev D. and Sreseli O. Nanosilicon in water as a source of hydrogen: size and pH matter. Nanotechnology 22 (2011), 305402 (4pp).
9. Erogbogbo F., Lin T., Tucciarone P.M., LaJoie K.M., Lai L., Patki G.D., Prasad P.N. and Swihart M.N. On-Demand Hydrogen Generation using Nanosilicon: Splitting Water without Light, Heat, or Electricity. Nano Lett. 13, (2013), p. 451–456.
10. Кононов Н.Н., Дорофеев С.Г., Миронов Р.А., Плотниченко В.Г., Дианов Е.М., Ищенко А.А. Диэлектрические и транспортные свойства тонких пленок, осажденных из зольей, содержащих наночастицы кремния // Физика и техника полупроводников, 2011, т. 54, № 8, с. 1038–1048.

ГРАФЕНОВЫЕ НАНОТРУБКИ В ПОЛИУРЕТАНАХ ПОКАЗАЛИ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛУЧШЕ АММОНИЕВЫХ СОЛЕЙ И ТЕХУГЛЕРОДА

Графеновые нанотрубки доказали свою способность придавать постоянные и однородные антистатические свойства полиуретанам. Недавно разработанный концентрат TUBALL MATRIX 202 позволил преодолеть существовавшие ранее трудности с дисперсией в полиуретановых системах и уже успешно используется в промышленных роликах и колесах, полиуретановой обуви, печатных роликах и очистных скребках. Графеновые нанотрубки TUBALL от компании OCSiAl быстро осваивают рынок продуктов с высокими требованиями к эксплуатационным характеристикам. Один из ярких примеров – полиуретановые диски в очистных скребках для промышленных трубопроводов. Для устранения риска пожаров и взрывов, а также улучшения диагностической точности, производители очистных скребков заменяют аммониевые соли на TUBALL MATRIX 202 в качестве антистатической добавки. Помимо постоянного и стабильного уровня сопротивления в диапазоне 107–105 Ом·см, предварительные результаты показали снижение неточностей в диагностике оборудования на 30%.

Концентрат TUBALL MATRIX 202 также нашел применение в антистатической обуви, подошва которой изготавливается из полиуретанового эластомера. Такая обувь используется для экипировки работников на особо чувствительных к электростатическому разряду объектах – в химической, нефтегазовой, электронной и горнодобывающей промышленности. При

использовании нанотрубок TUBALL в промышленных полиуретановых роликах удалось получить постоянное объемное сопротивление в диапазоне 108–106 Ом·см без образования пыли на установке и при сохранении важных механических характеристик, таких как сопротивление истиранию и твердость. TUBALL MATRIX 202 также применяется при производстве колес, используемых в горнодобывающей промышленности, где антистатические свойства имеют решающее значение для безопасности. Согласно данным, предоставленным одним из клиентов OCSiAl, графеновые нанотрубки сохраняют или даже улучшают механические свойства полиуретановой системы, в то время как использование этим же производителем 6,5 мас.% техуглерода почти в два раза снижало прочность на разрыв. Для получения уровня сопротивления в диапазоне 109–105 Ом·см рабочая концентрация графеновых нанотрубок в 100 раз меньше, чем у аммониевых солей, в 500 раз меньше, чем у технического углерода, и в 1000 раз меньше, чем у проводящей слюды. Кроме того, по сравнению с аммониевыми солями графеновые нанотрубки обеспечивают более широкий диапазон уровней сопротивления. При этом полученные свойства полностью независимы от условий влажности и температуры. В свою очередь, в отличие от техуглерода, нанотрубки легко диспергируются и сохраняют механические свойства полиуретана.

По материалам <https://ocsial.com>