

УДК 538.911

А.Н. Белов, М.В. Кислицин, А.А. Строганов, А.В. Сыса, В.И. Шевяков**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ОКСИДА ТИТАНА, ПОКРЫТОГО
УЛЬТРАТОНКИМИ ГРАФИТОВЫМИ СЛОЯМИ***

Показано, что увеличение емкости литий-ионных батарей возможно при использовании электродов с высокой эффективной площадью поверхности, которой обладают пористые и кристаллические анодные оксиды металлов, например оксид титана, который представляет собой массив наноразмерных столбиков, геометрические параметры которого возможно изменять варьируя технологические особенности его формирования. Отмечено, что конформное нанесение углеродных слоев на развитую поверхность таких наноструктур позволит увеличить поверхность катода в несколько раз. Представлены результаты исследования технологии синтеза композита на основе наноструктурированного оксида титана, покрытого ультратонкими графитовыми слоями. Продемонстрированы особенности формирования оксида титана, имеющего столбчатую структуру, анодным окислением двухслойного покрытия титан–алюминий. Такая форма поверхности наноструктуры связана с перемещением фронта образования оксида титана вдоль пор оксида алюминия в процессе окисления. В частности, показано, что оксид титана обладающий наибольшей эффективной площадью поверхности может быть получен при использовании электролита на основе щавелевой кислоты. Результатами исследования просвечивающей электронной микроскопии и Рамановской спектроскопии доказана возможность осаждения ультратонких слоев графита. Установлено, что количество графитовых монослоев увеличивается от верхней части титановых столбов к их основанию. Минимальное количество монослоев графита ($I_G/I_{2D} = 0,5-0,8$) образуется в верхней части столбов, а при приближении к основанию их число растет. У основания столбов имеет место отношение интенсивностей $I_G/I_{2D} = 1,8-2,5$. По-нашему мнению это связано с размерными эффектами, возникающими из-за малого радиуса кривизны нанокристаллов. Продемонстрировано увеличение площади поверхности на основе синтезированного композита в 9,5 раз.

Литий-ионный аккумулятор; композит; графит; оксид титана; ультратонкий слой; пиролиз этанола; массив наноразмерных столбов; наноструктура.

A.N. Belov, M.V. Kislitsin, A.A. Stroganov, A.V. Sysa, V.I. Shevyakov**FEATURES OF FORMATION OF COMPOSITE BASED ON
NANOSTRUCTURED TITANIUM DIOXIDE-COATED ULTRA-THIN
GRAPHITE LAYERS**

It has been shown that increasing the capacity of lithium-ion batteries is possible when using the electrodes with high effective surface area, which is porous and crystalline anode metal oxides such as titanium oxide, which is an array of nanoscale columns, the geometrical parameters which may change by varying the technological features of its formation. It is noted that the conformal deposition of carbon layers on the developed surface of such structures will increase the surface of the cathode is several times. The results of the study technology of synthesis of nanostructured composite based on titanium oxide coated with ultra-thin graphite layers. We demonstrate this particular form of titanium oxide, having a columnar structure, two-layer coating by anodic oxidation of titanium–aluminum. Such a shape of the surface of the nanostructure is associated with the movement of the front along the titanium oxide formation pore alumina in the oxidation process. In particular it is shown that the titanium oxide having a maximum effective surface area can be obtained by using an electrolyte based on oxalic acid. The results of the study

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 15-19-00138).

of transmission electron microscopy and Raman spectroscopy proved the possibility of deposition of ultra-thin layers of graphite. It is found that the amount of graphite monolayers increased from the upper portion to the pillars of the titanium base. The minimum amount of graphite monolayers ($I_G / I_{2D} = 0,5-0,8$) formed in the top of the column and at the approach to the base number is growing. At the base of the pillars have the intensity ratio $I_G / I_{2D} = 1,8-2,5$. In our opinion this is due to size effects arising from the small radius of curvature of the nanocrystals. Showed an increase in surface area based on the synthesized composite 9.5 times.

Lithium-ion battery; composite; graphite; titanium oxide; ultra-thin layer; pyrolysis of ethanol; an array of nanoscale columns; nanostructure.

Введение. В настоящее время в современной бытовой электронной технике нашли широкое применение литий-ионные аккумуляторы, которые применяются в качестве источника энергии в электромобилях и накопителях энергии в энергетических системах [1–3]. В одной из перспективных конструкций таких батарей в качестве материала катода применяется графит. Известно [4], что при взаимодействии щелочных металлов с графитом образуются соединения внедрения – интеркаляты, в которых атомы металла регулярно расположены между слоями графита. Интеркаляты лития как раз и используются для создания катодов литий-ионных аккумуляторов [5]. При протекании катодного тока происходит внедрение лития из раствора электролита между слоями графита, а при смене полярности – обратная интеркаляция лития в раствор электролита. Преимуществом углеродных структур является незначительное увеличение удельного объёма при внедрении в них лития [6–8]. При перенапряжении, во время протекания катодного процесса не выделяется металлический литий, что приводит к его инкапсулированию и образованию дендритов. Это решает проблему сохранения контакта в заряженной активной массе.

Одна из актуальных проблем связана с повышением электрической емкости литий-ионных батарей. Многие исследования направлены на то, чтобы увеличить электроёмкость допированием катода кристаллическим углеродом и использованием металл-оксидных сплавов в качестве анода [9–10]. Несмотря на то, что в целом удалось повысить электроёмкость до приемлемого уровня, подобные элементы обладают неустойчивостью к циклированию, а также постоянным разрядом [11].

Увеличение емкости батарей возможно при использовании электродов с высокой эффективной площадью поверхности, которой обладают пористые [12–14] и кристаллические [15, 16] оксиды металлов, например оксид титана [17]. Он представляет собой массив наноразмерных столбиков, геометрические параметры которого возможно изменять варьируя технологические особенности его формирования [18]. Конформное нанесение углеродных слоев на их поверхность позволит увеличить поверхность катода в несколько раз.

Кроме того, перспективным направлением является создание гибких накопителей энергии [19] за счет применения в качестве анода многослойных структур графен – диоксид титана.

В настоящей работе представлены результаты исследования особенностей формирования композита на основе наноструктурированного оксида титана, покрытого ультратонкими графитовыми слоями, который потенциально мог бы быть использован в литий-ионных аккумуляторах в качестве катода, характеризующегося повышенной эффективной площадью поверхности.

Методика эксперимента. Для исследования процесса формирования наноструктурированного оксида титана в качестве исходных использовали кремневые подложки с нанесенным на них двухслойным покрытием титан–алюминий. Толщина пленок титана составляла 500 нм, алюминия – 1 мкм. Процесс анодирования алюминия проводили в гальваностатическом режиме при плотности тока 10 mA/cm^2 .

В качестве электролитов применяли водные растворы серной, щавелевой и ортофосфорной кислот. Для контроля процессов анодирования алюминия и титана применяли разработанную методику анализа электрохимического процесса формирования пористых оксидных пленок, основанную на непрерывном во времени контроле электрофизических характеристик процесса и температуры [20]. После процесса анодного окисления двухслойной структуры матрицу оксида алюминия селективно по тоношению к оксиду кремния удаляли в водном растворе 3,5 об% H_3PO_4 с добавлением 45 г/л CrO_3 .

С использованием атомно-силовой и растровой электронной микроскопии исследовали структуры на отдельных этапах их формирования для подтверждения протекания процессов в исследуемом методе создания наноструктурированного оксида титана.

Процесс осаждения ультратонких слоев графита осуществляли методом пиролиза этанола в среде аргона. Реакционную смесь подавали через барботер в камеру газозафазного осаждения. Температура зоны реакции составляла 700 °С. Расход смеси составлял 2 л/ч.

Полученные структуры исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии и Рамановской спектроскопии.

Результаты и обсуждение. Контроль параметров процесса анодирования двухслойной структуры алюминий–титан показал, что на стадии формирования пористого оксида алюминия происходит стабилизация значения напряжения анодирования. Однако в определенный момент начинается его увеличение, что вызвано достижением границы раздела алюминий-титан фронта окисления, началом образования островков плотного оксида титана и формированием сплошного слоя плотного оксида титана. Наличие сплошного слоя плотного оксида титана существенно увеличивает сопротивление электрохимической ячейки, в связи с чем и происходит увеличение напряжения анодирования. Ранее нами было установлено [17], что интенсивность вертикального роста столбов оксида титана в порах оксида алюминия связана, в основном, с исходной толщиной пленки титана.

Установлено, что диаметр столбов оксида титана определяется геометрическими параметрами пористой структуры оксида алюминия (рис. 1).

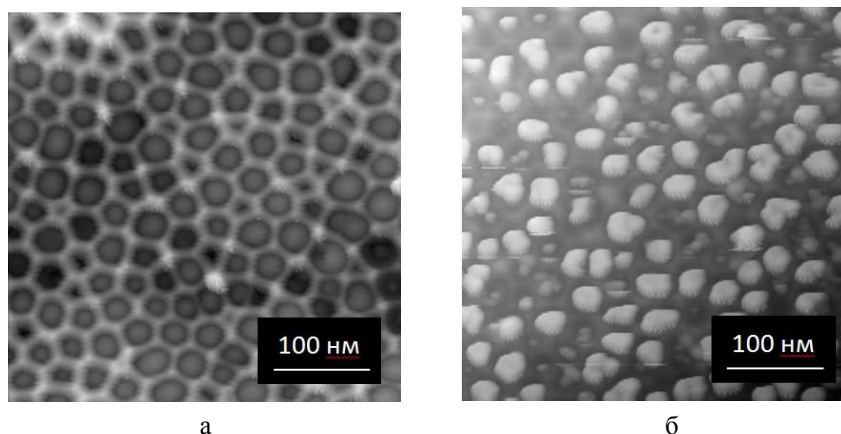


Рис. 1. АСМ-изображения наноразмерных структур оксида титана, сформированных в серной кислоте до (а) и после (б) удаления матрицы пористого оксида алюминия

Диаметр пор анодного оксида алюминия в случае постоянной плотности тока определяется природой электролита. Предельная высота столбов оксида титана определяется максимальным значением напряжения анодирования, которое составило 300 В. При подаче более высокого напряжения в системе возникает электрический пробой. Геометрические параметры сформированных структур представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры наноструктуры анодного оксида титана

Электролит	Диаметр столбов, нм	Высота столбов, нм	Относительная площадь поверхности, S/S_0
H_2SO_4	29	120	7,1
$(COOH)_2$	51	280	9,5
H_3PO_4	108	305	4,9

Наибольшая величина эффективной площади поверхности оксида титана была получена при использовании электролита на основе щавелевой кислоты.

После проведения процесса осаждения графита образец нанокристаллического оксида титана приобретал более темный оттенок, что косвенно подтверждало наличие слоя графита. На рис. 2 представлены АСМ изображения массива наноразмерных столбов оксида титана, полученного при анодировании двухслойной структуры титан-алюминий в щавелевой кислоте до и после процесса нанесения графитового слоя.

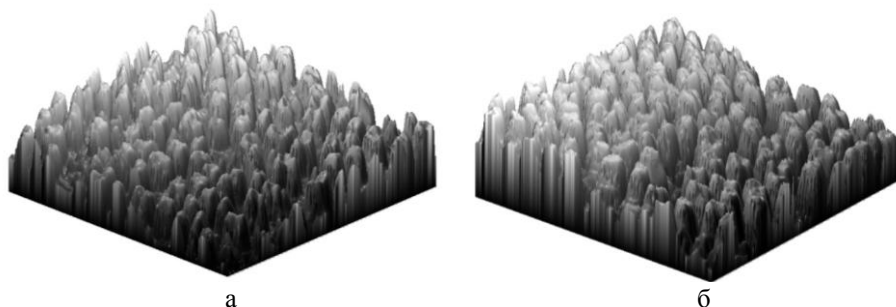


Рис. 2. АСМ-изображения нанокристаллического оксида титана до (а) и после (б) нанесения ультратонкого слоя графита

Из рисунка следует, что нанесенный слой графита не нарушил геометрию массива наноразмерных столбов оксида титана. По наличию G и 2D пиков при исследовании образца Рамановской спектроскопией установлено, что графитовые нанослои присутствуют по всей поверхности наноструктуры. Установлено также, что минимальное количество монослоев графита ($I_G/I_{2D} = 0,5-0,8$) образуется в верхней части столбов, а при приближении к основанию их число растет. У основания столбов имеет место отношение интенсивностей $I_G/I_{2D} = 1,8-2,5$. По-нашему мнению это связано с размерными эффектами, возникающими из-за малого радиуса кривизны нанокристаллов. На рис. 3 представлены ПЭМ-микрофотографии и Рамановские спектры графитовых слоев в верхней точке столбов (рис. 3,а,б) и у их основания (рис. 3,в,г).

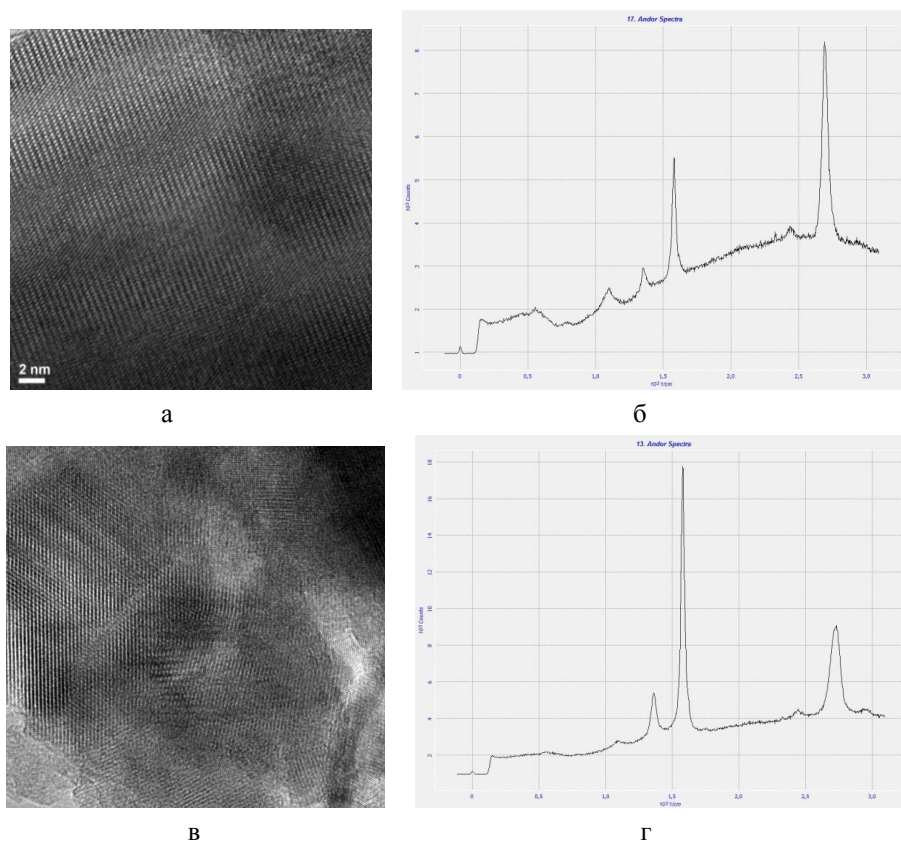


Рис. 3. ПЭМ-микрофотографии и Рамановские спектры ультратонких слоев графита, сформированных в верхней части столбов оксида титана (а, б) и у их основания (в, г)

Таким образом, продемонстрирована возможность создания композита наноструктурированный оксид титана-графитовый ультратонкий слой. Показано, что наноструктурированный оксид титана, обладающий наибольшей эффективной площадью поверхности может быть получен при использовании электролита на основе щавелевой кислоты. Установлено, что количество графитовых монослоев увеличивается от верхней части титановых столбов к их основанию. Сформированные композитные наноструктуры могут быть использованы в качестве электродов литий-ионных батарей, а также в технологии создания иных элементов функциональной электроники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Scrosati Bruno, Garche Jürgen. Lithium batteries: Status, prospects and future // Journal of Power Sources. – 2010. – Vol. 195. – P. 2419-2430.
2. Subrahmanyam Goriparti, Ermanno Miele, Francesco De Angelis, Enzo Di Fabrizio, Remo Proietti Zaccaria, Claudio Capiglia. Review on recent progress of nanostructured anode materials for Li-ion batteries // Journal of Power Sources. – 2014. – Vol. 257. – P. 421-443.
3. Languang Lu, Xuebing Han, Jianqiu Li, Jianfeng Hua, Mingguo Ouyang. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles // Journal of Power Sources. – 2013. – Vol. 226. – P. 272-288.

4. *Uttam Kumar Sen, Apoorv Shaligram, and Sagar Mitra.* Intercalation Anode Material for Lithium Ion Battery Based on Molybdenum Dioxide // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2014. – Vol. 6. – P. 14311-14319.
5. *Naoki Nitta, Feixiang Wu, Jung Tae Lee, Gleb Yushin.* Li-ion battery materials: present and future // *Materials Today.* – 2015. – Vol. 18. – P. 252-264.
6. *Shiyong Zheng, Yvonne Chen, Yunhua Xu, Feng Yi, Yujie Zhu, Yihang Liu, Junhe Yang, and Chunsheng Wang.* In Situ Formed Lithium Sulfide/Microporous Carbon Cathodes for Lithium-Ion Batteries // *ACS Nano.* – 2013. – Vol. 7. – P. 10995-11003.
7. *Haiyang Ni, Jinkun Liu and Li-Zhen Fan.* Carbon-coated LiFePO₄-porous carbon composites as cathode materials for lithium ion batteries // *Nanoscale.* – 2013. – Vol. 5. – P. 2164-2168.
8. *Cao Q., Zhang H.P., Wang G.J., Xia Q., Wu Y.P., Wu H.Q.* A novel carbon-coated LiCoO₂ as cathode material for lithium ion battery // *Electrochemistry Communications.* – 2007. – Vol. 9. – P. 1228-1232.
9. *Chu Liang, Mingxia Gao, Hongge Pan, Yongfeng Liu, Mi Yan.* Lithium alloys and metal oxides as high-capacity anode materials for lithium-ion batteries // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2013. – Vol. 575. – P. 246-256.
10. *Кедринский И.А., Яковлев В.Г.* Литий-ионные аккумуляторы. – Красноярск: Платина, 2002. – 268 с.
11. *Wu Y.P., Rahm E. and Holze R.* Carbon anode materials for lithium ion batteries // *Journal of Power Sources.* – 2003. – Vol. 144. – P. 228-236.
12. *Chuanmin Ruan, Maggie Paulose, Oomman K. Varghese, Gopal K. Mor, Craig A. Grimes* Fabrication of Highly Ordered TiO₂ Nanotube Arrays Using an Organic Electrolyte // *Journal of Physical Chemistry B.* – 2005. – No. 109. – P. 15754-15759.
13. *Sonoda T., Kato M., Katou K., Asahina T.* Surface structure of Ti-O films formed on pure titanium by anodic oxidation // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2007. – No. 61. – P. 1091-1096.
14. *Xinsheng Peng, Jingpengwang, Dan F Thomas Aicheng.* Tunable growth of TiO₂ nanostructures on Ti substrates // *Nanotechnology.* – 2005. – No. 16. – P. 2389-2395.
15. *Mari B., Mollar M., Mechkour A., Hartiti B., Perales M. and Cembrero J.* Optical properties of nanocolumnar ZnO crystals // *Microelectron. J.* – 2004. – Vol. 35. – P. 79-82.
16. *Fernandez I., Cremades A., Piqueras J.* Cathodoluminescence study of defects in deformed (110) and (100) surfaces of TiO₂ single crystals // *Semicond. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 20. – P. 239-243.
17. *Белов А.Н.* Формирование наноструктурированного оксида титана методом анодного окисления двухслойных структур алюминий-титан // *Нанотехника.* – 2010. – Т. 21, № 1. С. 78-81.
18. *Белов А.Н., Гаврилов С.А., Шевяков В.И.* Особенности получения наноструктурированного анодного оксида алюминия // *Российские нанотехнологии.* – 2006. – Т. 1, № 1-2. – С. 223-227.
19. *Tao Hu, Xiang Sun, Hongtao Sun, Mingpeng Yu, Fengyuan Lu, Changsheng Liu Jie Lian.* Flexible free-standing graphene-TiO₂ hybrid paper for use as lithium ion battery anode materials // *Carbon.* – 2013. – Vol. 51. – P. 322-326.
20. *Белов А.Н., Волосова Ю.В., Гаврилов С.А., Редичев Е.Н., Шевяков В.И.* Электрохимический реактор для получения пористых анодных оксидов металлов и полупроводников // *Нанотехника.* – 2011. – № 4. – С. 58-61.

REFERENCES

1. *Scrosati Bruno, Garche Jürgen.* Lithium batteries: Status, prospects and future, *Journal of Power Sources*, 2010, Vol. 195, pp. 2419-2430.
2. *Subrahmanyam Goriparti, Ermanno Miele, Francesco De Angelis, Enzo Di Fabrizio, Remo Proietti Zaccaria, Claudio Capiglia.* Review on recent progress of nanostructured anode materials for Li-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 2014, Vol. 257, pp. 421-443.
3. *Languang Lu, Xuebing Han, Jianqiu Li, Jianfeng Hua, Minggao Ouyang.* A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles, *Journal of Power Sources*, 2013, Vol. 226, pp. 272-288.

4. *Uttam Kumar Sen, Apoorv Shaligram, and Sagar Mitra.* Intercalation Anode Material for Lithium Ion Battery Based on Molybdenum Dioxide, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014, Vol. 6, pp. 14311-14319.
5. *Naoki Nitta, Feixiang Wu, Jung Tae Lee, Gleb Yushin.* Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today*, 2015, Vol. 18, pp. 252-264.
6. *Shiyong Zheng, Yvonne Chen, Yunhua Xu, Feng Yi, Yujie Zhu, Yihang Liu, Junhe Yang, and Chunsheng Wang.* In Situ Formed Lithium Sulfide/Microporous Carbon Cathodes for Lithium-Ion Batteries, *ACS Nano*, 2013, Vol. 7, pp. 10995-11003.
7. *Haifang Ni, Jinkun Liu and Li-Zhen Fan.* Carbon-coated LiFePO₄-porous carbon composites as cathode materials for lithium ion batteries, *Nanoscale*, 2013, Vol. 5, pp. 2164-2168.
8. *Cao Q., Zhang H.P., Wang G.J., Xia Q., Wu Y.P., Wu H.Q.* A novel carbon-coated LiCoO₂ as cathode material for lithium ion battery, *Electrochemistry Communications*, 2007, Vol. 9, pp. 1228-1232.
9. *Chu Liang, Mingxia Gao, Hongge Pan, Yongfeng Liu, Mi Yan.* Lithium alloys and metal oxides as high-capacity anode materials for lithium-ion batteries, *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, Vol. 575, pp. 246-256.
10. *Kedrinский I.A., Yakovlev V.G.* Литий-ионные аккумуляторы [Lithium-ion batteries]. Красноярск: Platina, 2002, 268 p.
11. *Wu Y.P., Rahm E. and Holze R.* Carbon anode materials for lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 2003, Vol. 144, pp. 228-236.
12. *Chuanmin Ruan, Maggie Paulose, Oomman K. Varghese, Gopal K. Mor, Craig A. Grimes* Fabrication of Highly Ordered TiO₂ Nanotube Arrays Using an Organic Electrolyte, *Journal of Physical Chemistry B*, 2005, No. 109, pp. 15754-15759.
13. *Sonoda T., Kato M., Katou K., Asahina T.* Surface structure of Ti-O films formed on pure titanium by anodic oxidation, *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, No. 61, pp. 1091-1096.
14. *Xinsheng Peng, Jingpengwang, Dan F Thomas Aicheng.* Chen Tunable growth of TiO₂ nanostructures on Ti substrates, *Nanotechnology*, 2005, No. 16, pp. 2389-2395.
15. *Mari B., Mollar M., Mechkour A., Hartiti B., Perales M. and Cembrero J.* Optical properties of nanocolumnar ZnO crystals, *Microelectron. J.*, 2004, Vol. 35, pp. 79-82.
16. *Fernandez I., Cremades A., Piqueras J.* Cathodoluminescence study of defects in deformed (110) and (100) surfaces of TiO₂ single crystals, *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, Vol. 20, pp. 239-243.
17. *Belov A.N.* Formirovanie nanostrukturirovannogo oksida titana metodom anodnogo okisleniya dvukhsloynnykh struktur alyuminiy-titan [The formation of nanostructured titanium oxide by the method of anodic oxidation of double-layer structures of aluminum-titanium], *Nanotekhnika [Nanotechnics]*, 2010, Vol. 21, No. 1, pp. 78-81.
18. *Belov A.N., Gavrilov S.A., Shevyakov V.I.* Osobennosti polucheniya nanostrukturirovannogo anodnogo oksida alyuminiya [Features of obtaining of nanostructured-tion of anodic aluminum oxide], *Rossiyskie nanotekhnologii [Russian nanotechnologies]*, 2006, Vol. 1, No. 1-2, pp. 223-227.
19. *Tao Hu, Xiang Sun, Hongtao Sun, Mingpeng Yu, Fengyuan Lu, Changsheng Liu Jie Lian.* Flexible free-standing graphene-TiO₂ hybrid paper for use as lithium ion battery anode materials, *Carbon*, 2013, Vol. 51, pp. 322-326.
20. *Belov A.N., Volosova Yu.V., Gavrilov S.A., Redichev E.N., Shevyakov V.I.* Elektrokhimicheskiy reaktor dlya polucheniya poristykh anodnykh oksidov metallov i poluprovodnikov [Electrochemical reactor for the production of porous anode oxides of metals and semiconductors], *Nanotekhnika [Nanotechnics]*, 2011, No. 4, pp. 58-61.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Белов Алексей Николаевич – Национальный исследовательский университет «МИЭТ»; e-mail: nanointech@mail.ru; 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, 1; кафедра материалов функциональной электроники; д.т.н.; профессор.

Кислицин Максим Валериевич – e-mail: maks20053@inbox.ru; кафедра интегральной электроники и микросистем; инженер.

Строганов Антон Александрович – e-mail: rpsl@yandex.ru; НОЦ «Нанотехнологии в электронике»; ведущий инженер; к.т.н.

Сыса Артем Владимирович – e-mail: lostsleep@yandex.ru; кафедра материалов функциональной электроники; аспирант.

Шевяков Василий Иванович – e-mail: shev@dsd.miee.ru; кафедра интегральной электроники и микросистем; д.т.н.; профессор.

Belov Alexey Nikolaevich – National Research University of Electronic Technology; e-mail: nanointech@mail.ru; 1, Shokin area, Moscow, 124498, Russia; the department of electronics materials functional; dr. of eng. sc.; professor.

Kislitsin Maxim Valerievich – e-mail: maks20053@inbox.ru; the department of integrated electronics and microsystems; engineer.

Stroganov Anton Alexandrovich – e-mail: rpsl@yandex.ru; cand. of eng. sc.; engineer.

Sysa Artyom Vladimirovich – e-mail: lostsleep@yandex.ru; the department of electronics materials functional; postgraduate student.

Shevyakov Vasily Ivanovich – e-mail: shev@dsd.miee.ru; the department of integrated electronics and microsystems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.383.45

**О.А. Агеев, Чон-Гол Юн, Е.Г. Замбург, Ю.Н. Варзарев, В.Н. Джуплин,
Д.А. Голосов, Д.А. Хахулин**

УФ-СЕНСОР НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ZnO, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ AACVD*

Сенсоры УФ-излучения являются важными элементами многих систем в оборонной, авиакосмической и ряде других областей, что влечет за собой стремление повысить чувствительность и надежность, а также снизить стоимость устройства, за счет использования новых подходов к получению активного слоя сенсора. Представлены результаты исследования по разработке сенсора УФ-излучения на основе нанокристаллических пленок ZnO с высокой фоточувствительностью. В качестве метода получения пленок использовались осаждения из парогазовой фазы с участием аэрозоля (AACVD). С помощью изменения температуры и типа подложки контролировалась кристаллографическая структура пленки ZnO, что отражалось в изменении фоточувствительности. Было изготовлено восемь образцов в диапазоне температур 300–450 °С на аморфном оксиде индия-олова (ITO), монокристаллическом кремнии и монокристаллическом сапфире. Получены рентгеновские дифрактограммы нанокристаллических пленок ZnO. Сделаны выводы о влиянии используемой подложки и параметров процесса осаждения на кристаллографическую структуру пленки. Измерены ВАХ и токовременные характеристики полученных образцов. Обнаружена связь между кристаллической структурой пленки и откликом на УФ-излучение. Предполагаемая причина разницы в изменении сопротивления пленок, полученных при различных температурах, – различия в размере зерен и характере их границ. Полученные результаты позволяют сделать вывод об оптимальных режимах формирования пленки ZnO для сенсора УФ-излучения методом AACVD. Кроме того, проведено сравнение полученного сенсора с устройствами, известными из литературы. Это позволило выделить достоинства полученного УФ-сенсора, а также недостатки, которые необходимо устранить для перехода к промышленному внедрению результатов исследования.

Нанотехнологии; ZnO; нанокристаллические пленки; УФ-сенсор; AACVD.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение № 14-08-90010 Бел_а), БРФФИ в рамках научного проекта № Т14Р-165.