

26. Gittleman, J.L. Magnetic properties of granular nickel films / J.L. Gittleman, Y. Goldstein, S. Bozovski // Phys. Rev. B. – 1972. – Vol. 5. – 3609–3620.
27. Extraordinary Hall effect and giant magnetoresistance in the granular Co-Ag system / P. Xiong [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1992. – Vol. 69. – P. 3220 – 3223.
28. Pakhomov, A.B. Observation of giant Hall effect in granular magnetic films / A.B. Pakhomov, X. Yan, Y. Xu // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79. – P. 6140 – 6142.
29. Effect of annealing on the giant Hall effect / X.N. Jing [et al.] // Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 53. – P. 14032–14035.
30. Больных, И.К. Температурное и магнетополовое смещение длинноволнового края фотоэлектрических эффектов в HgCr_2Se_4 / И.К. Больных, Г.Н. Север // ФТТ. – 1995. – Т.37, № 2. – 570–573.

НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДИОКСИДА ТИТАНА ДЛЯ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ

М. А. Евсейчик¹, С. Е. Максимов², Л. С. Хорошко^{1,2}

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: m.yauseichyk@gmail.com*

²⁾ *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: khoroshko@bsu.by*

Наноструктурированные поверхности диоксида титана получены химическим и термическим окислением титановой фольги. Формирование фазы TiO_2 подтверждено результатами рентгеновского дифракционного анализа. Показана возможность формирования гетероструктуры $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ термическим испарением прекурсора меламина с различной толщиной слоя графитоподобного нитрида углерода, причем наноструктурирование поверхности титановой фольги способствует формированию более толстых покрытий. Обсуждается перспектива использования гетероструктур $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ для экологического катализа.

Ключевые слова: диоксид титана; графитоподобный нитрид углерода; наноструктурированная поверхность; полупроводниковые гетероструктуры.

NANOSTRUCTURING OF THE TITANIUM DIOXIDE SURFACE FOR HETEROPHASE PHOTOCATALYTIC ACTIVE COATINGS

M. A. Yauseichyk¹, S. E. Maksimov², L. S. Khoroshko^{1,2}

¹⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus,*

²⁾ *Belarusian State University Informatics and Radioelectronics, P. Browka Str. 4, 220013 Minsk, Belarus*

Corresponding author: M. A. Yauseichyk (m.yauseichyk@gmail.com)

Nanostructured titanium dioxide surfaces were obtained by chemical and thermal oxidation of titanium foil. The formation of the TiO_2 phase was confirmed by the results of X-ray diffraction analysis. The possibility of forming a $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ heterostructure by thermal evaporation of melamine precursor with different thicknesses of a graphite-like carbon nitride layer is shown, and nanostructuring of the titanium foil surface promotes the

formation of thicker coatings. The prospect of using $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ heterostructures for ecological catalysis is discussed.

Key words: titanium dioxide; graphite-like carbon nitride; nanostructured surface; semiconductor heterostructures.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды и быстрое истощение запасов ископаемого топлива, вызванное активным ростом промышленного производства, стали серьезными проблемами для человечества. Эти проблемы привели многих исследователей к необходимости создания экологически чистых материалов, которые могут разлагать загрязняющие вещества и производить «зеленую» энергию. Материалы на основе диоксида титана (TiO_2) являются одним из широко используемых полупроводниковых материалов для экологических и энергетических приложений благодаря их уникальным химическим, оптическим и электрическим свойствам. Также диоксид титана известен своими фотокаталитическими и антибактериальными свойствами при активации УФ-излучением и находит множество применений в различных областях, таких как фотокатализ, газоанализ, антибактериальные и защитные покрытия, просветляющие покрытия, диэлектрические пленки и др [1–3]. Основным недостатком TiO_2 является слабая чувствительность к излучению видимого диапазона, сенсибилизация к которому может быть достигнута путем формирования гетероструктур с материалами, имеющими меньшую ширину запрещенной зоны. Одним из перспективных материалов для такого применения является графитоподобный нитрид углерода $\text{g-C}_3\text{N}_4$, который наряду с фотокаталитической, проявляет также антибактериальную активность [4]. Слои $\text{g-C}_3\text{N}_4$ могут быть получены на различных подложках методом термического осаждения азотсодержащих органических веществ – меламина, тиомочевины, мочевины, цианамида и дицианамида [5, 6].

Целью данной работы является подготовка наноструктурированной поверхности диоксида титана для последующего формирования фотокаталитически активных материалов на основе гетероструктур $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходным материалом для формирования структурированного TiO_2 являлась титановая фольга ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91). Для получения наноструктурированной поверхности были выбраны химическое и термическое окисление, как наиболее подходящие для поточной реализации и обладающие достаточной воспроизводимостью. Для очистки поверхности фольги от загрязнений подложки обезжиривали в мыльно-содовом растворе, затем промывали в проточной дистиллированной воде и погружали на 10 мин в 10 % раствор концентрированной HNO_3 для удаления химических и органических загрязнений.

Химическое окисление подложек проводили обработкой в кипящем 30 % растворе перекиси водорода (H_2O_2) в течение 10 мин, либо в концентрированном гидроксиде натрия (NaOH) при комнатной температуре в течение 20 мин. После химического окисления подложки промывали проточной дистиллированной водой. Термическое окисление проводили в муфельной печи на воздухе при температуре 550 °С в течение 30 мин, после чего подложки постепенно охлаждали до комнатной температуры в печи. На подложках с TiO_2 далее термическим испарением меламина в загермети-

зированном тигле при 550 °С формировали пленки графитоподобного нитрида углерода.

Структуру и фазовый состав пленок исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеновского дифракционного анализа (РДА).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам РДА основной фазой для оксидного слоя всех исследованных образцов после химического и/или термического окисления является искомый TiO_2 (таблица 1), определение полиморфной модификации требует проведения дополнительных исследований ввиду малых толщин формируемых оксидных пленок.

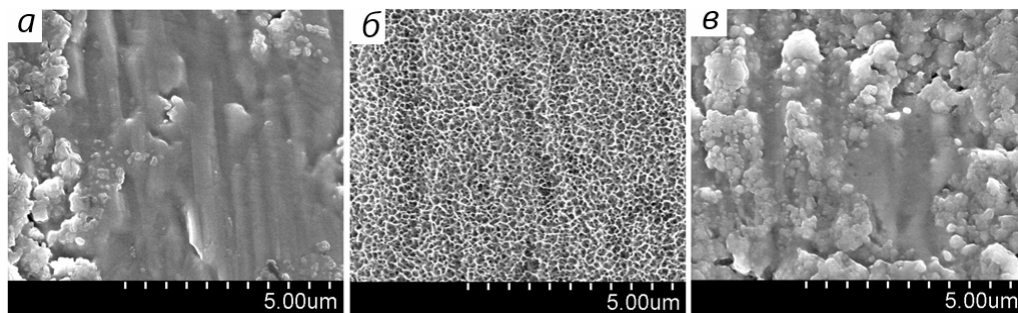
Таблица 1

Результаты РДА для образцов фольги после отжига (*а*), химического окисления в растворе H_2O_2 и отжига (*б*), после химического окисления в растворе NaOH и отжига (*в*)

<i>а</i>			<i>б</i>			<i>в</i>		
2 θ , нм	I, отн.ед.	Фаза*	2 θ , нм	I, отн.ед.	Фаза*	2 θ , нм	I, отн.ед.	Фаза*
44,56	1294	TiO_2	44,65	1103	TiO_2	44,65	1103	TiO_2
46,69	414	TiO_2	46,84	423	TiO_2	46,78	375	TiO_2
62,14	426	TiO_2	62,23	431	TiO_2	62,11	409	TiO_2

*полиморфная модификация требует уточнения

На рис. 1 представлены РЭМ-снимки поверхности образцов после химического и термического окисления. Поверхность после отжига без химического окисления содержит рельефные участки окисления по исходным дефектам фольги. Для образца после окисления в растворе H_2O_2 и отжига наблюдается наиболее структурированная поверхность с формированием игольчатых фрагментов. Окисление перед отжигом в NaOH также приводит к формированию островковых фрагментов на месте дефектов проката при отжиге, однако они становятся более рельефными, а структура поверхности – менее однородной по сравнению с термическим окислением без предварительной химической обработки.



РЭМ-изображения поверхности фольги со слоем диоксида титана, полученного (*а*) после отжига, (*б*) после химического окисления в растворе H_2O_2 и отжига, (*в*) после химического окисления в растворе NaOH и отжига

Осажденные на поверхность с наноструктурированным TiO_2 пленки графитоподобного нитрида углерода имеют большую толщину, чем осажденные на поверх-

ность той же фольги без предварительной обработки (контрольный образец). При увеличении степени неоднородности рельефа поверхности, толщина получаемой пленки также возрастает, в табл. 2 показаны значения толщины пленок $\text{g-C}_3\text{N}_4$ в зависимости от используемой подложки. По сравнению с пленкой на необработанной фольге, толщина покрытия возрастает более чем в три раза для образца после химического окисления в перексиде водорода и отжига (маркировка *б*). При этом, даже предварительное только термическое окисление титана способствует увеличению толщины покрытия $\text{g-C}_3\text{N}_4$ более чем на 60 %.

Таблица 2

Режимы получения и результаты исследования гетероструктур $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$

Маркировка образца (см. рис. 1, табл. 1)	Подложка	Методы структурирования	Толщина пленки $\text{g-C}_3\text{N}_4$
<i>а</i>	Ti (99,7 %)	термическое окисление	496 нм
<i>б</i>	Ti (99,7%)	химическое окисление (H_2O_2), термическое окисление	999 нм
<i>в</i>	Ti (99,7 %)	химическое окисление (NaOH), термическое окисление	622 нм
контрольный	Ti (99,7 %)	—	303 нм

Получаемые гетероструктуры $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ интересны для получения эффективных фотокатализаторов, сенситизированных к видимой области спектра, для очистки воды от органических загрязнений. Структуры на основе графитоподобного нитрида углерода являются перспективными для формирования, в том числе, и антибактериальных покрытий [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность увеличения толщины пленки графитоподобного нитрида углерода, формируемой термическим испарением на подложке титана, проведением предварительного наноструктурирования поверхности титановой фольги. Так химическое окисление в перексиде водорода или гидроксиде натрия позволяет добиться увеличения толщины покрытия в 2–3 раза, кроме того, травление в H_2O_2 , обеспечивает после термической обработки формирование развитой игольчатой поверхности диоксида титана, что также может быть интересно для формирования фотокаталитически активных материалов. Предварительное термическое окисление титановой фольги позволяет получать гетероструктуры $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ с увеличенной толщиной покрытия графитоподобного нитрида углерода. Полученные результаты могут быть использованы для получения новых перспективных материалов, применяемых для фотокаталитической очистки воды от органических и бактериальных загрязнителей, в том числе, для проточных систем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф21УЗБГ-002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ашуркевич, А.Н. Формирование и свойства фотокаталитически толстых пленок с диоксидом титана / А.Н. Ашуркевич, И.А. Николаенко, В.Е. Борисенко // Доклады БГУИР. – 2012. – Т. 61, № 6. – С. 50–55.
2. Фотокаталитическая активность покрытий из наноструктурированного диоксида титана на алюминиевой подложке / А.В. Баглов [и др.] // Неорганические материалы. – 2017. – Т.53, № 11. – С. 1201–1205.
3. Preparation and Antibacterial Properties of Composite Nanostructures from Titanium and Copper Oxides // N.M. Denisov [et al.] // Inorganic Materials. – 2016. – Vol. 52, N 5. – P. 523–528.
4. Структурные и фотолюминесцентные свойства графитоподобного нитрида углерода / А.В. Баглов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2020. – Т.54, № 2. – С.176–180.
5. Синтез графитоподобного нитрида углерода на поверхности наночастиц Fe_3O_4 / Е.Б. Чубенко [и др.] // Неорганические материалы. – 2021. – Т.57, № 2. – С. 144–149.
6. Наноструктурный композит для фотокаталитического применения $\text{O-g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$, полученный синтезом О-допированного нитрида углерода на поверхности наночастиц анатаза / М.Э. Бондаренко [и др.] // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2020. – Т.18, № 2. – С. 265–282.
7. Оценка интегральной токсичности фотокатализаторов на основе графитоподобного нитрида углерода в люминесцентном тесте / Е. Б. Чубенко [и др.] // Кинетика и катализ. – 2022. – Т. 63, №2. – С. 187–192.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ РАССЕЯНИЯ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

О. Г. Жевняк

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь
e-mail: Zhevnyakol@tut.by*

В основе работы современных элементов флеш-памяти лежит перенос электронов в проводящем канале кремниевых МОП-транзисторов с плавающим затвором. Быстродействие этих элементов в режиме считывания информации определяется подвижностью электронов при их дрейфе в данном канале. В настоящей работе изучено влияние на подвижность электронов в элементах флеш-памяти двух основных механизмов рассеяния на фононах и на ионах примеси путем численного моделирования электронного переноса методом Монте-Карло. Показано, что с ростом энергии электронов существенно возрастает влияние на подвижность электронов фононных механизмов рассеяния, что приводит к уменьшению величины подвижности.

Ключевые слова: флеш-память; МОП-транзистор; подвижность электронов, рассеяние на фононах.

SIMULATION OF DIFFERENT SCATTERING MECHANISM'S EFFECT ON ELECTRON MOBILITY IN FLASH-MEMORY CELLS

O. G. Zhevnyak

*Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: O. G. Zhevnyak (Zhevnyakol@tut.by)*

The operation of modern flash memory elements is based on the electron transport in conducting channel of silicon MOSFET's with a floating gate. Performance of these ele-