

Н.Х.Ибраев, Д.А.Афанасьев, Т.М.Сериков, Г.С.Аманжолова

*Институт молекулярной нанофотоники,
Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: serikov-timur@mail.ru)*

Получение пленок титана методом магнетронного распыления для синтеза пористых пленок диоксида титана

В статье приведены результаты исследования микроструктуры пленок, полученных с помощью магнетронной распылительной системы (МРС), собранной на базе ВУП-4. Разработанная МРС позволяет получать пленки с высокой скоростью осаждения с минимальными видимыми дефектами в структуре. Контроль скорости распыления производился за счет изменения напряжения распыления, которое приводит к изменению тока, что увеличивает и/или понижает степень ионизации газа, и выбиванию атомов мишени. Установлено, что с увеличением напряжения от 300 до 600 В скорость роста пленок увеличивается от 2,4 до 4 ангстрем в секунду. Установлено, что при напряжении около 400 В гранулы, составляющие пленку, имеют более крупную структуру, чем в пленках, полученных при 500 и 600 В. Проведен элементный анализ пленок, полученных методом МРС.

Ключевые слова: титановые пленки, магнетронное распыление, диоксид титана, синтез, микроструктура.

Введение

Диоксид титана, благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, широко используется в молекулярной электронике [1], солнечной энергетике [2–5] и фотокатализе [6]. В последние годы для получения наноструктур на основе диоксида титана используют такие методы синтеза, как гидротермальный [7], золь-гель [8], химическое осаждение из паровой фазы [9], методы прямого окисления титана [10] и многие другие методы [11–13]. В зависимости от используемого метода синтеза можно получить наноструктуры диоксида титана различной морфологии, такие как наночастицы, нанотрубки, нанопровода и наностержни [4, 5, 7, 12, 13]. Существование различных методов синтеза наноструктур позволяет использовать их избирательно, в зависимости от необходимых свойств и области практического использования данного материала. Одной из наиболее важных областей практического использования является использование пористых пленок TiO_2 в качестве фотокатода сенсibilизированных красителем солнечных ячеек (СКСЯ). Для получения высокоэффективных СКСЯ используемые пленки TiO_2 должны обладать высокой удельной поверхностью и хорошими электротранспортными свойствами. Среди существующих наноструктур TiO_2 такими свойствами обладают пленки, образованные нанотрубками. Для нанотрубок TiO_2 наблюдается высокая удельная поверхность и одномерный транспорт электронов вдоль стенок [14, 15]. Одномерный транспорт приводит к уменьшению времени переноса электронов от центров генерации заряда к электроду.

Нанотрубки диоксида титана можно получить методом двухстадийного анодирования металлического титана во фторосодержащем электролите [16]. Однако дальнейшее использование пленок, образованных нанотрубками TiO_2 , затруднено в связи с необходимостью получения их на прозрачных стеклах с проводящим слоем ИТО (оксиды олова и индия) или FTO (фторированный оксид олова). Этого можно добиться двумя путями:

1) получить методом электрохимического анодирования титановой фольги пористую пленку с нанотрубками диоксида титана. Химическим или другим методом отделить пленку TiO_2 . Затем химически привить пленку на поверхность стекла с проводящим слоем ИТО или FTO [17];

2) альтернативным методом является получение металлического титана на поверхности стекла с проводящим слоем ИТО или FTO. Затем путем электрохимического анодирования синтезируется пористая пленка TiO_2 . В случае использования данного метода принципиальным является получение однородных пленок титана заданной толщины.

Существенным недостатком первого метода является сложность процессов отделения пористой пленки TiO_2 от титановой фольги и химического прививания к подложке с проводящим слоем FTO. Данные процессы усложняются из-за механической хрупкости пленки TiO_2 .

Использование второго метода является более привлекательным. Сложность данного метода заключается в необходимости получения пленки металлического титана на поверхности стеклянной подложки с проводящим слоем. Полученные пленки, в первую очередь, должны обладать высокой чистотой и однородностью.

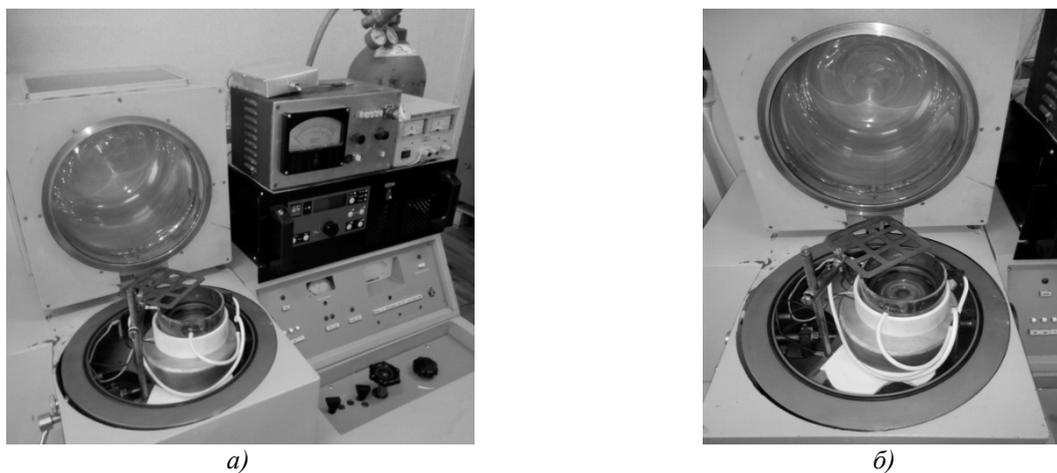
На сегодняшний день для получения пленок металлов используют различные физические и химические методы, такие как термическое испарение, молекулярно-лучевая эпитаксия, электронно-лучевое испарение, магнетронное распыление, лазерная абляция и т.д. [18–22]. Анализ существующих методов показал, что для получения пленок титана заданной толщины может быть использован метод магнетронного распыления [23]. Повторяемость результатов при соблюдении технических условий распыления также является преимуществом метода магнетронного распыления.

Целью настоящей работы является изготовление однородных пленок титана заданной толщины на подложках с проводящим покрытием FTO для получения из них пористых пленок TiO_2 .

Эксперимент

Для достижения поставленной цели была реализована магнетронная распылительная система (MPC) на базе вакуумного универсального поста ВУП-4. ВУП-4 предназначен для препарирования объектов в вакууме до 10^{-5} мм рт.ст. Полученные при высоком вакууме пленки имеют высокую степень чистоты.

Магнетронная распылительная система, собранная на базе вакуумного универсального поста приведена на рисунке 1.



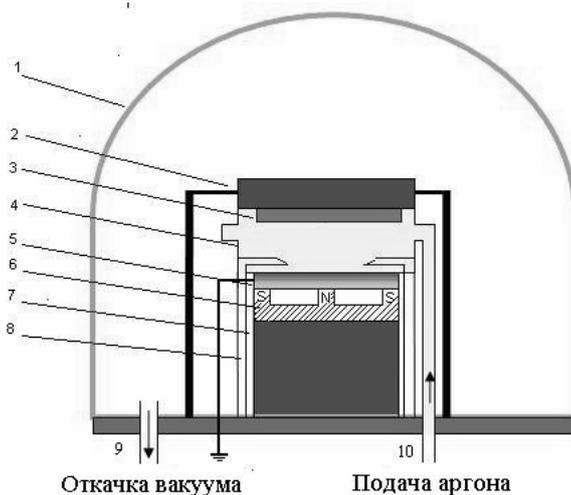
а) внешний вид; б) магнетронная распылительная камера

Рисунок 1. Внешний вид магнетронного распылителя, собранного на базе ВУП-4

Основными элементами электрической цепи магнетронной распылительной системы является плоский катод, изготовленный из титана, и анод, устанавливаемый по периметру катода. Магнитная система собрана на основе постоянного магнита. Вся система магнетронного распыления установлена внутри камеры на широкий алюминиевый цилиндр диаметром 25 см и высотой 8 см, который используется для отвода тепла. Принцип работы магнетронных распылительных систем подробно описан в работе [22]. Он основан на торможении электронов в скрещенных электрических и магнитных полях. Как только на анод и катод подается напряжение с известной частотой, между ними возникает неоднородное электрическое поле и появляется тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Одним из преимуществ метода является то, что большая часть энергии электрона используется для ионизации и возбуждения атомов аргона. Это значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и концентрацию положительных ионов у поверхности мишени. Данное обстоятельство приводит к повышению интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительному росту скорости осаждения покрытия.

Схема магнетронного распылителя приведена на рисунке 2. Данная магнетронная система оснащена источником электропитания для MPC серии APEL-M-5DC-1000-2 (Россия) с возможностью

работы в импульсном режиме до 100 кГц. Максимальная выходная мощность 5 кВт. Амплитуда поджигающего импульса 1000 В. Отличительной чертой разработанной МРС является контроль толщины напыляемых пленок в процессе распыления с помощью массочувствительного кварцевого резонатора. При сборке системы измерения толщины использовался кварцевый резонатор типа HCMOS/TTL в корпусе HO-21C с частотой 10 МГц. Перед началом процесса распыления кварцевый резонатор подключался к частотомеру. В процессе распыления через одинаковый интервал производилась запись частоты. Измеренная разность частоты позволяет определить не только толщину пленки, но и скорость ее нанесения [23], что дает возможность получить пленку заданных размеров и при необходимости изменить условия напыления.



- 1 — колпак вакуумной установки; 2 — держатель подложки; 3 — подложка, на которую осаждается пленка;
 4 — стеклянная камера с отверстиями для подачи аргона, поддержания необходимого давления и распределения аргона в объеме поджига магнетронного разряда; 5 — мишень (катод);
 6 — постоянный магнит; 7 — изолятор; 8 — анод; 9 — откачка вакуума;
 10 — подача аргона в камеру

Рисунок 2. Схема магнетронного распылителя

Для получения пленок титана в качестве подложки использовались стекла с проводящим слоем. Диаметр распыляемой мишени составлял 100 мм, толщина — не более 0,5 см. Расстояние от мишени до подложки составляет 4 см. Мишень изготовлена из технического титана марки ВТ-1,0 (ГОСТ 19807-91). Получение высокого вакуума на ВУП-4 проводится в соответствии с инструкцией (Поствакуумный универсальный ВУП-4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации). При достижении необходимого вакуума (10^{-4} мм.рт.ст.) производится напуск рабочего газа до 10^{-2} мм.рт.ст. (аргон 99,8 %, ГОСТ 10157-79.) В камеру из установленного рядом баллона с редуктором подавалось напряжение поджига на магнетрон порядка 1 кВ. При подаче напряжения поджига на магнетрон ток отсутствует до тех пор, пока не подан аргон в необходимой концентрации. Напуск аргона производится через тонкий натекагель, который входит в стандартную комплектацию ВУП-4. Напряжение на катоде варьировалось от 100 до 600 В в импульсном режиме, частота импульсов 100 кГц, ток разряда менялся в диапазоне от 0,10 до 0,2 А. Длительность напыления для каждого образца составляла 10 мин. Исследование микроструктуры и поперечного скола образцов пленок титана осуществлялось с помощью электронного растрового микроскопа Mira 3LMU (Tescan, Чехия). Скорость распыления определяли по показаниям кварцевого резонатора.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены данные о толщине и скорости напыления пленок титана. Толщина пленок и микроструктура исследовались с помощью электронного растрового микроскопа Mira 3LMU (Tescan, Чехия).

Толщина и скорость напыления при различных напряжениях распыления

№	Напряжение, В	Ток, А	Частота импульсов, кГц	Толщина пленки, нм	Скорость напыления, Å/сек
1	100	≈ 0,10	100	0	0
2	200	≈ 0,12	100	0	0
3	300	≈ 0,14	100	146	2,4
4	400	≈ 0,15	100	174	2,9
5	500	≈ 0,17	100	212	3,5
6	600	≈ 0,20	100	242	4

Как видно из таблицы 1, при низком напряжении процесса распыления не происходит, так как не хватает энергии для ионизации газа и выбивания атомов с мишени. При напряжении 100 В отсутствует электрический разряд. После достижения напряжения 300 В между мишенью и подложкой появляется тлеющий разряд. При распылении при этом напряжении на подложке образуется пленка, толщина которой составляет 146 нм. Была определена величина скорости напыления. В рассматриваемом случае скорость напыления составила 2,4 ангстрема в секунду. При увеличении напряжения распыления скорость роста пленок увеличивается. Использование кварцевого резонатора показало, что процесс напыления происходит равномерно.

В таблице 2 приведены результаты исследования морфологии поверхности пленок, распыленных при разных напряжениях. Из представленных данных видно, что при напряжении 300 В образуется пленка с гранулированной микроструктурой. Размер гранул достигает 2,5–3,5 мкм. Поперечный скол пленки также показывает неоднородность получаемой пленки (табл. 2). С ростом температуры происходит уменьшение размеров гранул в напыленной пленке титана. Начиная с напряжения 400 В пленка имеет однородную микроструктуру с размером гранул менее 300 нм. Наиболее однородной микроструктурой обладает пленка, полученная при напряжении 600 В. Размер гранул для данной пленки минимален по сравнению с пленками, полученными при других рабочих напряжениях.

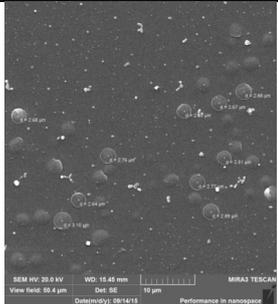
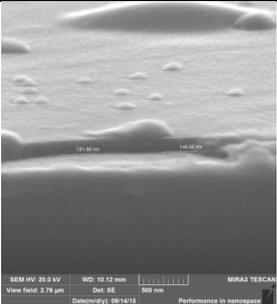
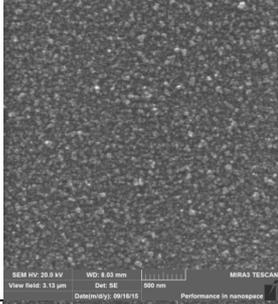
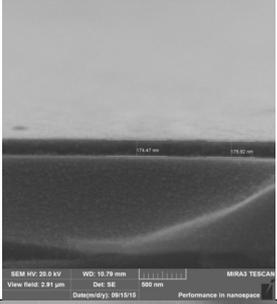
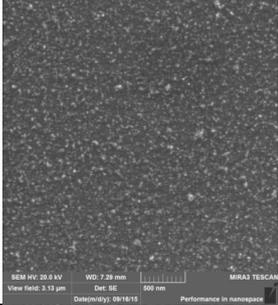
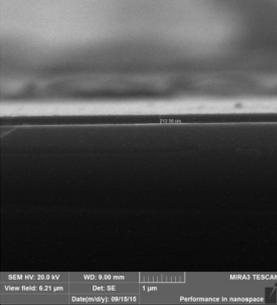
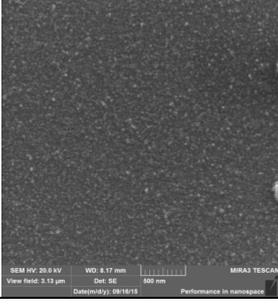
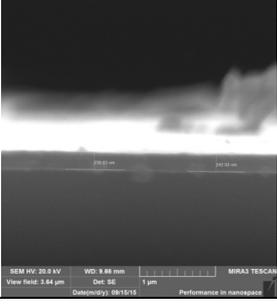
Таким образом, в результате варьирования напряжения распыления были получены пленки титана с различной скоростью напыления и различными размерами гранул. Оптимальным является использование напряжения величиной 600 В. Напряжение выше 600 В приводит к резкому росту температуры в рабочем объеме, и поэтому такие напряжения не использовались для работы.

Для напыленных пленок был проведен элементный анализ с помощью энергодисперсионного анализатора INCAPentaFET-x3 (Oxford Instruments, Англия). Энергодисперсионный анализ пленки, полученный при режиме магнетронного распыления — напряжение от 300 до 600 В, частота импульсов 100 кГц, время распыления — по 10 минут, показал идентичный результат, который приведен на рисунке 3. Была построена многослойная карта и произведено распределение элементов на поверхности пленки (рис. 4). Из представленных данных видно, что на поверхности пленки присутствуют титан, углерод, натрий, магний, кремний, кислород и кальций. Наличие последних обусловлено тем, что в качестве подложки было использовано стекло.

На рисунке 5 приведен результат энергодисперсионного анализа пленки, полученной при магнетронном распылении.

В составе пленки присутствуют титан Ti, а также C, Na, Ca, Si, O, Mg, которые относятся к элементам использованной подложки — стекла (оксид кремния, натрий, кальций). Наличие алюминия Al в составе пленки титана объясняется тем, что при распылении мишени использовался технический титан марки ВТ-1,0, в котором может присутствовать Al в количестве до 0,5 %.

Морфология поверхности и поперечный скол пленок титана, полученных магнетронным распылением

Напряжение, В	Поверхность образцов	Поперечный скол
300		
400		
500		
600		

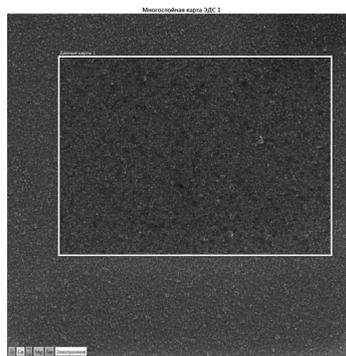


Рисунок 3. Многослойная карта поверхности пленки титана

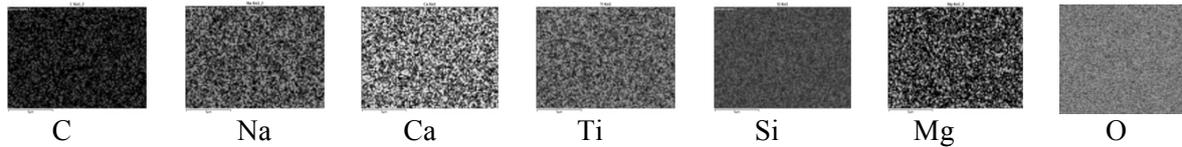


Рисунок 4. Распределение элементов на поверхности пленок

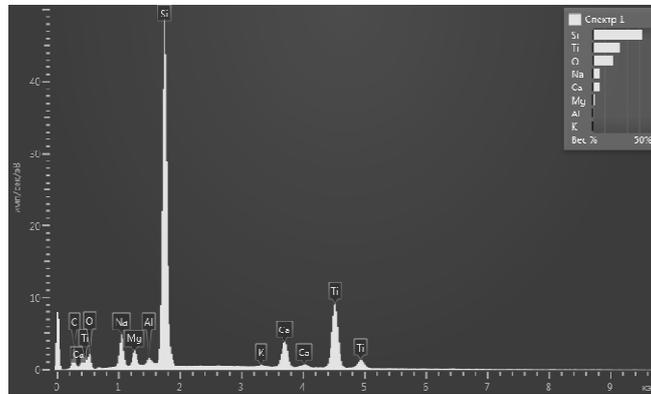


Рисунок 5. Энергодисперсионный анализ пленки титана, полученной методом магнетронного распыления

Для получения нанотрубок диоксида титана пленки титана подвергались электрохимическому анодированию. Использовался электролит с низкой концентрацией NH_4F – 0,2 % мас. и H_2O – 2 % мас. в этиленгликоле. Кроме того, при анодировании использовалось более низкое напряжение, так как при напряжениях выше 20 В наблюдается либо частичное, либо полное отслаивание пленки титана от поверхности стекла.

Сравнение результатов, приведенных на рисунке 6 и в таблице 2 (600 В), показывает, что анодирование приводит к изменению морфологии поверхности пленки. Происходит формирование пористой структуры пленки TiO_2 . Анодирование в течение 20 минут и при напряжении 20 В приводит к полному окислению титановой пленки и образованию пористой структуры TiO_2 . Однако нанотрубки здесь имеют более искаженную структуру, чем при анодировании титановой фольги. Возможно, это связано с тем, что при магнетронном распылении титана пленка имеет гранулированную структуру. Поверхность нанотрубок диоксида титана, полученных при анодировании пленки, осажденных методом МРС, сильно загрязнена побочными продуктами, устранение которых возможно при ультразвуковой обработке в органическом растворителе.

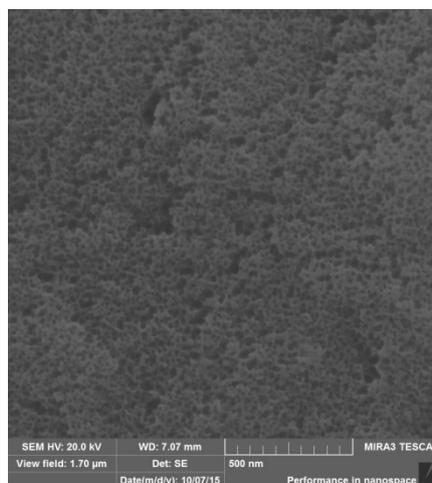


Рисунок 6. СЭМ-изображения нанотрубок диоксида титана, полученных на стеклянных подложках с проводящим слоем FTO

По результатам работы была разработана и создана установка для получения пленок металлов методом магнетронного распыления. Преимуществом разработанной установки является возможность контроля толщины пленок в процессе распыления. Система измерения толщины пленки в процессе ее напыления реализована на основе массочувствительного кварцевого резонатора. Она позволяет измерять толщину пленки в диапазоне от 1 нм до единиц микрометров. Установка позволяет получать тонкие пленки металлов с различной скоростью нанесения металла на поверхность подложки. Скорость нанесения определяется рабочим напряжением. Установлено, что с увеличением напряжения от 300 до 600 В скорость роста пленок увеличивается от 2,4 ангстрема до 4 ангстрем в секунду. При использовании разработанной установки были получены пленки титана с различными структурой и скоростью напыления. Исследована морфология поверхности пленок. Выявлено, что при напряжении около 300 В пленка имеет ярко выраженную гранулированную структуру. При напряжениях выше 400 В образуется однородная бездефектная пленка титана.

Список литературы

- 1 Yuxin T., Yanyan Zh., Jiyang D. Mechanical Force-Driven Growth of Elongated Bending TiO₂-based Nanotubular Materials for Ultrafast Rechargeable Lithium Ion Batteries // *Advanced materials*. — 2014. — Vol. 26. — № 35. — P. 6111–6118.
- 2 Hui W., Li L., Chen C. Anodic TiO₂ Nanotube Arrays for Dye-Sensitized Solar Cells Characterized by Electrochemical Impedance Spectroscopy // *Ceramics International*. — 2012. — Vol. 38. — № 8. — P. 6253–6266.
- 3 Chang H., Chen C., Kao M., Chien S. Photoelectrode thin film of dye-sensitized solar cell fabricated by anodizing method and spin coating and electrochemical impedance properties of DSSC // *Applied Surface Science*. — 2013. — Vol. 275. — P. 252–257.
- 4 Xi M., Zhang Y., Long L., Li X. Controllable hydrothermal synthesis of rutile TiO₂ hollow nanorod arrays on TiCl₄ pretreated Ti foil for DSSC application // *Journal of Solid State Chemistry*. — 2014. — Vol. 219. — P. 118–126.
- 5 Li S., Liu Y., Zhang G., Zhao X., Yin J. The role of the TiO₂ nanotube array morphologies in the dye-sensitized solar cells // *Thin Solid Films*. — 2011. — Vol. 520. — № 2. — P. 689–693.
- 6 Kandiel T., Robben L., Alkaimad A., Bahnemann D. Brookite versus anatase TiO₂ photocatalysts: phase transformations and photocatalytic activities // *Photochemical and Photobiological Sciences*. — 2013. — Vol. 12. — № 4. — P. 602–609.
- 7 Yang J., Mei S., Ferreira J.M.F. Hydrothermal synthesis of TiO₂ nanopowders from tetraalkylammonium hydroxide peptized sols // *Materials Science and Engineering: C*. — 2001. — Vol. 15. — № 1. — P. 183–185.
- 8 Sahni S., Bhaskar Reddy S., Murty B.S. Influence of process parameters on the synthesis of nano-titania by sol-gel route *Materials Science and Engineering A*. — 2007. — Vol. 452. — P. 758–762.
- 9 Nam S.H., Hyun J.-S., Boo J.-H. Synthesis of TiO₂ thin films using single molecular precursors by MOCVD method for dye-sensitized solar cells application and study on film growth mechanism // *Materials Research Bulletin*. — 2012. — Vol. 47. — № 10. — P. 2717–2721.
- 10 Pierson H.O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology and Applications*. — New Jersey, 1992. — P. 235.
- 11 Yan X.-M., Kang J., Gao L., Xiong L., Mei P. Solvothermal synthesis of carbon coated N-doped TiO₂ nanostructures with enhanced visible light catalytic activity // *Applied Surface Science*. — 2013. — Vol. 265. — P. 778–783.
- 12 Zhu Y., Li H., Koltypin Y., Hacoheh Y.R., Gedanken A. Sonochemical synthesis of titania whiskers and nanotubes // *Chemical Communications*. — 2001. — Vol. 24. — P. 2616–2617.
- 13 Wu X., Jiang Q.Z., Ma Z.F., Fu M., Shangguan W.F. Synthesis of titania nanotubes by microwave irradiation // *Solid State Communications*. — 2005. — Vol. 136. — № 9. — P. 513–517.
- 14 Pugazhentirana N., Murugesana S., Anandan S. *Journal of Hazardous Materials*. — 2013. — Vol. 263. — P. 541–549.
- 15 Wu H., Li L., Chen C., Diao E. Anodic TiO₂ Nanotube Arrays for Dye-Sensitized Solar Cells Characterized by Electrochemical Impedance // *Spectroscopy Ceramics International*. — 2012. — Vol. 38. — P. 6253–6266.
- 16 Сериков Т.М., Ибраев Н.Х., Ильина Л.Ф., Смагулов Ж.Х. Влияние условий синтеза на поверхностные свойства пленок, образованных нанотрубками // *Коллоиды и поверхности – 2015: Тезисы докл. IV Междунар. науч. конф.* — Алматы: Изд-во «Арда», 2015. — С. 73.
- 17 Liua G., Hoivika N., Wangb X., Lub S., Wanga K., Jakobsena H. Photoconductive, free-standing crystallized TiO₂ nanotube membranes // *Electrochimica Acta*. — 2013. — Vol. 93. — P. 80–86.
- 18 Панфилов Ю. Нанесение тонких пленок в вакууме // *Технологии в электронной промышленности*. — 2007. — № 3. — С. 76–80.
- 19 Григорьев Ф.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление в технологии микроэлектроники. — М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики. — 2003. — С. 133.
- 20 Кузано Д.А. Исследование тонких пленок и электрооптические эффекты // *Физика и химия соединений* / Под ред. С.А. Медведева. — М.: Мир, 1970. — С. 537–578.
- 21 Болгова Т.Г. Получение и свойства тонких пленок сульфида кадмия, легированных щелочными металлами и галогенами (Cl, Br). — Воронеж, 2009. — С. 126.
- 22 Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок. — Казань, 2010. — С. 87.
- 23 Ежовский Ю.К. Поверхностные наноструктуры – перспективы синтеза и использования // *Соровский образовательный журнал*. — 2000. — Vol. 6. — № 1. — С. 56–63.

24 Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. — М.: Радио и связь, 1982. — 326 с.

25 Кельнер Р. Аналитическая химия. Проблемы и подходы. — М.: Мир, 2004. — 607 с.

Н.Х.Ибраев, Д.А.Афанасьев, Т.М.Сериков, Г.С.Аманжолова

Кеуекті титан диоксидін синтездеу үшін магнетронды тозандандыру әдісімен титан қабыршақтарын алу

Мақалада ВУП-4 базасында құрастырылған магнетронды тозандандыру жүйесінің (МТЖ) көмегімен алынған қабыршақтардың микроқұрылымын зерттеу кезіндегі нәтижелер берілген. Жобаланған МТЖ қабыршақтардың құрылымында айтарлықтай көзге көрінетін ақаулар байқалмайтын және өте жоғары жылдамдықта тұндыруға мүмкіндік береді. Қабыршақтарды тұндыру жылдамдығы тозандандыру кернеуін өзгерту арқылы реттелді. Кернеу шамасы 300 ден 600 В дейін жоғарылатқанда қабыршақтарды тұндыру жылдамдығы 2,4 А/с-тан 4 А/сек дейін жоғарлайтыны анықталды. Кернеудің шамасы 300 В кезінде қабыршақтарды құрайтын түйіршектердің көлемі шамамен 2,5–3,5 мкм тең. Тозандандыру кезінде кернеудің шамасы 400–600 В кезінде алынған қабыршақтардың құрылымы біркелкі және ақаусыз екені анықталды. МТЖ әдісімен алынған қабыршақтардың элементтік талдауы жүргізілді. Магнетронды тозандандыру кезінде алынған қабыршақтарды анодтаудан кейін алынған кеуекті қабыршақтардың қалыптасуы келтірілген.

N.Kh.Ibrayev, D.A.Afanasyev, T.M.Serikov, G.S.Amanzholova

Fabrication of titanium films by magnetron sputtering for synthesizing porous films titanium dioxide

In this paper presents the results of a microstructure study of the films obtained by magnetron sputtering system (MSS). This system collected on the basis of VUP-4. The developed MSS produces films with high deposition rate with a minimum of visible defects in the structure. Spray rate control performed by changing the sputtering voltage, which leads to a change in current, which increases and/or reduces the degree of ionization of the gas and dislodge target atoms. It is found that with increasing voltage of 300 to 600 V in the film growth rate increased from 2.4 to 4 angstroms per second. It was found that the stress of about 400 V in the granule was the film have a larger structure than the films obtained at 500 V and 600 V. An elemental analysis of the films produced by the energy dispersive analysis.

References

- 1 Yuxin T., Yanyan Zh., Jiyang D. *Advanced materials*, 2014, 26, 35, p. 6111–6118.
- 2 Hui W., Li L., Chen C. *Ceramics International*, 2012, 38, 8, p. 6253–6266.
- 3 Chang H., Chen C., Kao M., Chien S. *Applied Surface Science*, 2013, 275, p. 252–257.
- 4 Xi M., Zhang Y., Long L., Li X. *Journal of Solid State Chemistry*, 2014, 219, p. 118–126.
- 5 Li S., Liu Y., Zhang G., Zhao X., Yin J. *Thin Solid Films*, 2011, 520, 2, p. 689–693.
- 6 Kandiel T., Robben L., Alkaimad A., Bahnemann D. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2013, 12, 4, p. 602–609.
- 7 Yang J., Mei S., Ferreira J.M.F. *Materials Science and Engineering: C*, 2001, 15, 1, p. 183–185.
- 8 Sahni S., Bhaskar Reddy S., Murty B.S. *Influence of process parameters on the synthesis of nano-titania by sol-gel route Materials Science and Engineering A*, 2007, 452, p. 758–762.
- 9 Nam S.H., Hyun J.-S., Boo J.-H. *Materials Research Bulletin*, 2012, 47, 10, p. 2717–2721.
- 10 Pierson H.O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology and Applications*, New Jersey, 1992, p. 235.
- 11 Yan X.-M., Kang J., Gao L., Xiong L., Mei P. *Applied Surface Science*, 2013, 265, p. 778–783.
- 12 Zhu Y., Li H., Kolytypin Y., Hacohen Y.R., Gedanken A. *Chemical Communications*, 2001, 24, p. 2616–2617.
- 13 Wu X., Jiang Q.Z., Ma Z.F., Fu M., Shanguan W.F. *Solid State Communications*, 2005, 136, 9, p. 513–517.
- 14 Pugazhenthirana N., Murugesana S., Anandan S. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 263, p. 541–549.
- 15 Wu H., Li L., Chen C., Diao E. *Spectroscopy Ceramics International*, 2012, 38, p. 6253–6266.
- 16 Serikov T.M., Ibrayev N.H., Ilyna L.F., Smagulov Zh.Kh. *Colloids and Surfaces 2015: Abstracts of the IV International Conf.*, Almaty: Arda, 2015, p. 73.
- 17 Liua G., Hoivika N., Wangb X., Lub S., Wanga K., Jakobsena H. *Electrochimica Acta*, 2013, 93, p. 80–86.

- 18 Panfilov Yu. *Technology in the electronics industry*, 2007, 3, 76–80 p.
- 19 Grigoriev F.I. *Plasma-chemical and ion-chemical etching in the microelectronics technology*, Moscow: Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 2003, p. 133.
- 20 Cusano D.A. *Physics and Chemistry of compounds*, edit. S.A. Medvedev, Moscow: Mir, 1970, p. 537–578.
- 21 Bolgova T.G. *Preparation and properties of thin films of cadmium sulfide doped with alkali metals and halogens (Cl, Br)*, Voronezh, 2009, p. 126.
- 22 Petukhov V.Yu., Gumarov G.G. *Ion-beam methods of producing thin films*, Kazan, 2010, p. 87.
- 23 Yezhovskiy Yu.K. *Sorov. educational journal*, 2000, 6, 1, p. 56–63.
- 24 Danilin B.S., Syrchin V.K. *Magnetron sputtering systems*, Moscow: Radio and Communication, 1982, 326 p.
- 25 Kelner R. *Analytical chemistry. Problems and approaches*, Moscow: Mir, 2004, 607 p.