

нагрузки контактными напряжениями 1300 ± 65 МПа после 8- и 12-часового насыщения соответственно.

3. Присутствие молибдена в стали 42CrMoS4 не привело к увеличению износостойкости науглероженных слоев.

Литература

1. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали : справочник / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1984. – 584 с.
2. К вопросу влияния остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоев стали 40X и 35ХГСА / И. Н. Степанкин [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, – 2019. – С. 104–116.
3. Устройство для испытания на контактную усталость и износ : полезная модель ВУ 7093 / Степанкин, И. Н., Кенько, В. М., Панкратов, И. А. – Опубл. 28.02.2011.

УДК 539.216.2+666.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Cu° В СТРУКТУРЕ SiO_2 ПЛЕНКИ

А. А. Бойко, М. Ф. С. Х. Аль-Камали, Е. Н. Подденежный

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Н. А. С. Аль-Арики

Таузский университет, Республика Йемен

На основании анализа СЭМ-изображения и масс-спектрометрии твердотельных образцов, полученных наноструктурированных $SiO_2 : Cu$ пленок, высказано предположение, что при высокой концентрации Cu° в пленке формируются изолированные наночастицы меди сферической формы. Построена модель распределения атомов меди в структуре высококремнеземистой матрицы, показано, что распределение меди в структуре пленки требует учета концентрации атомов меди в мишени, технологических режимов и среды формирования пленок. Обоснована перспективность таких материалов для датчиков интенсивности солнечного излучения.

Ключевые слова: наноструктурированные пленки, ионы меди, СЭМ-изображение.

MODELING OF Cu° DISTRIBUTION IN THE SiO_2 FILM STRUCTURE

A. A. Boika, M. F. S. H. Al-Kamali, E. N. Poddenezhny

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

N. A. S. Al-Areqi

Department of Chemistry, Taiz University, Republic of Yemen

Based on the analysis of the SEM-image and mass spectrometry of solid-state samples obtained from nanostructured $SiO_2 : Cu^{\circ}$ films, it is suggested that isolated spherical copper nanoparticles are formed in the film at a high concentration of Cu° . A model of the distribution of copper atoms in the structure of a high-silica matrix is constructed, it is shown that the distribution of copper in the film structure requires taking into account the concentration of copper atoms in the target, technological modes and the medium of film formation. The prospects of such materials for solar radiation intensity sensors are substantiated.

Keywords: nanostructured films, copper ions, SEM-image.

Одно из важных направлений тонкопленочного материаловедения, получившее ее активное развитие в течение последних двух десятилетий, – это разработка методов и способов формирования композиционных покрытий с высокой степенью однородности их структуры и свойств. Как правило, получить композиционные покрытия, стехиометрический состав которых соответствует структуре распыляемой мишени, является сложной задачей. Композиционные покрытия используются в различных областях электроники и оптики, на основе таких покрытий происходит формирование тонкопленочных конденсаторов, резисторов, а также формирование элементов оптоэлектронных устройств, в которых используются такие свойства покрытий, как просветление, изменение отражения в необходимом интервале длин волн, фильтрация, поляризация излучения и т. д. Применение покрытий существенно улучшает параметры и характеристики разрабатываемых изделий, устройств и аппаратуры. Покрытия сложного элементного состава и архитектуры используются при создании оптических систем для электронной техники (дисплеев, оптических устройств обработки и хранения информации и т. д.), в архитектуре (светоотражающие, светопоглощающие и энергосберегающие селективные покрытия), производстве солнечных элементов и др.

Для осаждения покрытий используются различные методы испарения, но при использовании сложных по химическому и элементному составу композиционных мишеней сталкиваются с трудностями получения мишеней больших геометрических размеров, поэтому в последнее время широко внедряются для формирования покрытий такие методы, как импульсное лазерное испарения [1–3], электронно-лучевое и резистивное испарение. Данные методы позволяют получать покрытия, используя в качестве источника материала мишени небольшого размера.

Другим «бурно» развивающимся направлением в технологии формирования покрытий являются разработка новых материалов и технологии получения наноструктурированных покрытий, реализующих даже при небольших толщинах слоев механизмы плазмонного и экситон-плазмонного поглощения. Сейчас является актуальным направление в области создания конструкционных тонкопленочных материалов для оптоэлектроники. Покрытия оптических элементов, содержащие прозрачную матрицу с введенными в ее состав наночастицами металлов, находят применение в преобразовании солнечной энергии [4, 5], электронике [6] и катализе [7]. В настоящей работе выбор пленок состава $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, обусловлен тем фактом, что при окислении меди образуются оксиды Cu_2O и CuO [7]. При этом оксиды меди Cu_2O , CuO обладают не только способностью увеличивать поглощение в определенном, заданном оптическом диапазоне, но и характеризуются высокотемпературной сверхпроводимостью [8], что делает такие покрытия, особенно при сверхмалых толщинах (не более 100 нм), перспективными для применения в солнечных элементах.

Целью данной работы было установление характера распределения частиц Cu^0 в высокоремнеземистой матрице формируемой пленки.

Нанесение тонких пленок осуществляли методом лазерного ассистирующего воздействия в процессе электронно-лучевого диспергирования мишени.

Режимы нанесения пленок $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, показатель преломления и геометрическая толщина полученных пленок $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, определенных с помощью лазерного эллипсометра и СЭМ, приведены в таблице.

Режимы нанесения, показатель преломления и геометрическая толщина пленок $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, определенных с помощью лазерного эллипсометра и СЭМ

Состав, мишень и концентрация в атомной массе	Время распределения	Показатель преломления, n	Толщина, нм	
			Эллипсометр	СЭМ
SiO_2	40	1,702	27,027	35,7
$\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ (1Si : 0,20 Cu)	40	1,76	50,99	51,6
$\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ (1Si : 0,30 Cu)	40	1,884	125,45	143
$\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ (1Si : 0,40 Cu)	38	2,287	65,49	75,4

На рис. 1 приведено СЭМ-изображение скола пленки $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, нанесенной на кремниевую подложку. Видно, что в объеме покрытия отсутствуют сколы, поры и разрушения. Пленка формируется плотной и однородной. Режимы нанесения выбирались с условием, чтобы толщина была ~ 100 нм.

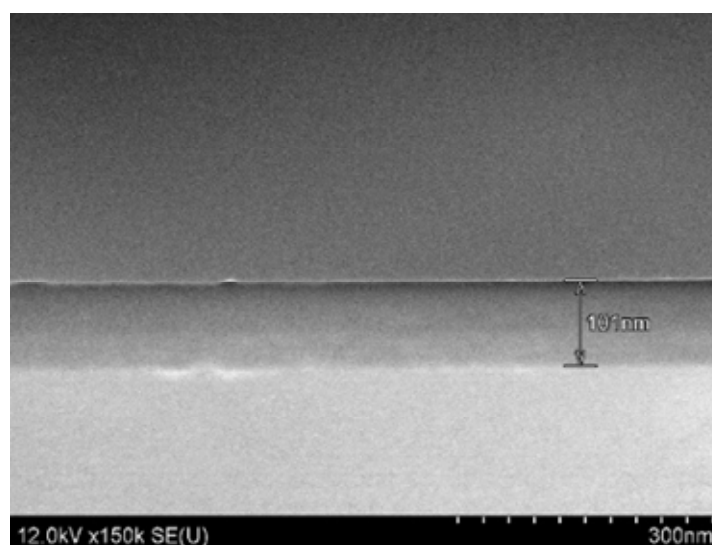


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности скола пленки $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, нанесенной методом импульсного лазерного (концентрация 1 моль Si : 0,4 моль Cu)

Для анализа характера распределения ионов меди в объеме пленки вначале были сформированы пленки толщиной ~ 300 нм. СЭМ-изображение поверхности и скола пленки приведены на рис. 2 и 3.

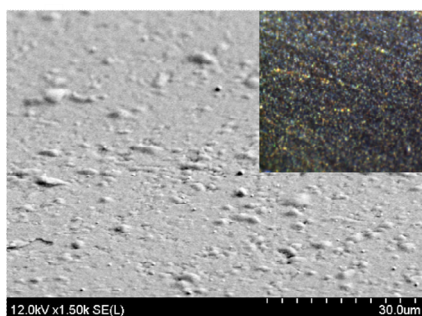


Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности пленки $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$ (вставка – изображение, полученные ПЭМ)

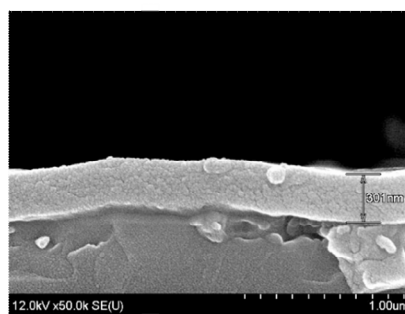


Рис. 3. СЭМ-изображение скола пленки $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$

Анализ проводили методом масс-спектрометрии твердотельных образцов. Для этого был использован времяпролетный масс-спектрометр вторичных ионов – TOF.SIVS.5-200. Это позволило получить химический профиль по глубине пленки (рис. 4) и построить трехмерную химическую топографию распределения меди в структуре SiO_2 пленки (рис. 5).

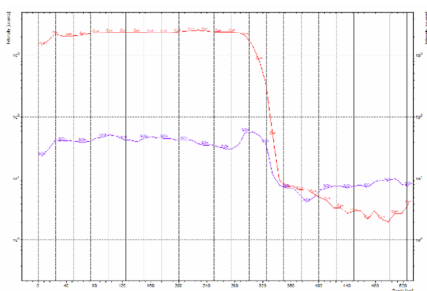


Рис. 4. Профиль распределения Cu в объеме пленки

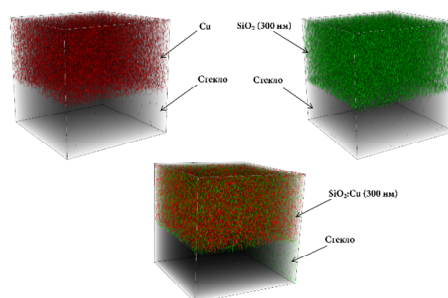


Рис. 5. 3D-модель распределения Cu в объеме пленки

Таким образом, предложена модель распределения ионов меди в структуре высококремнеземистой матрицы и сформированной пленки по результатам структурных и данных масс-спектрометрии твердотельных образцов, позволившая построить трехмерную химическую топографию распределения меди в структуре пленки и объяснить появление в ней плазмонного эффекта, связанного с наночастицами Cu° сферической формы.

Литература

1. Берлин, Е. В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. В. Берлин, С. А. Двинин, Л. А. Сейдман. – М. : Техносфера, 2007. – С. 11–17.
2. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика / под. ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – С. 284–304.
3. Иванов, А. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование / А. Иванов, Б. Смирнов // Наноиндустрия. – 2012. – № 6. – С. 28–34.
4. An Overview of Stretchable Strain Sensors from Conductive Polymer Nanocomposites / J. Chen [et al.] // Journal of Materials Chemistry C. – 2019. – Vol. 38, N 7. – P. 11710–11730.

5. Synthesis and optical characterization of copper oxide nanoparticles / S. Amrut [et al.] // *Advances in Applied Science Research*. – 2010. – N 1 (2). – P. 36–40.
6. Thickness-dependent bending modulus of hexagonal boron nitride nanosheets / S. Barth [et al.] // *Nanotechnology*. – 2009. – N 20. – P. 1–6.
7. Коршунов, А. В. Особенности окисления нанопорошков меди при нагревании в воздухе / А. В. Коршунов, А. П. Ильин // *Изв. Том. политехн. ун-та*. – 2008. – Т. 313, № 3. – С. 5–13.
8. Naddaf, M. Characterization of nanostructured copper-porous silicon matrix formed on copper-coated silicon substrate via electrochemical etching / M. Naddaf, O. Mrad, A. Al-Zier // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2014. – Vol. 115, N 4. – P. 1345–1353.

УДК 541.64:678.742.2

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ
И МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕНТОНИТА**

Д. Л. Подобед

*Филиал «Институт профессионального образования» Университета
гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Гомель*

В. М. Шаповалов

*Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

Показано, что для смеси вторичных полиолефинов и диспергированного в планетарной мельнице бентонита, модифицированного кремнийорганической жидкостью и гудроном сап-стока, разрушающее напряжение при растяжении по сравнению с исходным композитом увеличивается в 1,5–2,0 раза. Для содержания в композите модифицированного бентонита в пределах 2,5–4,5 мас. % характерны стабильные показатели его прочности, что указывает на формирование в этих условиях более однородной структуры композиционной системы. Выдвинуто предположение о том, что при содержании до 42,5 мас. % частиц бентонита с дисперсностью 40 мкм и менее активируется межмолекулярное взаимодействие на границе раздела «полимер – наполнитель». Рассмотрен механизм повышения прочностных характеристик композитов с модифицированным бентонитом, обусловленный комплексом адгезионных взаимодействий и физико-химических превращений на межфазных границах.

Ключевые слова: композиционный материал, смеси вторичных полиолефинов, модификация, бентонит, прочностные свойства, рециклинг.

**COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF SECONDARY
POLYOLEFINS AND BENTONITE**

D. L. Podobed

*Branch “Institute of Professional Education”
of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations
of Belarus, Gomel*

V. M. Shapovalov

*Institute of Mechanics of Metal Polymer Systems named after V. A. Bely
of the National Academy of Sciences of Belarus”, Gomel*

It is shown that for a mixture of secondary polyolefins and bentonite dispersed in a planetary mill, modified with organosilicon liquid and soapstock tar, the destructive tensile stress increases