

деляется эффективной глубиной проникновения магнитного поля в объект, определяемой $t_{i \max}$. Для выделения информации полос устанавливают одинаковый средний уровень сигнала каждой полосы и вычитают информацию заданной полосы из всех последующих, получая данные о свойствах глубинных слоев объекта. При этом оставляют в растре полную ширину только первой, то есть верхней, полосы, соответствующей минимальной величине $t_{i \max}$, а у всех последующих полос оставляют в растре только нижние части, исключая наложение полос друг на друга. Располагая все полосы растра в одном масштабе, устанавливают соответствие между положением каждой строки и глубиной проникновения магнитного поля в материал объекта.

1. Павлюченко, В.В. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях /

В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29-40.

2. Способ магнитоимпульсного контроля дефектности, электрических и магнитных свойств объекта из магнитного или немагнитного электропроводящего материала: пат 10464 Респ. Беларусь, МПК С2 ВУ, G 01 N 27/00 / В.В. Павлюченко, Е.С.Дорошевич; заявитель БНТУ – № а20060201; заявл. 09. 03. 2006; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2. – С. 97-98.

3. Способ магнитного контроля дефектности, электрических, магнитных и механических свойств ферромагнитного материала: пат 11266 Респ. Беларусь, МПК С2 ВУ G 01 N 27/84, G 01 R 33/82 / В.В. Павлюченко, Е.С.Дорошевич; заявитель БНТУ – № а 20060340; заявл. 13. 04. 2006; опубл. 30.04.08// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008, № 5. – С. 128-129.

УДК 51-73

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЭМС НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МАТРИЦАМИ ИЗ ПОРИСТЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР

Плескачевский Ю.М.¹, Горох Г.Г.², Казаченко В.П.³, Плиговка А. Н.², Шилько С.В.⁴, Таратын И.А.⁵, Хатько В.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

³Республиканская ассоциация наноиндустрии Беларуси

Минск, Республика Беларусь

⁴Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси

Гомель, Республика Беларусь

⁵ОАО Минский НИИ радиоматериалов

Минск, Республика Беларусь

Анализ мирового рынка выявляет возрастающую потребность в микроэлектромеханических преобразователях сенсорного и актуаторного типа (далее – преобразователей). Одним из путей повышения эксплуатационных характеристик указанных приборов является разработка новых функциональных, в особенности, интеллектуальных материалов, с использованием основы (подложки), структурированной на наномасштабном уровне [1]. Это открывает перспективы управления физико-механическими свойствами материалов путем создания упорядоченных микро- и наномасштабных поверхностных и объемных кластеров.

В основе настоящей работы лежит идея создания преобразователей в виде актуаторов и сенсоров путем синергетического использования упорядоченных наноструктурированных объектов (рис. 1) и функциональных материалов в

виде полимеров, полупроводников и пьезоэлектриков, способных к регистрации и трансформации физических воздействий.

Реализация этой идеи связана с поиском конкретных соединений и способов их введения в нанопоры (рис. 1а) или столбчатые наноструктуры (рис. 1б) для получения интеллектуальных композитов, обладающих термо-, опто-, тензо- и другими видами чувствительности.

Ранее проведенные исследования [2] показали зависимость модуля Юнга, коэффициента теплопроводности и других физико-механических характеристик нанопористого анодного оксида алюминия от его объемной пористости. Использование указанного наноструктурированного материала в качестве связующего звена между монолитной (например, кремниевой) подложкой и осаждаемым на ней функциональным материалом (полимером, полупроводником и т.д.) обес-

печат решение нескольких проблем. За счет уменьшения градиента коэффициентов термического расширения подложки и функционального слоя снижается концентрация межфазных термомеханических напряжений и вероятность адгезионного разрушения.

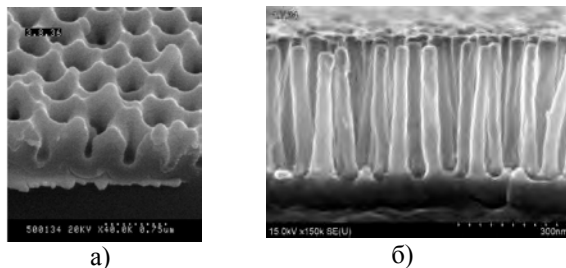


Рис. 1. Регулярные структуры оксида алюминия (а) и оксида ниобия (б)

Одним из направлений в реализации данной идеи является разработка исполнительного элемента МЭМС терморегуляции малых космических аппаратов (МКА). В качестве исполнительного элемента таких микросистем чаще всего применяются балочные и мембранные актюаторы, действие которых основано на электростатическом эффекте или тепловой активации движения балки (принцип биметаллической пластины). На рис.2 приведена внешняя панель МКА с микромеханическими системами терморегулирования (схематически).

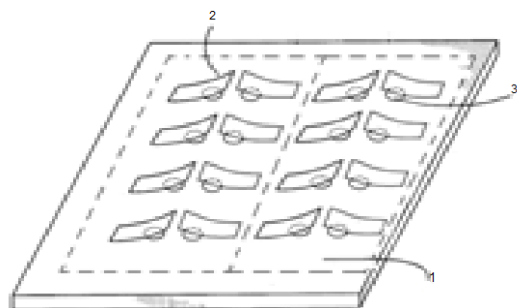


Рис. 2. Внешняя панель МКА с МЭМС терморегулирования: 1 – Si подложка, 2 – биморфная пластина, 3 – отверстие.

К настоящему моменту времени уже существуют технологии и опытные образцы систем терморегуляции на основе термомеханических актюаторов, действие которых основано на биморфном эффекте пары материалов с различным коэффициентом термического расширения (кремний и термостойкий полимер) [3].

В настоящей работе приведены результаты исследований структуры и морфологических особенностей тонких пленок на основе полимерных форм C_{60} , синтезированных методом электроно-лучевого осаждения на поверхностях

нанопористого АОА и структурированных полиимидных пленок.

Покрытия из полимеризованного фуллерена C_{60} толщиной 100–500 нм формировали на подложках из нанопористого анодного оксида алюминия (АОА), сформированных в щавелево-кислом, малоновокислом и виннокислом электролитах, с размерами пор от 20 до 100 нм. Структуру сколов и морфологию осажденных пленок на различных подложках исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием микроскопов VEGA II LSH и Supra 55. Сколы покрытий, осажденных на трековые мембраны из полиимидной пленки, были получены в среде жидкого азота.

Для покрытий, сформированных на АОА (рис. 3 и 4), было показано, что характерный размер надмолекулярных структурных образований увеличивается с ростом периода структуры подложки (рис. 5). Указанная зависимость сохраняется как для покрытий толщиной 100–150 нм, так и для слоев толщиной 300–400 нм. При этом на подложках со значением периода структурирования более 100 нм происходит образование характерных столбчатых структур.

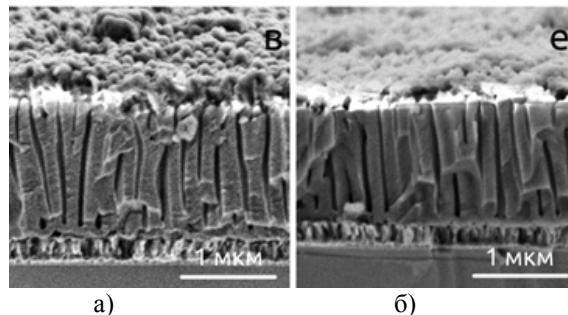


Рис. 3. Изображения РЭМ сколов покрытия полимеризованного C_{60} , осажденного на подложках из нанопористого оксида алюминия без (а) и с применением дополнительного отжига в вакууме (б)

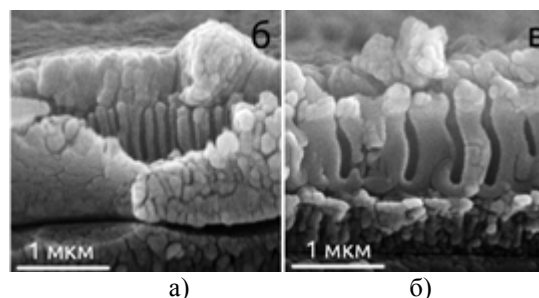


Рис. 4. Изображения РЭМ сколов покрытий полимеризованного C_{60} толщиной 300–400 нм на поверхности наноструктурированного оксида алюминия.

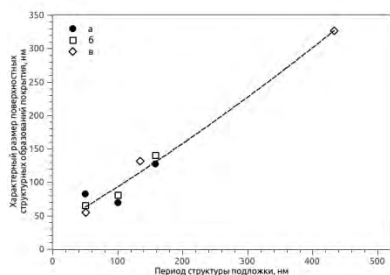


Рис. 5. Зависимость характерного размера структурных образований покрытия полимеризованного C_{60} от периода структуры подложки: а – покрытия толщиной 100–150 нм, б – покрытия толщиной 100–150 нм, сформированные с дополнительным вакуумным отжигом, в – покрытия толщиной 300–400 нм

Отжиг осажденных слоев *in situ* в вакууме непосредственно после формирования при температуре $100^{\circ}C$ в течение 1 часа практически не влиял на структуру и морфологию осажденных слоев (рис. 4). Глубина проникновения материала покрытия в поры подложки не превышает диаметра пор. Наименьшей шероховатостью обладают покрытия, сформированные на подлож-

ках с периодом структурирования около 100 нм и размером пор около 50 нм, что соответствует диапазону размеров структурных образований покрытий полимеризованного C_{60} , сформированных на гладких поверхностях, таких как монокристалл кремния.

Таким образом, исследования показали, что диаметры пор и период структуры исследуемых подложек оказывают решающее значение на шероховатость полимеризованного C_{60} покрытия, характерный размер поверхностных надмолекулярных образований и степень заполнения пор.

1. Плескачевский Ю.М., Хатько В.В., Горох Г.Г., Таратын И.А. / Сб. научн. статей “Наноструктуры в конденсированных средах”/ Под ред. П.А. Витязя. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2011. – С. 18–24.
2. Баркалин В.В., Белогулов Е.А., Таратын И.А., Хатько В.В., Шукевич Я.И. / Нано- и микросистемная техника. – 2012, № 1. – С. 18–24.
3. Корпухин А.С., Бабаевский П.Г., Жуков А.А., Козлов Д.В., Смирнов И.П. / Нано- и микросистемная техника. 2011, № 2.

УДК 621.396:535.8

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООПТИКИ МИКРООБЪЕМОВ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖК В ПРОСТРАНСТВЕННО ИНТЕГРИРОВАННЫХ МОДУЛИРУЮЩИХ СТРУКТУРАХ

Развин Ю.В., Потащиц В.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Нематические жидкие кристаллы (НЖК) относятся к числу перспективных и наиболее доступных в настоящее время электрооптических материалов для устройств модуляции света. НЖК характеризуются дальним ориентационным порядком. Длинные оси молекул в объеме вещества ориентированы вдоль определенного направления. Направление преимущественной ориентации молекул ЖК принято характеризовать единичным вектором \mathbf{n} (так называемый директор). Директор определяет лишь направление преимущественной ориентации молекул. Мерой дальнего ориентационного порядка является степень упорядоченности:

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \Theta - 1 \rangle,$$

где Θ - угол между осью отдельной молекулы и директором слоя ЖК.

В ЖК степень упорядоченности S определяет анизотропию его электрических и оптических свойств. При изменении степени упорядоченности претерпевают изменения анизотропии показателя преломления ($\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$), диэлектрической проницаемости ($\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$) и электропро-

водности ($\Delta \sigma = \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}$). Индексы \parallel и \perp показывают направления относительно длинной оси молекул ЖК.

Особенность электрооптических эффектов в НЖК состоит в том, что вследствие анизотропии диэлектрической проницаемости и электропроводности жидкий монокристалл испытывает вращающий момент, стремящийся понизить энергию ЖК слоя в электрическом поле. Вследствие относительно небольшой вязкости и внутреннего трения вращающий момент приводит к переориентации молекул ЖК. Согласно теории Озеена-Франка электрическое поле вызывает такую деформацию ЖК, что результирующее распределение ориентации осей молекул (n) минимизирует свободную энергию объема ЖК. Минимум энергии искажения ЖК достигается при условии совпадения направления максимальной поляризуемости с направлением поля \mathbf{E} . В результате в ЖК с положительной диэлектрической анизотропией директор стремится установиться вдоль поля, а при отрицательной диэлектрической анизотропии – перпендикулярно ему. Упругие силы стремятся вернуть ЖК в ис-