

Инфракрасные сенсорные свойства многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs, полученных электрофоретическим синтезом

Ней Вин Аунг¹, М. А. Пугачевский¹ ✉, В. В. Филиппов², В. М. Емельянов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского
ул. Ленина, д. 42, г. Липецк 398020, Российская Федерация

✉ e-mail: pmaximal@mail.ru

Резюме

Цель. Получение и исследование сенсорных свойств многослойных нанокompозитных электрофоретических пленок CuO/CNPs в инфракрасном диапазоне.

Методы. Исследование морфологии и размерного состава нанокompозитных пленок CuO/CNPs с помощью атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии; установление химического состава с помощью рентгеновской дифрактометрии, исследование сенсорной чувствительности при инфракрасном облучении оптоволоконным лазерным источником с длиной волны $\lambda = 1064$ нм; изучение временных характеристик наведенной фотоэлектродвижущей силы с помощью оптоэлектрических измерений (ADC L-CARD E2010D), сопряженных с персональным компьютером.

Результаты. Методом электрофоретического синтеза на стеклянной подложке получены нанокompозитные пленки CuO/CNPs толщиной от 0,1 до 1 мкм. Установлено, что нанокompозитные пленки CuO/CNPs формируются за счет упорядоченного структурирования углеродных наночастиц вдоль направления электрического поля под действием электрофоретических сил. Одновременно за счет электролитического процесса на поверхности углеродных частиц образуется слой оксида меди с металлических электродов. Предельный размер углеродных частиц составил 50–70 нм в зависимости от параметров получения пленок. Разработана методика получения многослойных композитных пленок CuO/CNPs толщиной от одного до десяти слоев.

Установлено, что при облучении синтезированных десятислойных нанопленок инфракрасным излучением интенсивностью 75 мВт/см² величина фотогенерированной ЭДС достигает $122,5$ мВ.

Заключение. Получены многослойные нанокompозитные пленки CuO/CNPs с сенсорными свойствами в инфракрасном диапазоне. Установлено, что при увеличении толщины синтезированных пленок от одного до десяти слоев величина фото-ЭДС при ИК-облучении с интенсивностью 75 мВт/см² растет от 17 до $122,5$ мВ.

Ключевые слова: оксид меди; углеродные наночастицы; многослойные нанокompозитные пленки, электродвижущая сила.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (г/з № 0851–2020–0035) и при реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Инфракрасные сенсорные свойства многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs, полученных электрофоретическим синтезом / Ней Вин Аунг, М. А. Пугачевский, В. В. Филиппов, В. М. Емельянов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 2. С. 177–188. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-177-188>

Поступила в редакцию 22.03.2023

Подписана в печать 27.04.2023

Опубликована 30.05.2023

Ir Sensory Properties of Multilayer Nanocomposite CuO/CNPs Films Produced by Electroporetic Synthesis

Nay Win Aung¹, Maxim A. Pugachevskii¹ ✉, Vladimir V. Filippov², Viktor M. Emelyanov¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky
42 Lenina Str., Lipetsk 398020, Russian Federation

✉ e-mail: kuzko@mail.ru

Abstract

Purpose. Formation and studying the sensory properties of multilayer nanocomposite electroporetic CuO/CNPs films in the infrared range.

Methods. Study of the morphology and size composition of CuO/CNPs nanocomposite films using atomic force microscopy and scanning electron microscopy; determination of the chemical composition using X-ray diffractometry, the study of sensory sensitivity under infrared irradiation with a fiber-optic laser source with a wavelength of $\lambda = 1064$ nm; study of the temporal characteristics of the induced photoelectromotive force using optoelectric measurements (ADC L-CARD E2010D) interfaced with a personal computer.

Results. Nanocomposite CuO/CNPs films 0.1 to 1 μm thick were obtained by electroporetic synthesis on a glass substrate. It has been established that CuO/CNPs nanocomposite films are formed due to the ordered structuring of carbon nanoparticles along the direction of the electric field under the action of electroporetic forces. At the same time, due to the electrolytic process, a layer of copper oxide from metal electrodes is formed on the surface of the carbon particles. The limiting size of carbon particles was 50–70 nm, depending on the parameters of film production. A technique has been developed for producing multilayer CuO/CNPs composite films with a thickness of one to ten layers. It has been established that when the synthesized ten-layer nanofilms are irradiated with infrared radiation with an intensity of 75 mW/cm^2 , the value of the photogenerated EMF reaches 122.5 mV.

Conclusion. Multilayer nanocomposite CuO/CNPs films with infrared sensor properties were obtained. It has been established that with an increase in the thickness of the synthesized films from one to ten layers, the photo-EMF under IR irradiation with an intensity of 75 mW/cm^2 increases from 17 to 122.5 mV.

Keywords: copper oxide; carbon nanoparticles; multilayer nanocomposite films; electromotive force.

Financing: The study was financially supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (g/z No. 0851–2020–0035) and within the framework of the strategic academic leadership program “Priority-2030” » (Agreement No. 075-15-2021-1213).

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Nay Win Aung, Pugachevskii M. A., Filippov V. V., Emelyanov V. M. Ir Sensory Properties of Multilayer Nanocomposite CuO/CNPs Films Produced by Electroporetic Synthesis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(2): 177–188. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-177-188>

Received 22.03.2023

Accepted 27.04.2023

Published 30.05.2023

Введение

В настоящее время инфракрасные (ИК) фотоприемники находят широкое применение в различных научно-технических областях, таких как микроэлектроника, приборы бытового и промышленного назначения, медицина, сельскохозяйственные технологии и др. В связи с возрастающими требованиями к сенсорам ИК-диапазона многие исследователи ведут поисковые работы с целью улучшения характеристик существующих ИК-фотодетекторов, создания новых ИК поглощающих материалов и нанокompозитных пленок для технологических приложений [1–3]. Полупроводниковые материалы с узкой шириной запрещенной зоны, такие как PbSe, PbS, InAs, GaSb, Mg₂Si, углеродные наноматериалы, тонкие пленки оксидов переходных металлов (CuO, TiO₂, ZnO) исследуются как потенциальные кандидаты для сенсоров инфракрасного излучения с хорошими эксплуатационными характеристиками [4–7]. Среди этих оксидов переходных металлов оксид меди CuO выделяется сочетанием высокого оптического поглощения, узкой шириной запрещенной зоны (1,5–2,1 эВ) и проводимостью *p*-типа, что позволяет изготавливать из него солнечные элементы и оптические датчики. Также в последнее время активно привлекают внимание тонкие пленки из углеродных наночастиц (CNPs) в связи с наличием у них отличительных свойств для оптоэлектронных и инфракрасных сенсоров [8–11].

Одним из перспективных способов структурирования наноматериалов может являться метод электрофоретического синтеза, в котором под действием элек-

трофоретических сил в электрическом поле происходит упорядочивание наноструктур вдоль векторов электрической напряженности. В региональном центре нанотехнологий ЮЗГУ разработана методика получения многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs методом электрофоретического синтеза [12]. Данные пленки могут иметь отличительные функциональные свойства, такие как, например, высокий коэффициент поглощения в широком спектральном оптическом диапазоне, включая инфракрасный диапазон. Формирование многослойных пленок толщиной до 1 мкм способно значительно увеличить коэффициент поглощения в области инфракрасного излучения и, как следствие, повысить фотоэлектрические сенсорные свойства. В данной работе детально исследуется получение многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs методом электрофоретического синтеза и характеристика их инфракрасных сенсорных свойств.

Материалы и методы

Многослойные нанокompозитные пленки CuO/CNPs получали электрофоретическим синтезом в постоянном электрическом поле. Были исследованы морфология, химический состав и ИК-сенсорные свойства многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs. Нанокompозитные пленки были изготовлены с межэлектродным расстоянием 1000 мкм. Electroды создавали методом лазерной гравировки (FMark-20 RL) на покрытой стеклянной подложке медной пластины (толщина 0,06 мм). Коллоидный раствор углеродных наночастиц (CNPs) был приготовлен из функционализированных одностенных

углеродных нанотрубок (ОУНТ TUBALL ТМ 0,2%, лигносульфонат-ванисперс А 1%, вода 98%, номер партии 19НО05.N1.003). Для этого 4 мкл смеси (из ОУНТ) растворяли в 10 мл дистиллированной воды и диспергировали 30 минут с помощью ультразвуковой ванны. Затем раствор центрифугировали при 10000 об/мин в течение 10 минут для получения раствора углеродных наночастиц с предельным размером до 70 нм [13].

Полученный раствор углеродных наночастиц наносился на стеклянную подложку с изготовленными капельным методом медными электродами. Затем к электродам прикладывалось постоянное электрическое поле напряженностью 17 кВ/м для проведения электрофоретического процесса в жидкой капле из раствора углеродных наночастиц. При электрофоретическом синтезе одновременно протекал ряд параллельных процессов: во-первых, под действием электрофоретических сил из углеродных наночастиц формировалась нанокompозитная пленка. Во-вторых, на углеродные наночастицы электролитически осаждались медные ионы с электродного материала. В течение процесса водная среда испарялась за счет выделения теплоты Джоуля – Ленца при протекании электрического тока, после чего на стеклянной подложке между электродами формировался нанокompозитный слой CuO/CNPs. Этот процесс повторялся 2 раза для создания двухслойного покрытия, 5 раз – для 5 слоев, 7 раз – для 7 слоев и 10 раз – для 10 слоев путем послойного синтеза многослойных пленок CuO/CNPs [14–18].

Многослойные нанокompозитные пленки CuO/CNPs были исследованы с помощью атомно-силовой микроскопии (AIST-NT SmartSPM), сканирующей электронной микроскопии (JEOL JSM-6610), рентгеновского дифрактометра (GBC EMMA), волоконного лазера (FMark-20 RL) и

электрических измерений (ADC L-CARD E2010D).

Сенсорные свойства в ИК-диапазоне многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs были исследованы под действием излучения иттербиевого оптоволоконного лазера, активированного диодной накачкой IPG Photonics с опцией HighContrast (длина волны излучения 1,06 мкм). Величина электродвижущей силы (ЭДС) многослойных нанокompозитных пленок (1, 2, 5, 7 и 10 слоев) под действием ИК-облучения измерялась с помощью аналого-цифрового преобразователя. Морфология и размер частиц изучались с помощью атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлена блок-схема установки, специально разработанной для получения и изучения сенсорных свойств многослойной нанокompозитной пленки CuO/CNPs. Установка включает в себя: стеклянную подложку с изготовленными на ней медными электродами; источник питания, подключенный к электродам для проведения синтеза многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs; ИК оптоволоконный лазер, работающий как в постоянном, так и в ключевом режиме для исследования сенсорных свойств; аналого-цифровой преобразователь, предназначенный для измерения фото-ЭДС, возникающей при инфракрасном облучении.

Многослойные нанокompозитные пленки CuO/CNPs были исследованы с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (вставки к рис. 1). Согласно полученным данным толщина одного слоя пленки CuO/CNPs лежит в пределах 100 ± 20 нм, при этом средний количественный размер частиц составляет 50 нм.

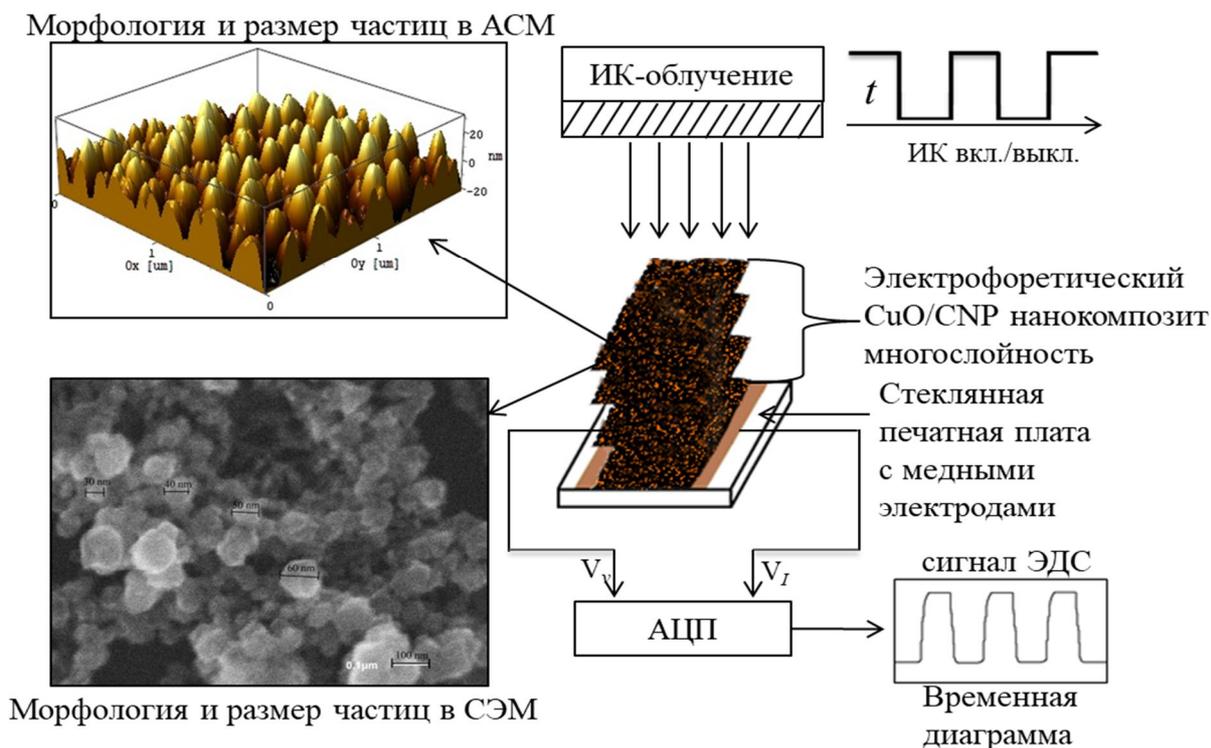


Рис. 1. Блок-схема исследования сенсорных свойств многослойных пленок нанокompозита CuO/CNPs под действием ИК-облучения

Fig. 1. Block diagram for measuring the sensory properties of CuO/CNPs nanocomposite multilayer films under IR irradiation

На рисунке 2 представлена рентгеновская дифрактограмма (РФА) в диапазоне углов 2θ от 20 до 60° . Сравнение с литературными данными [19] показывает, что дифракционные максимумы от образцов соответствуют углеродным наночастицам (CNPs) и нанокompозитным пленкам с углеродными наночастицами с медными включениями (CuO/CNPs). В спектрах РФА от углеродных наночастиц (CNPs) наблюдаются два основных брэгговских дифракционных максимума при $23,84^\circ$ и $44,64^\circ$, характерные для углеродных наночастиц. Для межплоскостных расстояний (002) с максимумом $2\theta = 23,84^\circ$ наблюдается большое содержание углеродной аморфной составляющей, а максимум (101) $2\theta = 44,64^\circ$ соответствует шестиугольной графитовой решетке [20–22]. На рентгенограмме нанокompозитных структур CuO/CNPs после электрофоретического процесса помимо широкого пика $24,22^\circ$, соответствующего

углеродным наночастицам (CNPs), появляются пики, связанные с межплоскостными расстояниями оксида меди (II) (CuO) на $36,22^\circ$; $39,48^\circ$; $49,52^\circ$; $54,16^\circ$; $59,2^\circ$, которые соответствуют индексам (002), (200), (-202), (020), (202), и оксиду меди (I) (Cu₂O) $2\theta = 37,18^\circ$; $43,02^\circ$ с индексами (111), (200) соответственно [23–28].

По результатам РФА нанокompозитных структур CuO/CNPs размер кристаллитов рассчитывали по уравнению Дебая – Шеррера

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos 2\theta'}$$

где k – постоянная Дебая – Шеррера; λ – длина волны рентгеновского луча ($1,54 \text{ \AA}$ для $\text{CuK}\alpha_1$); β – полная ширина на полувысоте (FWHM) пика; θ – угол Брэгга [29; 30]. Значения размеров кристаллитов CNPs и двух основных пиков наночастиц CuO приведены в таблице 1.

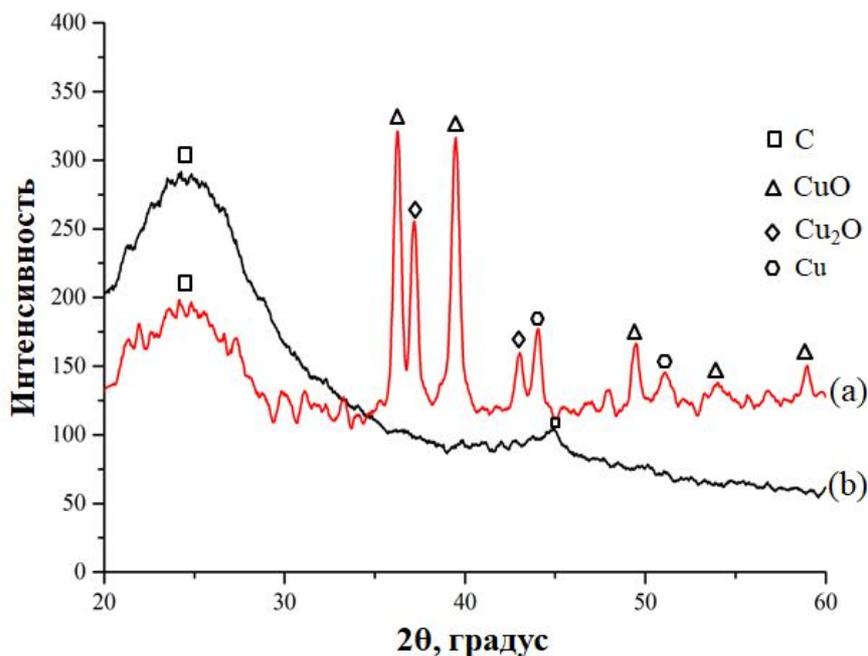


Рис. 2. Рентгенограмма CNPs – черная линия (а) и нанокompозитная пленка CuO/CNPs – красная линия (б)

Fig. 2. X-ray pattern of CNPs - black line (a) and CuO/CNPs nanocomposite film - red line (b)

Таблица 1. Средний размер кристаллитов, рассчитанный с использованием уравнения Дебая–Шеррера для структуры нанокompозита CNPs и CuO/CNPs

Table 1. Average crystallite size calculated using the Debye–Scherrer equation for the structure of a CNPs and CuO/CNPs nanocomposite

Тип	2θ, градус	Фаза	Размер кристаллитов, нм
CNPs	23,84	C(002)	2,22
	44,64	C(101)	3,82
CuO/CNPs нанокompозит	36,22	CuO(111)	24,6
	39,48	CuO(022)	23,1

На рисунке 3, а, б показаны зависимости электродвижущей силы (ЭДС) многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs, исследованные с помощью аналого-цифрового преобразователя (ADC L-CARD E2010D). Включение/выключение инфракрасного излучения многослойных нанокompозитных устройств задавали с помощью волоконного лазера, который выдавал с пятиминутным интервалом монохроматическое излучение с длиной волны 1064 нм. Временной фото-

отклик одно-, двух-, пяти-, семи- и десятислойных нанокompозитных устройств при интенсивности инфракрасного света 73 мВт/см^2 показан на рисунке 3, а.

Согласно фотоэлектрическим исследованиям, значения фотоЭДС при ИК-облучении 73 мВт/см^2 достигали значений 17, 30, 57,8, 89 и 122,5 мВ для одно-, двух-, пяти-, семи- и десятислойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs соответственно (рис. 3, б).

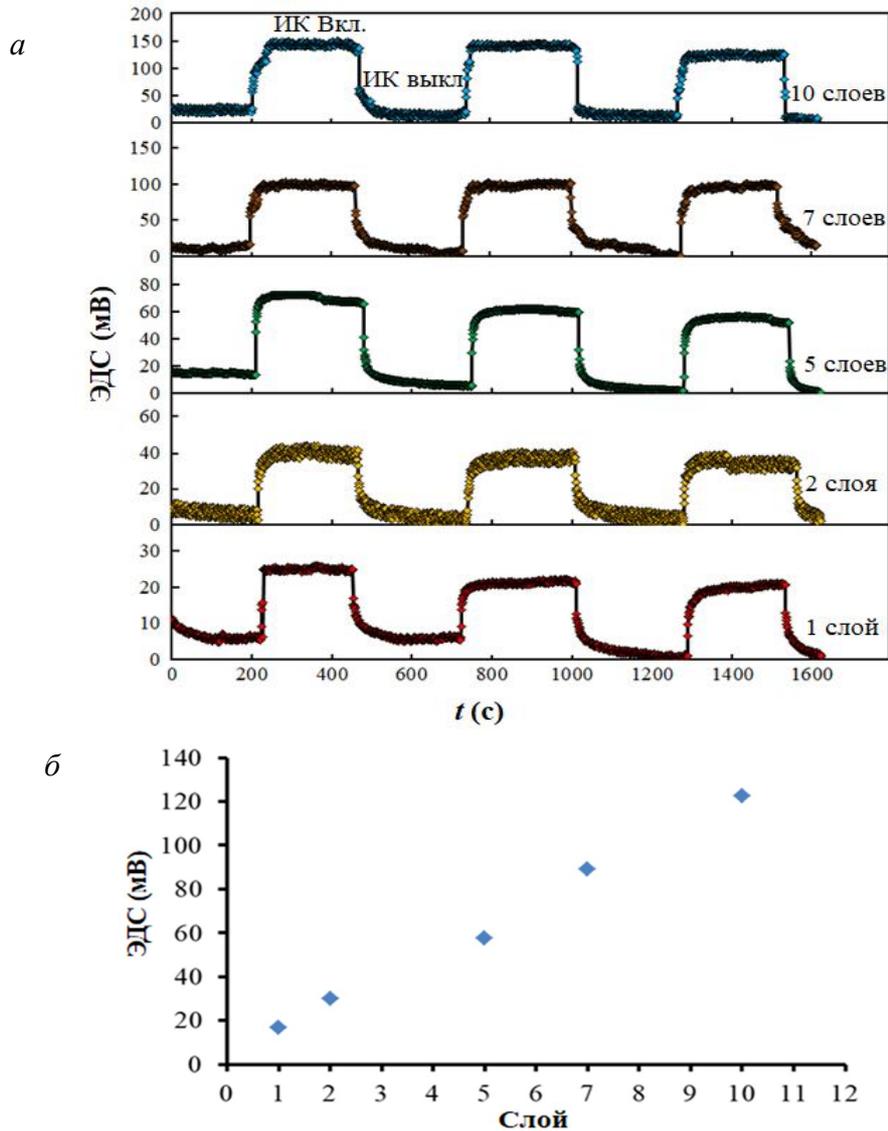


Рис. 3. Электродвижущая сила с временным фото-откликом (а); зависимость ЭДС (б) от многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs

Fig. 3. Electromotive force with temporal photo-response (a); dependence of EMF (b) on multilayers of CuO/CNPs nanocomposite films

Были исследованы также временные характеристики фотоотклика многослойных композитных пленок при включении и выключении инфракрасного облучения. Установлено, что время отклика включения и выключения для однослойной пленки составляют 3 и 8 с соответственно, в то время как для десятислойной пленки они составляли 10 и 14 с.

Согласно полученным данным можно констатировать, что многослойные нанопленки CuO/CNPs, полученные электро-

форетическим синтезом, обладают хорошими сенсорными свойствами в инфракрасном диапазоне. При этом наиболее высокое значение фото-ЭДС достигается при облучении многослойных пленок толщиной более 1 мкм (10 слоев).

Данные результаты можно объяснить следующим образом. При облучении происходит поглощение ИК-фотонов в композитной нанопленке CuO/CNPs, что сопровождается как повышением темпера-

туры пленки, так и фотогенерацией электрон-дырочных носителей заряда, в том числе посредством фононного взаимодействия. Генерированные носители заряда формируют наведенное фото-ЭДС, которое увеличивается с ростом интенсивности инфракрасного облучения. Кроме того, на межфазных границах оксида меди и углеродных наночастиц образуется большое количество структурных дефектов, служащие зарядовыми ловушками, которые могут значительно увеличивать время жизни фотогенерированных носителей заряда, препятствуя их обратной рекомбинации. С ростом количества слоев в многослойной композитной пленке до десяти ее толщина увеличивается на величину более 1 мкм и становится сравнимой с длиной волны инфракрасного излучения 1,06 мкм использованного ИК-источника. В этом случае значительно увеличивается коэффициент поглощения пленкой оптического излучения, с возможностью его многократного резонансного переотражения на границах раздела фаз пленка/стеклянная подложка и пленка/воздух. Этот эффект сопровождается значительным увеличением конверсии энергии оптического излучения в энергию фотогенерированной ЭДС, возникающей в синтезированной нанопленке CuO/CNPs. Таким образом, можно заключить, что синтезированные многослойные нанокompозитные пленки CuO/CNPs могут быть использо-

ваны при изготовлении высококачественных сенсоров инфракрасного излучения.

Выводы

1. Разработана методика получения многослойных композитных пленок CuO/CNPs толщиной от одного до десяти слоев. Методом электрофоретического синтеза получены многослойные нанокompозитные пленки CuO/CNPs суммарной толщиной от 0,1 до 1 мкм.

2. Установлено, что нанокompозитные пленки CuO/CNPs формируются за счет упорядоченного структурирования углеродных наночастиц вдоль направления электрического поля под действием электрофоретических сил. Одновременно за счет электролитического процесса на поверхности углеродных частиц образуется слой оксида меди с металлических электродов. Предельный размер частиц в композитной пленке составляет 50–70 нм в зависимости от параметров получения пленок.

Установлено, что многослойные нанокompозитные пленки CuO/CNPs характеризуются хорошими сенсорными свойствами в инфракрасном диапазоне. При облучении синтезированных нанопленок толщиной от одного до десяти слоев инфракрасным излучением интенсивностью 75 мВт/см² величина фотогенерированной ЭДС достигает значений от 17 до 122,5 мВ соответственно.

Список литературы

1. Flexible infrared detectors based on p-n junctions of multi-walled carbon nanotubes / Z. Huang, M. Gao, Z. Yan, T. Pan, F. Liao, Y. Lin // *Nanoscale*. 2016. Vol. 8(18). P. 9592–9599.
2. CuO nanowire-based metal semiconductor metal infrared photodetector / M. Tetseo, P. Deb, S. Daimary, J. C. Dhar // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2021. Vol. 127, no. 5. P. 1–6.
3. Nanocomposites of carbon nanotube (CNTs)/CuO with high sensitivity to organic volatiles at room temperature / J. Zheng, Q. Zhang, X. He, M. Gao, X. Ma, G. Li // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 36. P. 235–245.
4. Lyu X. Recent progress on infrared detectors: materials and applications // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2022. Vol. 27. P. 191–200.

5. Chuang R. W., Huang Y. H., Tsai T. H. Germanium-Tin (GeSn) metal-semiconductor-Metal (MSM) // *Micromachines*. 2022. Vol. 13. P. 1733(1)–1733(16).
6. Advances in transition metal dichalcogenides-based flexible photodetectors / V. Pavelyev, P. Sharma, A. Rymzhina, P. Mishra, N. Tripathi // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2022. Vol. 33(32). P. 24397–24433.
7. Moumen A., Kumarage G. C. W., Comini E. P-Type metal oxide semiconductor thin films: synthesis and chemical sensor applications // *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 4. P. 1359(1)–1359(45).
8. Faisal A. D., Aljubouri A. A., Khalef W. K. Photodetector fabrication based on heterojunction of CuO/SnO₂/Si nanostructures // *Bulletin of Materials Science*. 2022. Vol. 45(2). P. 84–92.
9. Optical and microstructural characteristics of CuO thin films by sol gel process and introducing in non-enzymatic glucose biosensor applications / J. Lillo-Ramiro, J. M. Guerrero-Villalba, M. L. Mota-González [et al.] // *Optik*. 2021. Vol. 229. P. 166238(1)–166238(13).
10. Infrared absorption properties of carbon nanotube/nanodiamond based thin film coatings / V. J. Gokhale, O. A. Shenderova, G. E. McGuire, M. Rais-Zadeh // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2014. Vol. 23(1). P. 191–196.
11. A simple infrared nanosensor array based on carbon nanoparticles / J. Dai, L. Yuan, Q. Zhong [et al.] // *Frontiers of Optoelectronics*. 2012. Vol. 5(3). P. 266–270.
12. Заявка на изобретение № 2023103450 Рос. Федерация. Заявл. 15.02.2023.
13. Nanocomposite films of CNPs/CuO structures by electrophoresis method / N. W. Aung, M. A. Pugachevskii, A. P. Kuzmenko, M. M. Than // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2064(1). P. 012105(1)–012105(6).
14. The investigation of the electromagnetic shielding effectiveness of multi-layered nanocomposite materials from reduced graphene oxide-doped P(AN-VAc) nanofiber mats/PP spunbond / İ. Tiyek, M. Yazıcı, M. H. Alma, Ş. Karataş // *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 53(11). P. 1541–1553.
15. Layer-by-Layer Assembly for Graphene-Based Multilayer Nanocomposites: Synthesis and Applications / T. Lee, S. H. Min, M. Gu [et al.] // *Chemistry of Materials*. 2015. Vol. 27(11). P. 3785–3796.
16. Layer-by-layer assembled composites from multiwall carbon nanotubes with different morphologies / M. Olek, J. Ostrander, S. Jurga [et al.] // *Nano Letters*. 2004. Vol. 4(10). P. 1889–1895.
17. Transparent, flexible conducting hybrid multilayer thin films of multiwalled carbon nanotubes with graphenenanosheets / T. K. Hong, D. W. Lee, H. J. Choi, H. S. Shin, B. S. Kim // *ACS Nano*. 2010. Vol. 4(7). P. 3861–3868.
18. Rivero P. J., Goicoechea J., Arregui F. J. Layer-by-layer nano-assembly: A powerful tool for optical fiber sensing applications // *Sensors (Switzerland)*. 2019. Vol. 19(3). P. 683–718.
19. Green systematic approach of carbon/CuO nano composites using aristolochia bracteolate by response surface methodology / S. M. Roopan, H. Sharma, G. Kumar, A. Mishra, V. A. Agrawal // *Journal of Cluster Science*. 2019. Vol. 30(5). P. 1177–1183.
20. Facile green synthesis of carbon nanoparticles using medicinally potent Pongamiapinnata shoots / B. S. N. Prasad, T. V. N. Padmesh, K. S. U. Suganya, K. Govindaraju, V. G. Kumar // *Journal of Environment and Biotechnology Research*. 2016. Vol. 3, no. 1. P. 12–16.
21. Hossain M. A. Synthesis of carbon nanoparticles from kerosene and their characterization by SEM/EDX, XRD and FTIR // *American Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2013. Vol. 1(2). P. 52–56.
22. A high precision length-based carbon nanotube ladder / Z. Borzooeian, M. E. Taslim, S. Rezvani, G. Borzooeian // *RSC Advances*. 2018. Vol. 8(63). P. 36049–36055.

23. Chemical assembly of copper oxide and single walled carbon nanotubes for enhanced photocatalytic dye degradation under solar light irradiation / K. P. Sapkota, M. A. Islam, M. A. Hanif, J. Akter, J. R. Hahn // *Materials Proceedings*. 2021. Vol. 4(1). P. 1–5.
24. Temperature-controlled self-assembled synthesis of CuO, Cu₂O and Cu nanoparticles through a single-precursor route / X. Liu, B. Geng, Q. Du, J. Ma, X. Liu // *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 448. P. 7–14.
25. A green route for the cross-coupling of azide anions with aryl halides under both base and ligand-free conditions: Exceptional performance of a Cu₂O-CuO-Cu-C nanocomposite / M. Karimzadeh, K. Niknam, N. Manouchehri, D. Tarokh // *RSC Advances*. 2018. Vol. 8(45). P. 25785–25793.
26. Biogenic-mediated synthesis of mesoporous Cu₂O/CuO nano-architectures of superior catalytic reductive towards nitroaromatics / M. S. Alhumaimess, A. A. Essawy, M. M. Kamel, I. H. Alsohaimi, H. M. A. Hassan // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10(4). P. 781–795.
27. Hyperbranched epoxy/MWCNT-CuO-nystatin nanocomposite as a high performance, biocompatible, antimicrobial material / S. Barua, P. Chattopadhyay, M. M. Phukan, B. K. Konwar, N. Karak // *Materials Research Express*. 2015. Vol. 1(4). P. 045402(1)–045402(26).
28. Studies on sensing properties and mechanism of CuO nanoparticles to H₂S gas / F. Peng, Y. Sun, W. Yu [et al.]. // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10(4). P. 774–788.
29. Monshi A., Foroughi M. R., Monshi M. R. Modified scherrer equation to estimate more accurately nano-crystallite size using XRD // *World Journal of Nano Science and Engineering*. 2012. Vol. 02(03). P. 154–160.
30. Singh S., Goswami N. Dielectric study of pure CuO nanoparticles prepared through exploding wire technique // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2023. Vol. 34(3). P. 1–14.

References

1. Huang Z., Gao M., Yan Z., Pan T., Liao F., Lin Y. Flexible infrared detectors based on p-n junctions of multi-walled carbon nanotubes. *Nanoscale*, 2016, vol. 8(18), pp. 9592–9599.
2. Tetseo M., Deb P., Daimary S., Dhar J. C. CuO nanowire-based metal semiconductor metal infrared photodetector. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2021, vol. 127, no. 5, pp. 1–6.
3. Zheng J., Zhang Q., He X., Gao M., Ma X., Li G. Nanocomposites of carbon nanotube (CNTs)/CuO with high sensitivity to organic volatiles at room temperature. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 36, pp. 235–245.
4. Lyu X. Recent progress on infrared detectors: materials and applications. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2022, vol. 27, pp. 191–200.
5. Chuang R. W., Huang Y. H., Tsai T.H. Germanium-Tin (GeSn) Metal-semiconductor-Metal (MSM). *Micromachines*, 2022, vol. 13, pp. 1733(1)–1733(16).
6. Pavelyev V., Sharma P., Rymzhina A., Mishra P., Tripathi N. Advances in transition metal dichalcogenides-based flexible photodetectors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, vol. 33(32), pp. 24397–24433.
7. Moumen A., Kumarage G. C. W., Comini E. P-Type metal oxide semiconductor thin films: synthesis and chemical sensor applications. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 1359(1)–1359(45).
8. Faisal A. D., Aljubouri A. A., Khalef W. K. Photodetector fabrication based on heterojunction of CuO/SnO₂/Si nanostructures. *Bulletin of Materials Science*, 2022, vol. 45(2), pp. 84–92.

9. Lillo-Ramiro J., Guerrero-Villalba J. M., Mota-González M. L., eds. Optical and microstructural characteristics of CuO thin films by sol gel process and introducing in non-enzymatic glucose biosensor applications. *Optik*, 2021, vol. 229, pp. 166238(1)–166238(13).
10. Gokhale V. J., Shenderova O. A., McGuire G. E., Rais-Zadeh M. Infrared absorption properties of carbon nanotube/nanodiamond based thin film coatings. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, vol. 23(1), pp. 191–196.
11. Dai J., Yuan L., Zhong Q., eds. A simple infrared nanosensor array based on carbon nanoparticles. *Frontiers of Optoelectronics*, 2012, vol. 5(3), pp. 266–270.
12. Application RF, no. 2023103450, 2023.
13. Aung N. W., Pugachevskii M. A., Kuzmenko A. P., Than M. M. Nanocomposite films of CNPs/CuO structures by electrophoresis method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2064(1), pp. 012105(1)–012105(6).
14. Tiyek İ., Yazıcı M., Alma M. H., Karataş Ş. The investigation of the electromagnetic shielding effectiveness of multi-layered nanocomposite materials from reduced graphene oxide-doped P(AN-VAc) nanofiber mats/PP spunbond. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53(11), pp. 1541–1553.
15. Lee T., Min S. H., Gu M., eds. Layer-by-layer assembly for graphene-based multilayer nanocomposites: synthesis and applications. *Chemistry of Materials*, 2015, vol. 27(11), pp. 3785–3796.
16. Olek M., Ostrander J., Jurga S., eds. Layer-by-layer assembled composites from multi-wall carbon nanotubes with different morphologies. *Nano Letters*, 2004, vol. 4(10), pp. 1889–1895.
17. Hong T. K., Lee D. W., Choi H. J., Shin H. S., Kim B. S. Transparent, flexible conducting hybrid multilayer thin films of multiwalled carbon nanotubes with graphenenanosheets. *ACS Nano*, 2010, vol. 4(7), pp. 3861–3868.
18. Rivero P. J., Goicoechea J., Arregui F. J. Layer-by-layer nano-assembly: A powerful tool for optical fiber sensing applications. *Sensors*, Switzerland, 2019, vol. 19(3), pp. 683–718.
19. Roopan S. M., Sharma H., Kumar G., Mishra A., Agrawal V. A Green systematic approach of Carbon/CuO nano composites using aristolochia brac-teolate by response surface methodology. *Journal of Cluster Science*, 2019, vol. 30(5), pp. 1177–1183.
20. Prasad B. S. N., Padmesh T. V. N., Suganya K. S. U., Govindaraju K., Kumar V. G. Facile green synthesis of carbon nanoparticles using medicinally potent Pongamiapinnata shoots. *Journal of Environment and Biotechnology Research*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 12–16.
21. Hossain M. A. Synthesis of carbon nanoparticles from kerosene and their characterization by SEM/EDX, XRD and FTIR. *American Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, vol. 1(2), pp. 52–56.
22. Borzooeian Z., Taslim M. E., Rezvani S., Borzooeian G. A high precision length-based carbon nanotube ladder. *RSC Advances*, 2018, vol. 8(63), pp. 36049–36055.
23. Sapkota K. P., Islam M. A., Hanif M. A., Akter J., Hahn J. R. Chemical assembly of copper oxide and single walled carbon nanotubes for enhanced photocatalytic dye degradation under solar light irradiation. *Materials proceedings*, 2021, vol. 4(1), pp. 1–5.
24. Liu X., Geng B., Du Q., Ma J., Liu X. Temperature-controlled self-assembled synthesis of CuO, Cu₂O and Cu nanoparticles through a single-precursor route. *Materials Science and Engineering A*, 2007, vol. 448, pp. 7–14.
25. Karimzadeh M., Niknam K., Manouchehri N., Tarokh D. A green route for the cross-coupling of azide anions with aryl halides under both base and ligand-free conditions: Exceptional performance of a Cu₂O-CuO-Cu-C nanocomposite. *RSC Advances*, 2018, vol. 8(45), pp. 25785–25793.

26. Alhumaimess M. S., Essawy A. A., Kamel M. M., Alsohaimi I. H., Hassan H. M. A. Biogenic-mediated synthesis of mesoporous Cu₂O/CuO nano-architectures of superior catalytic reductive towards nitroaromatics. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10(4), pp. 781–795.
27. Barua S., Chattopadhyay P., Phukan M. M., Konwar B. K., Karak N. Hyperbranched epoxy/MWCNT-CuO-nystatin nanocomposite as a high performance, biocompatible, antimicrobial material. *Materials Research Express*, 2015, vol. 1(4), pp. 045402(1)–045402(26).
28. Peng F., Sun Y., Yu W., eds. Studies on sensing properties and mechanism of CuO nanoparticles to H₂S gas. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10(4), pp. 774–788.
29. Monshi A., Foroughi M. R., Monshi M. R. Modified scherrer equation to estimate more accurately nano-crystallite size using XRD. *World Journal of Nano Science and Engineering*, 2012, vol. 02(03), pp. 154–160.
30. Singh S., Goswami N. Dielectric study of pure CuO nanoparticles prepared through exploding wire technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, vol. 34(3), pp. 1–14.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ней Вин Аунг, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: naywinaungnano@gmail.com

Nay Win Aung, Post-Graduate Student of the Department of the of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: naywinaungnano@gmail.com

Пугачевский Максим Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, директор Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pmaximal@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5004-0823

Maksim A. Pugachevskii, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Director of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pmaximal@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5004-0823

Филиппов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математики и физики института естественных, математических и технических наук, Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, г. Липецк, Российская Федерация, e-mail: wwfilippow@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4323-351X

Vladimir V. Filippov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department of Mathematics and Physics of the Institute of Natural, Mathematical and Technical Sciences, Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation, e-mail: wwfilippow@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4323-351X

Емельянов Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vmemelianov@yandex.ru

Viktor M. Yemelyanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Scientific, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vmemelianov@yandex.ru