

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.121

Морфология и электрофизические свойства модифицированных ленгмюровских пленок оксида графена

Горбачев И.А., Колесов В.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>

Москва 125009, Российская Федерация

E-mail: iliyagor36@gmail.com, kvv@cplire.ru

Поступила 01.12.2023, рецензирована 12.12.2023, принята 13.12.2023, опубликована 15.03.2024.

Аннотация: Проведено исследование электрофизических свойств и морфологии пленок Ленгмюра-Блоджетт модифицированного оксида графена (ОГ). Методом Ленгмюра-Блоджетт сформированы пленочные структуры на основе ленгмюровских монослоев ОГ, сформированные на субфазе при наличии и в отсутствии растворенной соли хлорида олова. Изотермы сжатия монослоев, сформированных в присутствии ионов олова, сместились в сторону больших занимаемых площадей. Сформированные при различных условиях ленгмюровские монослои оксида графена были перенесены на твердые подложки и исследованы методом атомно-силовой микроскопии и вольтамперометрии. Установлено, что наличие ионов олова в водной субфазе приводит к изменениям морфологии сформированных пленок. Так у таких пленок увеличилась средняя шероховатость и площадь поверхности с 0.2 нм и 0.04 мкм² до 5.4 нм и 0.46 мкм², соответственно. Наличие растворенных в водной субфазе ионов олова оказало влияние на вид вольтамперных характеристик исследуемых пленок. Увеличивается максимальный обратный ток с 0.75 нА до -0.3 нА и увеличивается сопротивление с 11 ГОм до 700 ГОм. Температурный отжиг пленки оксида графена при 300°C приводит к уменьшению максимального прямого и увеличению обратного токов с 0.0407 нА и -0.071 нА до 0.0065 нА и 0.0616 нА, соответственно. Для пленки, содержащей ионы в субфазе, отжиг не оказывает влияния на максимальный прямой ток, а ток обратной ветви ВАХ увеличивается с -0.1669 нА до 0.0468 нА.

Ключевые слова: пленки оксида графена, ленгмюровские монослои оксида графена, проводимость тонких пленок, гибридные покрытия на основе оксида графена

УДК 539.23, 544.032.7

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-29-20317.

Для цитирования: Горбачев И.А., Колесов В.В. Морфология и электрофизические свойства модифицированных ленгмюровских пленок оксида графена. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):121-128. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.121.

Morphology and electrical properties of modified Langmuir graphene oxide films

Iliya A. Gorbachev, Vladimir V. Kolesov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: iliyagor36@gmail.com, kvv@cplire.ru

Received December 01, 2023, peer-reviewed December 12, 2023, accepted December 13, 2023, published March 15, 2024.

Abstract: The work devoted to study of the electrical properties and morphology of Langmuir-Blodgett films of modified graphene oxide (GO). The Langmuir-Blodgett method was used for studying of formation process of Langmuir monolayers formed on the subphase contained dissolved ions of tin chloride salt. The compression isotherms of monolayers formed in the presence of tin ions

shifted towards larger occupied areas. Langmuir monolayers of graphene oxide formed under various conditions were transferred on solid substrates and studied by atomic force microscopy and voltammetry. It has been established that the presence of tin ions in the aqueous subphase leads to changes in the morphology of the formed films. Thus, the average roughness and surface area of such films increased from 0.2 nm and 0.04 μm^2 to 5.4 nm and 0.46 μm^2 , respectively. The presence of tin ions dissolved in the aqueous subphase influenced the type of current-voltage characteristics of the films under study. The maximum reverse current increases from 0.075 nA to -0.3 nA and the resistance increases from 11 GOhm to 700 GOhm. Temperature annealing of the graphene oxide film at 300°C leads to a decrease in the maximum forward current and an increase in the reverse current from 0.0407 nA and -0.071 nA to 0.0065 nA and 0.0616 nA, respectively. For a film formed in the presence of ions in the subphase, annealing does not affect the maximum forward current, and the current of the reverse branch of the current-voltage characteristic increases from -0.1669 nA to 0.0468 nA.

Keywords: graphene oxide thin films, Langmuir graphene oxide monolayers, thin films conductivity, graphene oxide hybrid coatings

UGC 539.23, 544.032.7

Acknowledgements: The research was carried out with financial support from the Russian Science Foundation, grant № 22-29-20317.

For citation: Iliya A. Gorbachev, Vladimir V. Kolesov. Morphology and electrical properties of modified Langmuir graphene oxide films. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):121-128e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.121

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (122)
 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ (123)
 - 2.1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (123)
 - 2.2. ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИХ МОНОСЛОЕВ И ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ ОКСИДА ГРАФЕНА (123)
 - 2.3. ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ (124)
 - 2.4. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК (125)
 3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ (126)
 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (126)
- ЛИТЕРАТУРА (127)

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время обеспечение экологического мониторинга состояния атмосферы является актуальной задачей. Это связано с растущим уровнем загрязнения окружающей среды. Особую актуальность данная задача приобретает в крупных городах с большим количеством автомобильного транспорта. Одним из продуктов выхлопа автомобиля являются угарный и углекислый газ. Разработка сенсорных покрытий,

способных селективно поглощать угарный или углекислый газ является актуальной задачей при разработке газовых сенсоров. Перспективным материалом для таких сенсорных покрытий является оксид графена [1-3].

Несмотря на возможность создания сенсоров с высокой чувствительностью [4,5], главным их недостатком является низкая селективность по отношению к целевым газам. Для решения указанной проблемы пленки на основе оксида графена модифицируют функциональными группами и наночастицами [6,7]. В частности, для создания селективных к угарному и углекислому газу покрытий сенсорные покрытия на основе оксида графена модифицируют наночастицами оксида олова [8], что позволяет существенно увеличить селективность и чувствительность сенсоров [9-11]. Также к недостаткам подобных сенсоров можно отнести низкую воспроизводимость характеристик от устройства к устройству [12,13]. Одним из подходов, позволяющим уменьшить количество дефектов в пленке оксида графена, является технология Ленгмюра-Блоджетт, поскольку при этом сохраняется возможность ориентации частиц оксида графена в пленке [14].

В настоящее время технология Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) широко распространена для формирования тонких пленок различных поверхностно-активных веществ, наночастиц и полимерных молекул [15-18]. Также существуют работы, посвященные формированию и исследованию свойств ленгмюровских монослоев оксида графена [19]. В работе [20] изучено влияние кислотности субфазы на морфологию пленок Ленгмюра-Блоджетт оксида графена. Показано, что изменение кислотности позволяет управлять толщиной пленок оксида графена. Одной из перспективных задач в этом направлении является допирование монослоя оксида графена ионами различных металлов. В частности, в работе [21-23] было проведено исследование взаимодействия между коллоидными частицами оксида графена и ионами тяжелых металлов. Наличие подобных работ позволяет сделать вывод о возможности встраивания заряженных частиц в пленки графена. В работе [24,25] изучен процесс встраивания ионов Cs^{2+} , Sr^{2+} и Y^{3+} в пленку графена на поверхности воды. Авторы продемонстрировали, что адсорбция ионов определяется не только электростатическим взаимодействием с оксидом графена, а носит более сложный характер. Необходимо отметить, что встраивание ионов металлов в ленгмюровские монослои оксида графена может привести к созданию новых типов упорядоченных двумерных материалов. Таким образом, исследование электрофизических свойств ЛБ-пленок оксида графена с адсорбированными ионами, а также влияние на их свойства процесса температурной обработки является достаточно актуальной задачей. Указанная проблема приобретает особую актуальность при попытках сенсбилизации пленок оксида графена оксидными частицами.

Поэтому целью данной работы было изучение влияния ионов металлов, растворенных в водной субфазе на электрофизические свойства и морфологию пленок Ленгмюра-Блоджетт оксида графена, а также исследование влияния термической обработки пленок.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для приготовления рабочего раствора оксида графена использовался порошок оксида графена

со средним диаметром частиц от 10 до 100 мкм (ООО "Русграфен", Россия). Порошок оксида графена растворялся в смеси вода:метанол с объемным соотношением компонентов 1:5. Полученный раствор с концентрацией оксида графена 0.5 мг/мл подвергался дополнительной обработке ультразвуком в УЗ-ванне (Skymen JP-031S, Китай) мощностью 180 Вт в течение 30 минут. Далее раствор центрифугировался при скорости вращения 4000 об/мин в течении 30 минут. После расслоения раствора и выпадения осадка производился отбор надосадочной части раствора, которая повторно обрабатывалась ультразвуком в течение 40 минут и осаждалась в центрифуге на скорости вращения 13000 об/мин. Далее отбирался осадок, образовавшийся при центрифугировании. Осадок высушивался в вакуумной камере при комнатной температуре в течении 60 минут и повторно растворялся в смеси вода:метанол с объемным соотношением компонентов 1:5. Таким образом, получался водно-метанольный раствор частиц оксида графена с концентрацией 0.1 мг/мл. Перед формированием ленгмюровского монослоя растворы дополнительно обрабатывались ультразвуком в течение 15 минут.

Для приготовления субфазы с растворенным хлоридом олова ($SnCl_2$) использовался сухой порошок хлорида олова, который растворялся в деионизованной воде до получения концентрации 1 Моль/л. Полученный раствор разбавлялся деионизованной водой до получения концентрации 10^{-2} Моль/л, который затем использовался в качестве водной субфазы.

2.2 ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИХ МОНОСЛОЕВ И ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ ОКСИДА ГРАФЕНА

Все эксперименты по формированию и переносу ленгмюровских монослоев на твердые подложки проводились на установке KSV Nima LB Trough KN2002. Температура субфазы на протяжении всего эксперимента поддерживалась постоянной равной $22^{\circ}C$ при помощи циркуляционного охладителя А300 (ООО "Термэкс", Россия, г. Томск). В качестве субфазы использовалась деионизованная вода с удельным сопротивлением $18 \text{ МОМ} \times \text{см}$ и водный раствор хлорида олова с концентрацией 10^{-2} Моль/л. Формирование ленгмюровских

монослоев оксида графена проходило по следующей методике. На поверхность водной субфазы наносилась аликвота раствора оксида графена объемом 500 мкл. По прошествии 20 минут для деионизованной воды, 40 минут и 80 минут для субфазы, содержащей ионы олова, монослой сжимался подвижными барьерами ленгмюровской ванны с постоянной скоростью убыли площади, равной $0.7 \text{ см}^2/\text{мин}$. В процессе сжатия в автоматическом режиме производилась запись π - A диаграммы – зависимости изменения давления от площади, занимаемой монослоем.

Изотерма сжатия сформированных монослоев приведена на **Рис. 1**. Перенос монослоя на твердую подложку осуществлялся при постоянном поверхностном давлении равном 40 мН/м по методу Ленгмюра-Блоджетт – вертикальный лифт. Скорость движения подложки через монослой была постоянной и составляла 1 мм/мин . Таким образом, были сформированы 5-ти слойные пленки на основе монослоев оксида графена (пленка 1), оксида графена, адсорбировавшего ионы олова 40 минут (пленка 2) и адсорбировавшего ионы олова 90 минут (пленка 3). Поверхностные свойства монослоев можно интерпретировать при помощи анализа полученных изотерм сжатия. Линейные участки на изотерме сжатия соответствуют однородному фазовому состоянию монослоя и характеризуются модулем сжатия монослоя (k) и удельной площадью монослоя в фазовом

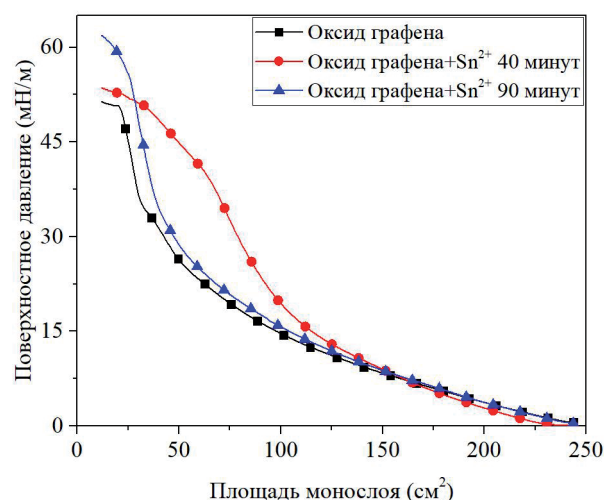


Рис. 1. Изотермы сжатия монослоев оксида графена, сформированные на деионизованной воде и на деионизованной воде, содержащей растворенные ионы олова, при 40 минутах и 90 минутах времени адсорбции ионов монослоем.

Таблица 1

Величины модуля сжатия (k) и удельной площади монослоев в ненаклонно-конденсированной фазе (A_0), сформированные при различных условиях

Состав субфазы	$A_0, \text{ см}^2$	$k, \text{ мН/м}$
Деионизованная вода	47.5	1.6
Адсорбция 40 минут	32.8	2.3
Адсорбция 90 минут	38.8	2

состоянии (A_0). Величина A_0 может быть получена путем экстраполяции линейного участка фазового состояния монослоя на ось A при величине $\pi = 0 \text{ мН/м}$. Для вычисления модуля сжатия монослоя используется формула:

$$k = -A_0 \frac{d\pi}{dA}, \quad (1)$$

где k , A и A_0 это модуль сжатия монослоя, площадь монослоя и удельная площадь монослоя в изучаемом фазовом состоянии. Поскольку величины k и A_0 изменяются при межфазовом переходе монослоя, то анализ зависимости $k(A_0)$ позволяет выделить на изотерме сжатия участки, соответствующие газообразной, наклонно-конденсированной фазе и ненаклонно-конденсированной фазе жидкой и конденсированной фазе монослоя [26-28].

Изотермы сжатия монослоев оксида графена, сформированных на водной субфазе в отсутствие и при наличии растворенных ионов олова при различном времени их адсорбции монослоем приведены на Рис. 1.

В **Таблице 1** приведены величины k и A_0 сформированных при различных условиях монослоев оксида графена.

2.3. ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Сформированные ленгмюровские монослои переносились на твердые подложки из атомарно гладкой слюды по технологии Ленгмюра-Блоджетт. Таким образом были сформированы монослойные пленки на основе монослоев оксида графена, сформированных в отсутствие и при наличии в субфазе растворенных ионов олова. Морфология полученных пленочных покрытий была исследована методом атомно-силовой микроскопии на установке NT-MDT Netgra в гибридном режиме. На **Рис. 2** приведены типичные изображения морфологии поверхности полученных пленок.

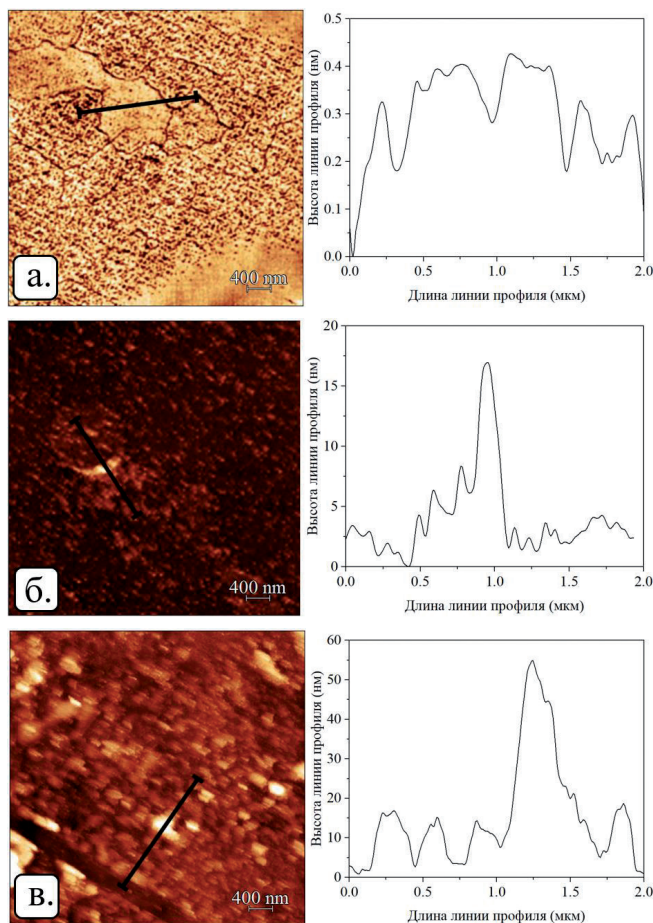


Рис. 2. Изображения поверхности и линии ее профиля пленки оксида графена (а), пленки на основе монослоя, адсорбировавшего ионы олова 40 минут (б) и 90 минут (в).

Математическая обработка полученных изображений в программе Gwyddion 2.63 позволила определить среднюю площадь поверхности пленки (S) и величину ее средней шероховатости (R_a). Площадь поверхности пленки рассчитывалась методом триангуляции, средняя шероховатость поверхности пленки рассчитывалась по формуле [29,30]:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |r_j|, \quad (2)$$

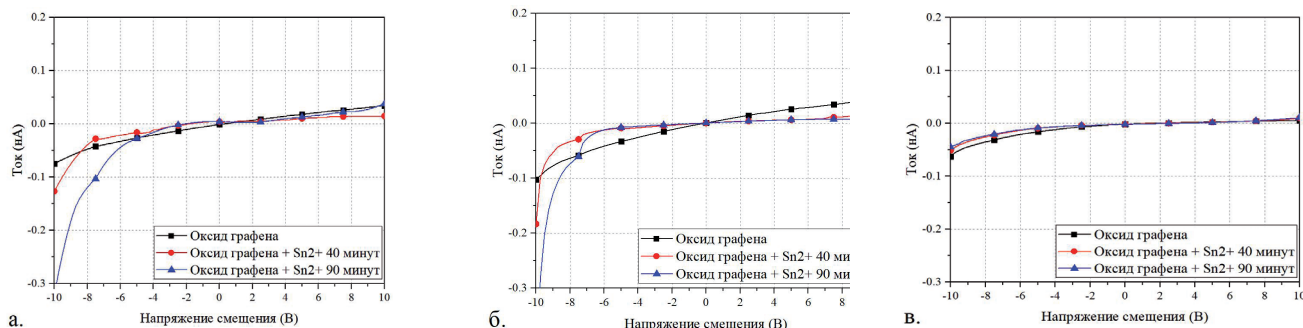


Рис. 3. Вольтамперные характеристики сформированных пленок до отжига (а), после отжига при температуре 150°C (б) и 300°C (в).

Таблица 2

Величины средней шероховатости поверхности (R_a) пленки и площадь ее поверхности (S)

Пленка	$R_a, \text{нм}$	S, μ^2
Оксид графена	0.2	0.04
Оксид графена + SnCl ₂ 40 минут	1.4	0.42
Оксид графена + SnCl ₂ 90 минут	5.4	0.46

где R_a это среднее арифметическое отклонение профиля от базовой линии (средняя линия профиля), N это количество точек, в которых измерялся параметр шероховатости R_a , а r_j это абсолютное отклонение значения высоты профиля от средней линии в каждой точке измерения шероховатости.

В Таблице 2 приведены величины средней шероховатости и площади поверхности сформированных при различных условиях пленок.

2.4 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК

Ленгмюровские монослои оксида графена, сформированные при различных условиях, были перенесены на твердые подложки из покровного стекла с сформированными встречно-пштыревыми электродными структурами. Расстояние между пштырями составляло 100 мкм. Электрофизические характеристики пленок 1, 2 и 3 исследовались методом вольтамперометрии. Измерение вольтамперных характеристик происходило на пикоамперметре Keithley 6487 в диапазоне изменения напряжений (+10 В, -10 В) с шагом развертки 0.2 В. Отжиг сформированных пленочных покрытий производился при температуре 150°C и 300°C в течении 30 минут в воздушной атмосфере. Вольтамперные характеристики изучаемых пленок приведены на Рис. 3.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Изотерма сжатия монослоев оксида графена, сформированных при различных условиях, приведены на Рис. 1. У монослоя оксида графена можно выделить газовую фазу, соответствующую участку I-II, наклонную конденсированную фазу (участок II-III) и ненаклонно-конденсированную фазу (участок III-IV). На рисунке видно, что при величине поверхностного давления, превышающей 50 мН/м наступает коллапс монослоя, который характеризует резкое изменение угла наклона изотермы сжатия. Добавление ионов олова в субфазу оказывает влияние на вид изотермы сжатия в зависимости от времени взаимодействия ионов олова с частицами оксида графена. При времени взаимодействия 40 минут увеличивается давление коллапса монослоя с 50 мН/м до 60 мН/м. Также увеличивается модуль сжатия монослоя с 1.6 мН/м до 2.3 мН/м. Величина A_0 увеличивается с 49 см² до 51 см². На рисунке видно, что изотерма сжатия монослоя, сформированного при времени взаимодействия оксида графена и ионов олова 90 минут, также сдвинулась в сторону больших площадей. Таким образом, можно сделать вывод, что ионы олова оказывают расширяющее действие на монослой оксида графена.

На Рис. 2 представлены изображения поверхности пленок оксида графена, сформированных при наличии и в отсутствие ионов олова в субфазе. Монослой использованных частиц оксида графена имеет толщину порядка 0.2 до 0.4 нм с латеральными размерами отдельных частиц от 1 до 4 мкм. Подобный разброс в высотах позволяет сделать вывод о многослойности отдельных частиц графена. Взаимодействие монослоя оксида графена с ионами олова приводит к изменению морфологии пленки, при этом средняя шероховатость пленки увеличивается с 0.2 до 1.4 нм, а средняя площадь поверхности увеличивается на 0.38 мкм². Из рисунка видно, что на поверхности пленки можно выделить агрегаты с высотами от 3 до 20 нм и площадями до 0.8 мкм². Таким образом, увеличение времени взаимодействия ионов олова с монослоем оксида графена приводит к увеличению средней шероховатости до 5.4 нм и средней

площади поверхности до 0.46 мкм². При этом средние высоты сформировавшихся агрегатов увеличились и находились в диапазоне от 15 нм до 55 нм. Взаимодействие ионов олова и ленгмюровского монослоя оксида графена приводит к формированию агрегатов на поверхности пленки и размеры этих агрегатов увеличиваются при увеличении времени взаимодействия монослоя оксида графена и ионов олова.

На Рис. 3 приведены вольтамперные характеристики мультислойных пленок 1, 2 и 3. Вольтамперная характеристика пленки 1 имеет линейный вид. Ее проводимость составляла величину порядка 0.09 пСм. Наличие агрегатов гидроксида олова в пленке приводит к изменению вида ВАХ. Вольтамперные характеристики пленок 2 и 3 имеют нелинейную форму, увеличение времени адсорбции ионов олова приводит к росту максимального обратного тока с 0.125 нА до 0.3 нА. Максимальный ток прямой ветви ВАХ при с увеличением времени адсорбции ионов олова уменьшается с 0.025 нА до 0.01 нА. Термическая обработка сформированных пленки 1 в течении 30 минут при температуре 150°C приводит к увеличению тока прямой и обратной ветвей ВАХ до -0.1 нА и 0.05 нА, соответственно. Максимальный ток обратной ветви ВАХ пленок 2 и 3 также увеличивается до 0.18 нА и 0.4 нА, соответственно. Увеличение максимальных токов может быть связано с началом процесса восстановления оксида графена и увеличением его проводимости. Вместе с этим высокая дефектность пленок и потеря проводимости на краях частиц восстановленного оксида графена объясняет низкие величины проводимости в пленках. Отжиг пленок при температуре 300°C приводит к увеличению сопротивления пленок до 700 ГОм. После отжига при температуре 300°C ВАХи пленок 2 и 3 приобретают линейный вид. Подобный эффект может быть связан с восстановлением оксида графена и десорбцией частиц диоксида олова с поверхности пленки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе изучены электрофизические свойства и морфология пленок Ленгмюра-Блоджетт на основе оксида графена при их термическом

восстановлении. Показана возможность проведения модификации ленгмюровских монослоев оксида графена ионами металлов в процессе формирования монослоев. Продемонстрирована возможность управления электропроводностью пленок Ленгмюра-Блоджетт оксида графена путем их термической обработки. Определен температурный режим восстановления, при котором вольтамперные характеристики сохраняют нелинейный вид. Подход, использованный в работе, может быть использован для формирования сенсорных покрытий, чувствительных к угарному и углекислому газам, для разработки газовых датчиков с большей чувствительностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anju M, Renuka NK. Graphene–dye hybrid optical sensors. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2019, 17:194-217.
2. Tiwari SK, Sahoo S, Wang N, Huczko A. Graphene research and their outputs: Status and prospect. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2020, 5(1):10-29.
3. Kornilov DY. Graphene oxide - a new electrode nanomaterial for chemical current sources. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2021, 13(1):105-108. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.105.
4. Schedin F; Novoselov KS. Detection of Individual Gas Molecules by Graphene Sensors. *Nat. Mater.*, 2006, 6:652-655.
5. Yavari F, Castillo E, Gullapalli H, Ajayan PM, Koratkar N. High sensitivity detection of NO₂ and NH₃ in air using chemical vapor deposition grown graphene. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100:203120.
6. Koteeswara RN, Devika M, Sungwon L. Functionalization of graphene layers and advancements in device applications. *Carbon*, 2019, 152:954-985.
7. Mehmood A, Mubarak NM, Khalid M, Walvekar R, Abdullah EC, Siddiqui MTH, Baloch HA, Nizamuddin S, Mazari S. Graphene based nanomaterials for Strain Sensor Application A-review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(3):103743.
8. Lee ZY, Fahmi bin Hawari H, Witjaksono bin Djaswadi G, Kamarudin K. A Highly Sensitive Room Temperature CO₂ Gas Sensor Based on SnO₂-rGO Hybrid Composite. *Materials*, 2021, 14:522.
9. Tai H, Yuan Z, Zheng W, Ye Z, Liu C, Du X. ZnO Nanoparticles/Reduced Graphene Oxide Bilayer Thin Films for Improved NH₃-Sensing Performances at Room Temperature. *Nanoscale Research Letters*, 2016, 11:130.
10. Lee J-H, Kang W-S, Najeeb CK, Choi B-S, Choi S-W, Lee HJ, Lee SS, Kim J-H. A hydrogen gas sensor using single-walled carbon nanotube Langmuir–Blodgett films decorated with palladium nanoparticles. *Sensors and Actuators B*, 2013, 188:169-175.
11. Botcha VD, Sutar DS, Major SS. Study of GO-Cu₂O and RGO-Cu nanocomposite monolayer sheets prepared by modified Langmuir Blodgett route. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2018, 118:158-165.
12. Massera E, Miglietta ML, Polichetti T, Ricciardella F, Girolamo A, Francia D. Reproducibility of the Performances of Graphene-Based Gas-Sensitive Chemiresistors. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, 268, doi: 10.1007/978-3-319-00684-0-26.
13. Schedin F, Geim AK, Morozov SV, Hill EH, Blake P, Katsnelson MI, Novoselov KS. Detection of Individual Gas Molecules Adsorbed on Graphene. *Nat. Mater.*, 2007, 6:652-655.
14. Shi L-F, Liu J-Z, Yang J-H, Cai L-F, Shi L-Y, Qiu H-X. Langmuir-Blodgett assembly of transparent graphene oxide-silver microwire hybrid films with an antibacterial property. *New Carbon Materials*, 2017, 32(4):344-351.
15. Kondalkara VV, Yang SS, Patil PS, Choudhury S, Bhosale PN, Lee KK. Langmuir-Blodgett assembly of nanometric WO₃ thin film for electrochromic performance: A new way. *Materials Letters*, 2017, 194:102-106.
16. Podolskaya EP, Serebryakova MV, Krasnov KA, Grachev SA, Gzgyzane AM, Sukhodolov NG. Application of Langmuir–Blodgett technology for the analysis of saturated fatty acids using the MALDI-TOF mass spectrometry. *Mendeleev Commun.*, 2018, 28:337-339.
17. Xu L, Tetreault AR, Khaligh HH, Goldthorpe IA, Wettig SD, Pope MA. Continuous Langmuir-Blodgett Deposition and Transfer by Controlled

- Edge-to-Edge Assembly of Floating 2D Materials. *Langmuir*, 2019, 35:51-59.
18. Ly TN, Park S. Highly sensitive ammonia sensor for diagnostic purpose using reduced graphene oxide and conductive polymer. *Scientific Reports*, 2018, 8:18030.
 19. Zheng Q-B, Shi L-F, Yang J-H. Langmuir-Blodgett assembly of ultra-large graphene oxide films for transparent electrodes. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2012, 22:25042511.
 20. Botchaa VD, Narayanama PK, Singha G, Talwar SS, Srinivasa RS, Major SS. Effect of substrate and subphase conditions on the surface morphology of graphene oxide sheets prepared by Langmuir–Blodgett technique. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2014, 452:65-72.
 21. Park S, Lee K-S, Bozoklu G, Cai W, Nguyen SBT, Ruoff RS. Graphene Oxide Papers Modified by Divalent Ions—Enhancing Mechanical Properties via Chemical Cross-Linking. *ACS NANO*, 2008, 2(3):572-578.
 22. Mokoena LS, Mofokeng JP. A Review on Graphene (GN) and Graphene Oxide (GO) Based Biodegradable Polymer Composites and Their Usage as Selective Adsorbents for Heavy Metals in Water. *Materials*, 2023, 16:2527.
 23. Groshkova YuA, Buslaeva EYu, Kraevskii SV, Gubin SP. Preparation of titanium oxide nanoparticles on the surface of reduced graphene oxide in supercritical isopropanol. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(1):43-50. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.043.
 24. Monjezi R, Azadi R, Hamoule T. Design, synthesis, and characterization of thiol-decorated cross-linked graphene oxide framework for high-capacity Hg²⁺ ion adsorption. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2024, 28:101786.
 25. Carr AJ, Kumal RR, Bu W, Uysal A. Effects of ion adsorption on graphene oxide films and interfacial water structure: A molecular-scale description. *Carbon*, 2022, 195:131-140.
 26. Vollhardt D, Fainerman VB. Progress in characterization of Langmuir monolayers by consideration of compressibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, 127:83-97.
 27. Khomutov GB, Gainutdinov RV, Gubin SP, Kislov VV, Rakhnyanskaya AA, Sergeev-Cherenkov AN, Tolstikhina AL. Formation and organization of planar polymeric and nanocomposite nanostructures on liquid and solid surfaces. *Surface Science*, 2004, 566(568):396-401.
 28. Vu TT, Kharitonova NV, Maiorova LA, Gromova OA, Torshin IY, Koifman OI. Compression Speed as a Parameter Changing the Dimensionality of Corrole Nanostructures in Layers at the Air-Water Interface. *Macrobicycles*, 2018, 11(3):286-292.
 29. Necas D, Klapetek P, Valtr M. Estimation of roughness measurement bias originating from background subtraction. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31:094010.
 30. Necas D, Valtr M, Klapetek P. How levelling and scan line corrections ruin roughness measurement and how to prevent it. *Scientific Reports*, 2020, 10:15294.

Горбачев Илья Алексеевич

к.х.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: iliyagor36@gmail.com

Колесов Владимир Владимирович

к.ф.-м.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: kvv@cplire.ru.