

**Свойства металлоорганических супрамолекулярных комплексов
углеродных квантовых нитей***Н. Д. Новиков, С. Л. Василяк, М. И. Баркова, Ю. Б. Яненко*

Ионно-плазменным способом в импульсном режиме с ионной стимуляцией синтезировались плёнки самоорганизованного двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода (ДУЛЦУ) толщиной 50–300 нм. В межцепочечное пространство плёнки ДУЛЦУ внедрялись атомы других элементов. Это осуществлялось путём их допирования в процессе синтеза или прямым контактным диффузионным взаимодействием. Отжиг таких систем приводит к изменению морфологических, оптических и электрофизических свойств. Внедрялись различные элементы, показаны структуры для образцов с платиной, никелем, серебром. Рассмотрены результаты исследования свойств плёнок ДУЛЦУ, интеркалированных серебром. Показаны изменения структуры и свойств в процессе приготовления образцов: на атомном силовом микроскопе, на спектрофотометре Lambda-25, на просвечивающем электронном микроскопе. Рассмотрена электронограмма, доказывающая интеркалирование кластеров атомов серебра в плёнку ДУЛЦУ. Изменения электрических свойств показаны на примере датчика влажности, изготовленного на основе системы Ag–ДУЛЦУ–Sn.

Ключевые слова: ориентированные углеродные структуры, sp^1 -гибридизация, гибриды углерод-металл, структура, свойства, линейно-цепочечный углерод.

Ссылка: Новиков Н. Д., Василяк С. Л., Баркова М. И., Яненко Ю. Б. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 3. С. 167.

Reference: N. D. Novikov, S. L. Vasilyak, M. I. Barkova, and Yu. B. Yanenko, Usp. Prikl. Fiz. **8** (3), 167 (2020).

Введение

Аллотропные формы отличаются друг от друга типом гибридизации валентных электронов углеродных атомов (sp^1 , sp^2 , sp^3), со-

Новиков Николай Дмитриевич, к.ф.-м.н.

Василяк Сергей Леонидович, старший инженер отдела композитных материалов.

Баркова Марина Ивановна, зам. нач. отдела композитных материалов, к.х.н.

Яненко Юрий Борисович, гл. конструктор, к.т.н.

Специальное конструкторско-технологическое бюро по электрохимии с опытным заводом.

Россия, 129226, Москва, ул. Сельскохозяйственная, 12.

E-mail: nick.d.nov@mail.ru; sergey.vsl@gmail.com;

barkovami@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24 мая 2020 г.

© Новиков Н. Д., Василяк С. Л., Баркова М. И., Яненко Ю. Б., 2020

ставляющих ячейку кристалла или иной структуры. Трёхмерному пространственному полимеру углерода алмазу, соответствует состояние sp^3 . Графит состоит из плоских листов, каждый из которых является двумерным (плоским полимером – графеном), и ему соответствует вторая аллотропная форма углерода с гибридизацией sp^2 . Третья аллотропная форма углерода с валентным состоянием sp^1 соответствует одномерному линейному полимеру – карбину [1]. Свойства углерода в sp^3 гибридизации (алмаз) исследованы хорошо и есть несколько способов промышленного синтеза алмазов. Свойства углерода в sp^2 -гибридизации (графен) сейчас активно исследуются в связи с его возможными перспективными применениями и возможностью получать в электрических дугах [2, 3]. Доста-

точно много уделяется внимания свойствам промежуточных соединений в виде фуллеренов и нанотрубок, для промышленного синтеза которые применяются плазменные методы [4]. Свойства графита в sp^1 -гибридизации (полимерные нити – карбин) исследованы мало, т. к. его сложно получать в упорядоченном состоянии, поскольку полимерные нити оказываются переплетенными и соединенными друг с другом в неконтролируемых местах, т. е. образуется переплетенный пространственный клубок из нитей карбина [1].

При определенных условиях конденсации углеродных паров на поверхности могут образовываться линейные углеродные цепочки, ориентированные нормально к поверхности [5–7] и образующие упорядоченные ансамбли из квантовых нитей, располагающихся на расстоянии $0,4 \div 0,5$ нм и потому очень слабо взаимодействующих друг с другом. Необычные и уникальные свойства углерода в sp^1 -гибридизованном состоянии были обнаружены в уже результатах первых экспериментов по изучению особенностей синтезированных линейно-цепочечных структур углерода (ЛЦУ) [7–10]. Некоторые свойства можно было бы предсказать с точки зрения физики низкоммерных объектов, у которых, хотя бы по одной координате, проявляются квантовые свойства. Проведение таких экспериментов и интерпретации полученных результатов достаточно сложны. Более интересной является ситуация, когда одномерные квантовые нити организуют упорядоченные в пространстве комплексы и системы, объединённые слабыми межмолекулярными силами, образуя своего рода супрамолекулярные квантовые объекты. Такими объектами представляются плёнки самоорганизованного двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода (ДУЛЦУ) [6, 8, 11, 12].

Структура плёнки ДУЛЦУ представляет собой параллельные цепочки углеродных атомов в sp^1 -состоянии, ориентированные нормально по отношению к подложке и поверхности плёнки и плотно упакованные в слои, которые случайным образом смещены между собой [6, 12]. Механическую устойчивость цепочек ДУЛЦУ обеспечивает σ -связь, а электрические свойства – π -связь, электроны которой делокализованы по всей цепи атомов

углерода. Эта структура определяет электрическую и механическую анизотропию плёнок: вдоль цепочек проводимость плёнки металлическая или полупроводниковая, поперёк – плёнка представляет собой диэлектрик [8], вдоль цепочек твёрдость выше алмазной, поперёк плёнка эластична и похожа на полимер [10, 11].

Наличие примесей меняет электрофизические, электрохимические и биологические свойства углеродных sp^1 гибридизированных плёнок ДУЛЦУ [13]. В случае слабых связей в ансамблях при наличии примесей образуются устойчивые и вместе с тем гибко изменяющие свою структуру ассоциаты. Они могут быть монокристаллическими или поликристаллическими, с наличием в своей структуре в виде включений других форм углерода или неорганических включений, не взаимодействующих или слабо взаимодействующих с матрицей упорядоченных цепочек. В качестве «гостя» в матрице углеродных цепочек могут находиться не только молекулы и атомы, но также и катионы и ионы. Область приложения супрамолекулярной химии обширна и наиболее перспективное направление – сборка наноразмерных частиц и устройств, имеющих большое значение для развития нанотехнологий.

Материалы, содержащие линейно-цепочечный углерод, в силу уникальных физико-химических свойств перспективны для применений в различных областях, таких как микроэлектро- и наноэлектроника [5, 12, 14–16], приборостроение [17], катализ, электрохимия [18], медицина [9, 19] и биология [20]. Биомедицинские исследования с имплантатами с покрытиями линейно-цепочечного углерода [9, 19] показали отсутствие денатурации белков на его поверхности и исключительно низкий потенциал свертывания крови. Нанесение покрытий из ДУЛЦУ на поверхность придает ей исключительную тромборезистентность, позволяет улучшить биосовместимость медицинских имплантантов и устройств, уменьшает развитие воспаления. Покрытия из ДУЛЦУ на поверхности стекла, металлов и пластика препятствуют росту грибов и проявляют антибактериальные свойства, которые зависят от дополнительно внедренных атомов [20].

Целью настоящей работы является исследование свойств покрытий из ДУЛЦУ с вне-

дренными в межцепочечное пространство атомами различных элементов.

Методика эксперимента

Пленки ДУЛЦУ синтезировались по методам, изложенным в патентах [6], электродуговым импульсным методом в контролируемой вакуумной среде. Суть метода заключается в получении из катодного углеродного пятна необходимого для данной задачи плазменного материала из углеродных цепочек, переноса их к подложке и создания условий к ориентированной конденсации на ней. Синтез композитных структур мог дополняться ионнолучевой технологией получения материалов и термоиспарением.

Внедрение в межцепочечное пространство плёнки ЛЦУ атомов других элементов осуществлялось путём их допирования в процессе синтеза и прямым контактным диффузионным взаимодействием. Первым способом были получены плёночные материалы со свойствами диэлектриков, полупроводников и металлов, на основе которых выполнены элементы пассивной и активной электроники [18]. Вторым способом выявил гипердиффузионные возможности организованных цепочечных структур углерода, оказалось что они активны в контактных взаимодействиях. Внедрение «гостя» в межцепочечное пространство может происходить без химического взаимодействия (интеркалирование), или с разрывом π -связи, которое может закончиться реакцией присоединения. В первом и во втором случае получается модифицированная углеродная плёнка с новыми свойствами.

Размеры и свойства супрамолекулярных комплексов зависят от подложки, от химической сущности «гостей», от их концентрации и степени свободы углеродных квантовых нитей. Эксперимент осуществлялся по следующей схеме. На подложку (стекло, ситалл, слюду, кремний) наносился в вакууме термическим или ионно-плазменным методом исследуемый металл толщиной от 50 нм до 200 нм. На поверхность металла ионно-плазменным способом в импульсном режиме с ионной стимуляцией синтезировался слой ЛЦУ толщиной 50–300 нм. Таким образом, создавалась система пространственно разделённых плёнок металл –

углерод. Далее образцы отжигались на воздухе или в вакууме при остаточном давлении 0,05 атм. в печи марки МИМП-ВМ при температурах от 250 °С до 450 °С. По данной методике в плёнку ЛЦУ интеркалировались следующие элементы Ag, Cu, Ni, S, Se, Te, Ti, Cd, Pb, Sn, Li, Na.

Структура поверхности

На рис. 1 показана нанотоковая топография поверхности плёнки ДУЛЦУ с 0,7 атомными процентами платины, синтезированная по первому способу. Снимок сделан вакуумным туннельным растровым микроскопом с поверхности плёнки ДУЛЦУ, нанесённой на подложку из пирографита. Как видно из снимка, «гости» (атомы платины) немного нарушают гексагональную упаковку цепочек углерода и возможно образуют связи между цепочками за счёт своей плоскоквадратной координации с лигандами CN^- , т. к. плёнка синтезировалась в присутствии азота.

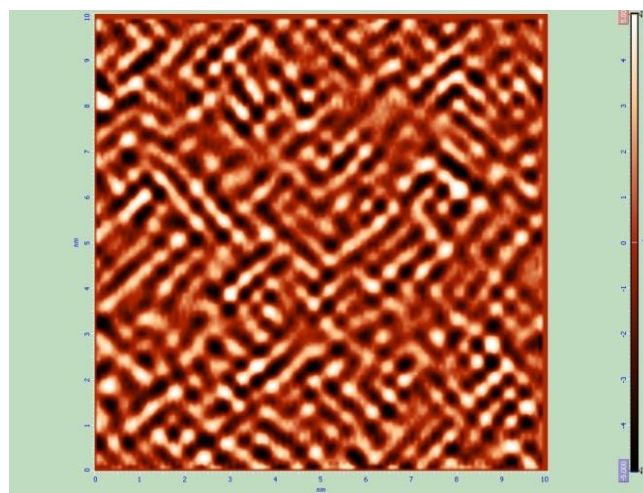


Рис. 1. Снимок, сделанный туннельным растровым микроскопом, поверхности плёнки ДУЛЦУ, допированной атомами платины с концентрацией 0,7 %. Размер ширины изображения равен 10 нм.

Пример супракомплексов углеродных цепочек можно увидеть на рис. 2, где показана топография плёнки ЛЦУ с никелем на подложке монокристалла соли NaCl, снятая в растровом электронном микроскопе, и синтезированная вторым способом. Хорошо различимы границы комплексов и их размер.

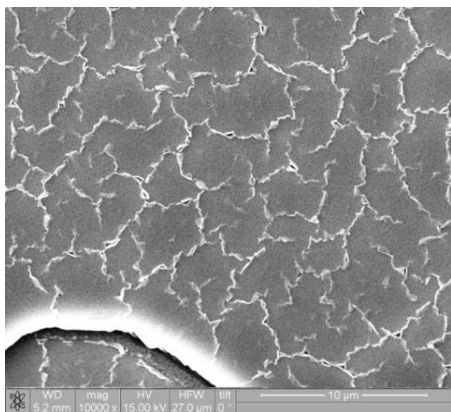


Рис. 2. Плёнка ДУЛЦУ с никелем на подложке монокристалла соли NaCl. Масштаб: длина белой линии в нижней части изображения равна 10 мкм.

Ниже рассмотрены результаты исследования свойств плёнок ДУЛЦУ, интеркалированных серебром. Образец представлял собой кварцевое стекло К-8 с плёнкой серебра, которая покрыта плёнкой ЛЦУ.

Отжиг системы приводит к изменению морфологических, оптических и электрофизических свойств пространственно разделённых плёнок серебра и ЛЦУ. Изменение морфологии поверхности показано на рис. 3. В результате отжига, как видно из рис. 3, зернистость поверхности сильно увеличивается от 50 до 200–300 нм.

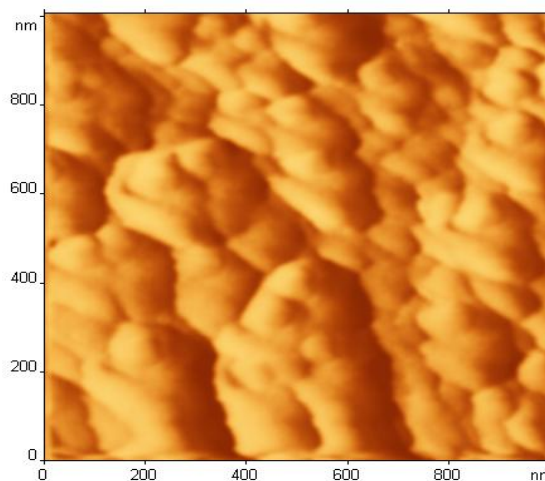
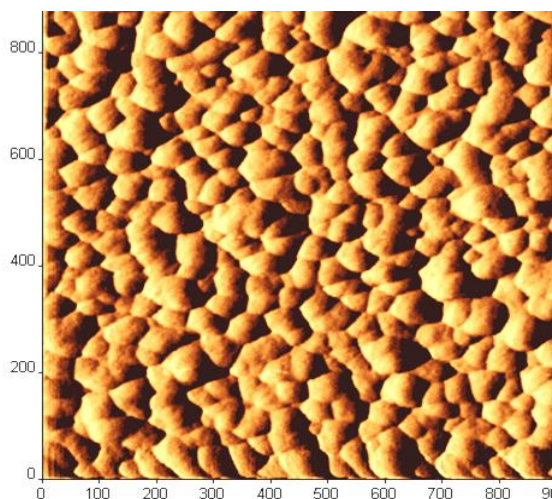


Рис. 3. Структура поверхности системы Ag–ЛЦУ до отжига (левая панель) и после (правая панель) в атомном силовом микроскопе.

Свойства плёночной системы Ag–ЛЦУ

Измерения сопротивления производили вдоль плёночной системы Ag–ЛЦУ. После отжига сопротивление плёнки увеличивается на порядок. Вольт-амперная характеристика линейна как до отжига, так и после него, т. е. удельное сопротивление постоянно. Поскольку геометрические параметры плёнки после

отжига не меняются, можно говорить об увеличении на порядок удельного сопротивления.

Оптические свойства исследовались на спектрофотометре «Lambda-25». Для исследования прозрачности плёночной системы Ag–ЛЦУ до отжига толщину слоя серебра уменьшили до 50–70 нм. Спектры пропускания до отжига и после приведены на рис. 4.

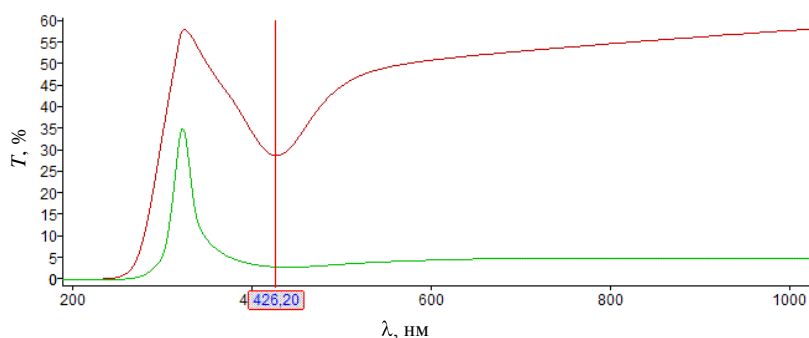


Рис. 4. Спектральная зависимость пропускания T системы Ag–ЛЦУ: до отжига (нижняя зелёная линия) и после (верхняя красная линия). Толщина слоя серебра 50–70 нм.

На рис. 4 репером выделен пик поглощения на длине волны $\lambda = 426,5$ нм, который обусловлен появлением в видимом диапазоне полос резонансного плазмонного поглощения или, так называемых поверхностных мод, возникающих вследствие коллективных колебаний свободных электронов. Количество и размеры кластеров зависят от толщины плёнок серебра. При толщине 50 нм пик плазмонного поглощения после отжига сдвинулся на 1,5 нм. Спектр пропускания для этого случая приведён на рис. 5.

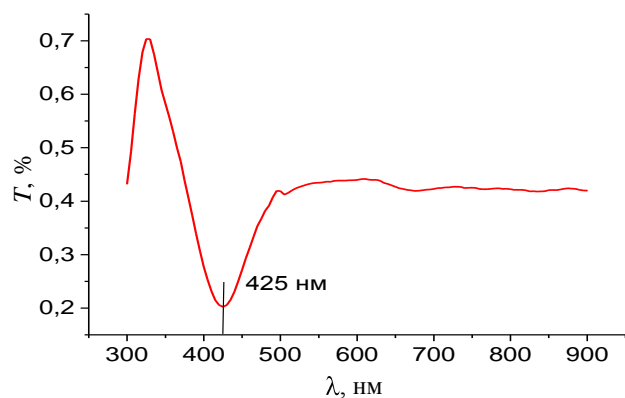


Рис. 5. Спектральная зависимость пропускания T системы Ag–ЛЦУ после отжига. Толщина слоя серебра 50 нм.

По результатам, представленным на рис. 4 и рис. 5, видно, что отжигом структур различной толщины можно управлять частотами резонансного плазмонного поглощения и пропускания, шириной резонансных пиков и их амплитудой, что может найти широкое применение в новых методах анализа, таких как экспресс-спектрометрия, создание датчиков для детектирования молекулярных структур и биомолекул. Приведённому на рис. 5 спектру пропускания системы Ag–ЛЦУ после отжига соответствует структура, которая показана на рис. 6.

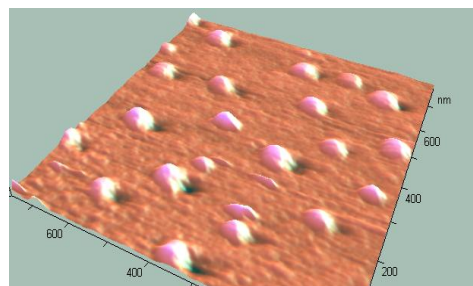


Рис. 6. Изображение кластеров системы Ag–ЛЦУ после отжига, полученных на атомно-силовом микроскопе.

Исследования структуры отожжённой плёнки системы Ag–ЛЦУ на просвечивающем электронном микроскопе представлены на рис. 7.

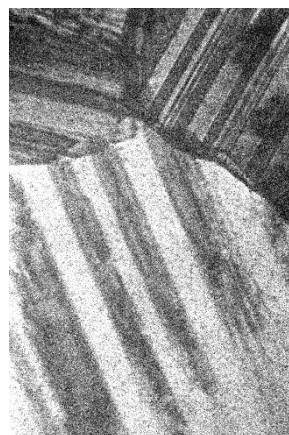


Рис. 7. Наноструктура отожжённой плёночной системы Ag–ЛЦУ. Размер ширины изображения равен 1180 нм.

Из рис. 7 следует, что плёнка после отжига представляет собой чередующиеся слои металла и sp^1 -углерода. Тёмные области (возможно) соответствуют слоям серебра, а светлые – слоям ЛЦУ. С указанного участка получена электронограмма, которая приведена на рис. 8. На рисунке 8 имеются рефлекссы серебра и ЛЦУ, что говорит в пользу интеркалирования атомов серебра в плёнку ЛЦУ. Интеркаляция (внедрение без химического взаимодействия) осуществляется в межцепочечное пространство не в виде отдельных атомов се-

ребра, а в виде кластеров.

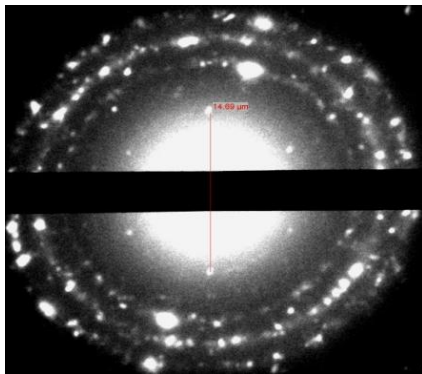


Рис. 8. Электронограмма интеркалята серебра в ЛЦУ.

Анализ элементного состава поверхности образцов пленок Ag–ЛЦУ после отжига был проведен с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на приборе LAS–3000 («Riber»), оснащенный полусферическим анализатором с задерживающим потенциалом ОРХ-50. Для возбуждения фотоэлектронов использовали рентгеновское излучение алюминиевого анода ($AlK_{\alpha} = 1486,6$ эВ) при напряжении на трубке 12 кВ и токе эмиссии 20 мА. Калибровку фотоэлектронных пиков проводили по линии углерода C1s с энергией связи 285 эВ. На рис. 9 приведен РФЭС спектр Ag3d серебра в пленке ЛЦУ в зависимости от энергии E . Цифры, указанные черным цветом, относятся к серебру Ag^0 , а красные – к серебру в составе пленки ЛЦУ. Для окиси серебра спектр смещен в сторону уменьшения энергии связи и равен 367,5 эВ. Положения максимумов спектральных линий элементов пленки Ag–ЛЦУ после отжига и элементный состав в атомных процентах приведены в таблице.

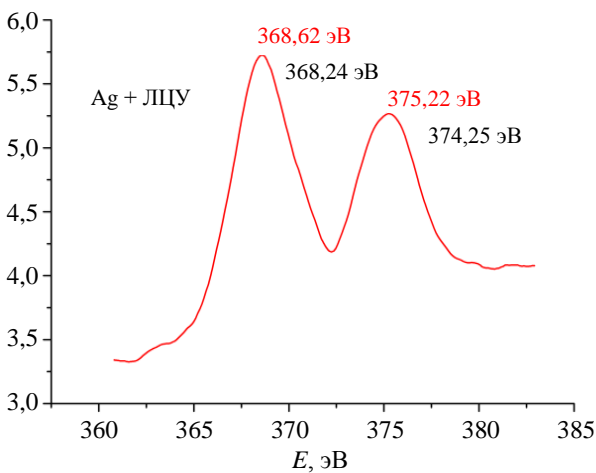


Рис. 9. Рентгеновские фотоэлектронные спектры системы Ag–ЛЦУ.

Таблица

Элементный состав пленки Ag–ЛЦУ после отжига

| | C 1s | O 1s | Ag 3d _{5/2} |
|-------------------------|------|------|----------------------|
| Положение максимума, эВ | 285 | 531 | 368,5 |
| Концентрация, атомных % | 39,1 | 25 | 35,9 |

Датчик влажности

На основе плёнки системы Ag–ЛЦУ был создан датчик влажности, схема чувствительного элемента которого показана на рис. 10. На керамическую пластину из ситалла сначала наносились два параллельных прямоугольных электрода из алюминия (Al) затем на один из них наносилась пленка из олова (Sn), а на другой – из серебра (Ag). Затем сверху на эти электроды и на керамику наносилось покрытие ДУЛЦУ. Затем, в процессе отжига ДУЛЦУ диффундирует в металлы, изменяя их структуру. На рис. 10 показана структура нанесённых плёнок в разрезе. По сути, датчик представляет собой электролитическую ячейку. Плёнка из алюминия Al является токо-съемником.

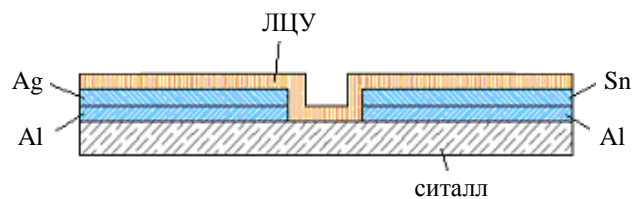


Рис. 10. Структура плёночных слоев датчика влажности.

Электрохимический потенциал возникает между пленками из серебра и олова при попадании влаги на поверхность. Плёнка из алюминия (Al) является токо-съемниками, и на них измеряют возникающую разность потенциалов. После нанесения углеродной пленки ДУЛЦУ и ее отжига, электрохимическая разность потенциалов между электродами многократно возрастает. Возникающая протонная проводимость между электродами обеспечивает электрический потенциал между электродами до 1 вольта. Если собрать из них последовательную конструкцию, то можно получить сотни вольт. Эту структуру можно ис-

пользовать как источник напряжения или как сенсор для датчика влажности. Работу датчика влажности проверяли следующим способом. Под стеклянный колокол помещали тлеющую бумагу и чувствительный элемент датчика, разность потенциалов, на электродах которого измеряли мультиметром. При тлении органического вещества выделяется влага, которая конденсируется на поверхности датчика. Между электродами датчика из серебра и олова возникает разность потенциалов, величина которой зависит от влажности. После отжига чувствительность датчика влажности увеличилась в 14 раз.

Заключение

Контактное взаимодействие ориентированных пучков квантовых нитей углерода с другими атомами или их синтез в присутствии других соединений приводит к образованию комбинированных материалов, свойства которых описываются законами супрамолекулярной химии. Термоактивация системы приводит к изменению морфологических, оптических и электрофизических свойств пространственно разделённых плёнок серебра и ЛЦУ. Плазмонный резонанс на малых частицах благородных металлов может быть использован для экспресс-детектирования молекулярных структур и биомолекул. Создан датчик влажности нового типа не требующий дополнительного источника питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев Ю. П., Бабаев В. Г., Гусева М. Б., Хвостов В. В., Савченко Н. Ф., Александров А. Ф. // Нанотехнологии: Разработка, применение – XXI век. 2010. Т. 2. № 1. С. 37.
2. Шавелкина М. Б., Амиров Р. Х., Кавыришин Д. И., Юсупов Д. И. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 97.
3. Амиров Р. Х., Исакаев Э. Х., Шавелкина М. Б., Шаталова Т. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 217.
4. Hatakeyama R. // Rev. Mod. Plasma Phys. 2017. 1:7. <https://doi.org/10.1007/s41614-017-0009-y>
5. Гусева М. Б., Бабаев В. Г., Хвостов В. В., Савченко Н. Ф., Новиков Н. Д., Александров А. Ф. // Нанотехнологии: Разработка, применение – XXI век. 2010. Т. 2. № 1. С. 29.
6. Guseva M. B., Babaev V. G., Novikov N. D. PCT Patent, International Application Number PCT/IB96/01487, December 18 (1996); WO 97/25078, July 17 (1997). US Patent 6.454.797 B2, US Patent 6.335.350 B1. Патент РФ № 2095464.
7. Гусева М. Б., Бабаев В. Г., Бабина В. М., Новиков Н. Д., Хвостов В. В. // Тезисы докладов Всероссийского симпозиума с участием учёных из стран СНГ «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, Россия, 5–9 июля 1998). С. 55.
8. Alexandrov A. F., Bozhko A. D., Novikov N. D., Novikov D. N., Babaev V. G., Guseva M. B. // Proceedings of the 5th International Conference on the Applications of Diamond Films and Related Materials (Tsukuba, Japan. August 31 – September 3, 1999). P. 573.
9. Guseva M. B., Babaev V. G., Babina V. M., Khvostov V. V., Dementjev A. P., Novikov N. D. // Abstracts of invited lectures and contributed papers of the 3rd International Workshop in Russia “Fullerenes and Atomic Clusters IWFAC’97” (St. Petersburg, June 30 – July 4, 1997). P16.3.
10. Babaev V. G., Guseva M. B., Novikov N. D., Galliamov M. O., Jaminsky I. V. // 9-th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy, Spectroscopy and Related Techniques. (Hamburg, Germany. July 20–25, 1997). We 17. 3P15.
11. Babaev V., Guseva M., Khvostov V., Novikov N., Flood P. Carbon Material with Highly Ordered Linear-Chain Structure. In “POLYYNES – Synthesis, Properties, Applications”, ed. Fr. Cataldo, (CRC press, USA, 2005), pp. 219–252.
12. Бабаев В. Г., Новиков Н. Д., Гусева М. Б., Хвостов В. В., Савченко Н. Ф., Коробова Ю. Г., Александров А. Ф. // Нанотехнологии: Разработка, применение – XXI век. 2010. Т. 2. № 1. С. 53.
13. Кочаков В. Д., Новиков Н. Д. // Вестник Чувашского университета. 2007. № 2. С. 20.
14. Хвостов В. В., Бабаев В. Г., Гусева М. Б., Савченко Н. Ф., Стрелецкий О. А., Коробова Ю. Г., Александров А. Ф. // Нанотехнологии: Разработка, применение – XXI век. 2010. Т. 2. № 1. С. 80.
15. Коробова Ю. Г., Александров А. Ф., Гусева М. Б., Новиков Н. Д., Савченко Н. Ф., Хвостов В. В. / «Фундаментальные и прикладные аспекты инновационных проектов Физического факультета МГУ». Сборник трудов научно-практической конференции (Москва, 2011), С. 58–60.
16. Новиков Н. Д., Кочаков В. Д., Телегин Г. Г., Новиков Н. Д., Гусева М. Б., Бабаев В. Г., Хвостов В. В., Александров А. Ф. // Нанотехника. 2006. № 2 (6). С. 3.
17. Скрылев А. С., Чернокожин В. В., Костюков Е. В., Константинов П. Б., Концевой Ю. А., Завадский Ю. И., Бабаев В. Г., Новиков Н. Д., Гусева М. Б., Гордиенко Ю. Н., Грузевич Ю. К., Балясный Л. М. Патент РФ № 2366031. 2009 г.
18. Фаустов А. В., Новиков Н. Д., Зайцев А. А. // Нанотехника. 2013. № 4 (36). С. 24.
19. Guseva M. B., Babaev V. G., Novikov N. D., Alexandrov A. F., Khvostov V. V., Savchenko N. F., Bystrova N. A. // Journal of Wide Bandgap Materials. 2002. № 9 (4). P. 273.
20. Поликарпов Н. А., Новикова Н. Д., Вальяно Г. Е., Василяк Л. М., Климовский И. И., Печеркин В. Я., Добринский Э. К., Малашин С. И. // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2010. № 6. С. 40.

Properties of organometallic supramolecular complexes of carbon quantum filaments

N. D. Novikov, S. L. Vasilyak, M. I. Barkova, and Yu. B. Yanenko

Joint-stock company Special Design Engineering Bureau in Electrochemistry with
Experimental Factory

12 Selskokhozyaystvennaya st., Moscow, 129226, Russia

Received May 24, 2020

Two-dimensionally ordered linear-chain carbon (LCC) films with the thickness 50–300 nm were synthesized by pulse plasma ion assisted deposition method. Atoms of other elements were implanted in the interchain space of the LCC film. This was carried out by doping them in the process of synthesis and by direct contact diffusion interaction. Annealing of such systems leads to a change in morphological, optical, and electrophysical properties. There were introduced various elements. Structures for samples with platinum, nickel, and silver were shown. The results of a research of the properties of silver-intercalated LCC are considered. Shows changes in the structure and properties during sample preparation: on an atomic power microscope, on a spectrophotometer Lambda-25, on a transmission electron microscope. The electron diffraction pattern, which proves the intercalation of clusters of silver atoms into the LCC film, is considered. Changes in electrical properties are shown on the example of a humidity sensor based on the Ag–LCC–Sn system.

Keywords: oriented carbon structures, sp^1 -hybridized state, hybrids carbon-metal, structure, linear-chain carbon.

REFERENCES

1. Yu. P. Kudryavtsev, V. G. Babaev, M. B. Guseva, V. V. Khvostov, N. F. Savchenko, and A. F. Alexandrov, *Journal Nanotechnology: development and applications – XXI Century*, **2** (1), 37 (2010).
2. M. B. Shavelkina, R. Kh. Amirov, D. I. Kavyrshin, and D. I. Yusupov, *Usp. Prikl. Fiz.* **7** (2), 97 (2019).
3. R. Kh. Amirov, E. Kh. Isakayev, M. B. Shavelkina, and T. B. Shatalova, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (3), 217 (2014).
4. R. Hatakeyama, *Rev. Mod. Plasma Phys.* 1:7 (2017) <https://doi.org/10.1007/s41614-017-0009-y>
5. M. B. Guseva, V. G. Babaev, V. V. Khvostov, N. F. Savchenko, N. D. Novikov, and A. F. Alexandrov, *Journal Nanotechnology: development and applications – XXI Century*, **2** (1), 29 (2010).
6. M. B. Guseva, V. G. Babaev, and N. D. Novikov. PCT Patent, International Application Number PCT/IB96/01487, December 18 (1996); WO 97/25078, July 17 (1997). US Patent 6.454.797 B2, US Patent 6.335.350 B1, patent RF № 2095464.
7. M. B. Guseva, V. G. Babaev, V. M. Babina, N. D. Novikov, and V. V. Khvostov, in *Proc. Amorfny'e i mikrokristallicheskie poluprovodniki* (St. Petersburg, 1998), p. 55.
8. A. F. Alexandrov, A. D. Bozhko, N. D. Novikov, D. N. Novikov, V. G. Babaev, and M. B. Guseva, *Proceedings of the 5th International Conference on the Applications of Diamond Films and Related Materials* (Tsukuba, Japan, August 31 – September 3, 1999), p. 573.
9. M. B. Guseva, V. G. Babaev, V. M. Babina, V. V. Khvostov, A. P. Dementjev, and N. D. Novikov, *Abstracts of invited lectures and contributed papers of the 3rd International Workshop in Russia "Fullerenes and Atomic Clusters IWFAC'97"*, (St. Petersburg, Russia, June 30 – July 4, 1997). P16.3.
10. V. G. Babaev, M. B. Guseva, N. D. Novikov, M. O. Galliamov, and I. V. Jaminsky. *9-th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy, Spectroscopy and Related Techniques*, (Hamburg, Germany July 20–25, 1997), We 17. 3P15.
11. V. Babaev, M. Guseva, V. Khvostov, N. Novikov, and P. Flood, *Carbon Material with Highly Ordered Linear-Chain Structure*, in *"POLYNYNES – Synthesis, Properties, Applications*, ed. Fr. Cataldo, (CRC press, USA, 2005), pp.219–252.
12. V. G. Babaev, N. D. Novikov, M. B. Guseva, V. V. Khvostov, N. F. Savchenko, Yu. G. Korobova, and A. F. Alexandrov, *Journal Nanotechnology: development and applications – XXI Century* **2** (1), 53 (2010).
13. V. D. Kochakov and N. D. Novikov, *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, No. 2, 20 (2007).
14. V. V. Khvostov, V. G. Babaev, M. B. Guseva,

N. F. Savchenko, O. A. Streletskii, Yu. G. Korobova, and A. F. Aleksandrov, *Journal Nanotechnology: development and applications – XXI Century* **2** (1), 80 (2010).

15. Yu. G. Korobova, A. F. Aleksandrov, M. B. Guseva, N. D. Novikov, N. F. Savchenko, and V. V. Khvostov, in *Proc. "Fundamental'ny'e i prikladny'e aspekty` innovacionny`x proektov Fizicheskogo fakul'teta MGU"* (Moscow 2011), p. 58.

16. N. D. Novikov, V. D. Kochakov, G. G. Telegin, D. N. Novikov, M. B. Ghuseva, V. G. Babajev, V. V. Khvostov, and A. F. Alexandrov, *Nanotechnics*, No. 2 (6), 3 (2006).

17. A. S. Skrylev, V. V. Chernokozhin, E. V. Kostjukov, P. B. Konstantinov, Yu. A. Kontsevoj, Yu. I. Zavadskij, V. G. Babaev, N. D. Novikov, M. B. Guseva, Yu. N. Gordienko, Yu. K. Gruzevich, and L. M. Balyasnyj, *Patent RU 2366031 C2* (2009).

18. A. V. Faustov, N. D. Novikov, and A. A. Zaitsev, *Nanotechnics*, No. 4, 24 (2013).

19. M. B. Guseva, V. G. Babaev, N. D. Novikov, A. F. Alexandrov, V. V. Khvostov, N. F. Savchenko, and N. A. Bystrova, *Journal of Wide Bandgap Materials.*, No. 9 (4), 273 (2002).

20. N. A. Polikarpov, N. D. Novikova, G. E. Valiano, L. M. Vasiliak, I. I. Klimovsky, and V. Ya. Pecherkin, *Aerospace and Environmental Medicine*, No. 6, 40 (2010).

