

ни мочевогоделительной системы. Данный параметр может быть полезен для оценки рисков возникновения повреждений от воздействия ударной волны.

Заключение

Электроимпульсная литотрипсия позволяет разрушать камни за меньшее время при более низких значениях суммарной энергии в сравнении с электрогидравлической литотрипсией. Величина смещения камня при электроимпульсном воздействии составила 13 мм, при электрогидравлическом – 30 мм, а при пневматическом – 120 мм. Это дает возможность сделать вывод о том, что электроимпульсная литотрипсия позволяет наиболее эффективно и безопасно разрушать камни мочевогоделительной системы при введении меньшего количества энергии и меньших рисках миграции камня в труднодоступные отделы мочевогоделительной системы.

Список литературы:

1. Дзеранов Н.К., Лопаткин Н.А. Мочекаменная болезнь. Клинические рекомендации. – М.: Изд-во «Оверлей», 2007. 296 с.
2. Ilker Y., Ozgur A., Yazici C. Treatment of ureteral stones using holmium:YAG laser // International Urology and Nephrology. 2005. Vol. 37. PP. 31-34.
3. Мартов А.Г., Гордиенко Ю.А., Корниенко С.И., Даниелян С.Ш. Трансуретральное эндоскопическое лечение крупных камней верхней трети мочеточника с использованием нового пневматического литотриптора LMA StoNeBreAker™ // Кубанский научный медицинский вестник. 2011. № 5 (128). С. 94-98.

4. Башлачев В.А., Крючков Н.Б. Сравнение пневматического и электроимпульсного методов контактной литотрипсии / Сборник тезисов IX Международной научной-практической конференции урологов Сибири. – Красноярск, 2010. С. 93-94.
5. Гудков А.В., Боценко В.С., Петлин А.В., Афонин В.Я. и др. Ретроградная контактная электроимпульсная литотрипсия // Экспериментальная и клиническая урология. 2011. № 4. С. 49-53.
6. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб.: Наука, 1993. 276 с.

Людмила Юрьевна Иванова,
аспирант,

Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
Владимир Павлович Черненко,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН,
Вячеслав Семенович Боценко,
канд. мед. наук, доцент,
кафедра урологии,
ГБОУ ВПО СибГМУ Минздрава России,
г. Томск,
e-mail: anlu009@rambler.ru

Л.П. Ичкитидзе, В.М. Подгаецкий, А.С. Приходко, Б.М. Путря, Е.В. Благов, А.А. Павлов,
В.А. Галперин, Е.П. Кицюк, Ю.П. Шаман

Электропроводный композиционный наноматериал с биосовместимой матрицей и многослойными углеродными нанотрубками

Аннотация

Исследована удельная электропроводность слоев композиционных наноматериалов микронных и субмикронных размеров, состоящих из биосовместимой матрицы, карбоксиметилцеллюлозы и наполнителя, многослойных углеродных нанотрубок. Ультрадисперсионная водная суспензия наносилась на мягкие (фольга алюминия, пластины полиэстера и полиимида, хлопчатобумажная ткань, офисная бумага) и твердые (покровое стекло, пластинки кремния со слоем оксида кремния) подложки методом шелкографии. Для слоев в интервале толщин 0,5...5 мкм удельная проводимость составила $\sim 1,2 \cdot 10^4 \dots 4 \cdot 10^4$ См/м, а максимальная проводимость на квадрат поверхности $\sim 0,2$ См. Исследованный наноматериал представляет интерес для электроники и биомедицинских приложений.

При создании микро- и нанoeлектронных устройств на основе гибких подложек (гибкая электроника) наиболее важными являются приемлемые механические и электропроводящие свойства пленочных материалов на основе углеродных нанотрубок (УНТ), в отличие от известных полупроводниковых и металлических материалов. В этой связи отметим, что для УНТ отношения производной прочности на разрыв (~ 10 ГПа) и удельной электропроводности ($\sigma \sim 10 \dots 10^2$ кСм/м [1]) к плотности материала на несколько порядков больше таковых для медных или алюминиевых пленок и проводков, наиболее часто используемых в микроэлектронике [2]. Например, в медных нанопроводах достигается на несколько порядков более низкое значение плотности тока $J \leq 10^6$ А/см², чем в проводах из УНТ – $J \geq 10^8$ А/см², при котором начинается разрушение материала. Разработанные опытные образцы кабеля на основе многослойных УНТ (МУНТ), легированных йодом, обладают высокой токонесущей способностью порядка $\sim 10^5$ А/см² [3] при комнатной тем-

пературе, что сравнимо с конструкционной токонесущей способностью кабелей на основе сверхпроводящих материалов с рабочей температурой жидкого азота [4].

В слоях, состоящих из однослойных УНТ (ОУНТ), переплетенных случайным образом (в виде перепутанных макарон – так называемых *buscuraper*), наблюдалась высокая проводимость $\sigma \sim 10 \dots 50$ кСм/м [5], а в слоях, когда ОУНТ ориентированы в одном направлении, достигнута рекордная проводимость $\sigma \sim 800$ кСм/м [6]. Отметим, что реализованная в экспериментах удельная проводимость слоев значительно уступает расчетным значениям $\sigma \geq 20$ МСм/м для индивидуальных ОУНТ. Слои *buscuraper* на основе МУНТ тоже имеют высокие значения σ порядка ~ 10 кСм/м, и их электрические свойства сильно зависят от многих факторов, в том числе от типа МУНТ и их очистки [7]. К настоящему моменту опытные слои *buscuraper* с МУНТ сильно уступают расчетным значениям индивидуальной удельной электропроводности $\sigma_{in} \geq 10^8$ См/м для МУНТ [8]. Несмотря на этого слои

buckuraper являются перспективными, и на их основе создаются различные датчики, в том числе эластомеры. Они могут быть использованы как в биомедицинских приложениях, так и в других областях.

Представляют интерес слои, подобные buckuraper, но содержащие небольшое количество углеродных нанотрубок. Можно ожидать, что такие слои будут более безопасными, чем слои buckuraper, состоящие только из 100 % углеродных нанотрубок. Действительно, наноматериалы с низкими концентрациями МУНТ являются менее опасными, чем подобные материалы с добавками сажи [9]. Следовательно, перспективными могут быть слои, подобные buckuraper, но содержащие небольшое количество углеродных нанотрубок и имеющие электропроводность, близкую к слоям buckuraper.

Электропроводящие материалы: гели, электроды, ленты и др. – давно применяются в медицине, например, одноразовые и многоразовые электроды (≤ 10 См/м) для электротерапии, телеметрии, ангиографии, эхокардиографии и др. Повышение объемной и поверхностной электропроводности электродов является важной задачей, но решить ее традиционным методом увеличения концентрации солей представляется затруднительным из-за реакции кожной ткани.

Высокие значения электропроводности и аспектного соотношения для УНТ позволяют создавать на их основе композитные проводящие материалы с очень низким процентным соотношением наполнителя УНТ для достижения порога протекания. В частности, в полимерной матрице из полиуретана с наполнителем МУНТ реализован порог протекания при концентрации $C = 0,13$ мас. %. МУНТ [10], а в матрице из карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) – на уровне $C = 0,1...0,25$ мас. % МУНТ [11].

В статье приведены предварительные результаты исследования электропроводности слоев из наноматериалов, нанесенных на различные подложки и содержащих композицию: матрица – КМЦ; наполнитель – МУНТ. Слои наносились на различные подложки: гибкие – полиимид (ПИ), полиэстер (ПЭ), фольга алюминия (ФА), хлопчатобумажная ткань (ХБТ) и офисная бумага «Ballet-80 г/м²» (ОБ); твердые – кремниевые пластинки с пленкой оксида кремния (Si/SiO₂) и покрывное стекло (ПС).

Материалы и методы

При изготовлении образцов использовался биметаллический катализатор Fe-Mo/MgO. Синтез МУНТ протекал при температуре $t \sim 900$ °С в потоке Ag и CH₄ в течение 40 мин. Для получения стабильных водных суспензий полученный материал окисляли в 8,8 М растворе перекиси водорода в течение 1 ч. Доля многослойных углеродных нанотрубок в конечном материале после очистки составила (95 ± 1) мас. %. При этом были выполнены следующие промежуточные процедуры: очистка, сушка и др., которые подробно описаны в [12].

В экспериментах использовался электропроводящий гель (ЭПГ) в виде водного раствора карбоксиметилцеллюлозы (~ 4 мас. % КМЦ), удельная электропроводность которого была $\sigma \sim 0,4$ См/м при $t = 25$ °С в электрическом поле напряженностью ~ 100 В/м. Гель служил матрицей для создания электропроводящего композиционного наноматериала, он тщательно перемешивался механически в магнитной мешалке и ультразвуковой (УЗ) ванне в течение ~1 и ~0,5 ч соответственно. В готовую

матрицу добавлялся наполнитель МУНТ, после чего водная дисперсия, состоящая из электропроводящего геля и многослойных углеродных нанотрубок, подвергалась повторной процедуре перемешивания в магнитной мешалке и ультразвуковой ванне в течение ~1,5 и ~1,5 ч соответственно.

Были также приготовлены контрольные образцы на основе ЭПГ без МУНТ и образцы на основе ЭПГ и сажи К-354. В последнем случае частицы сажи имели микронные и субмикронные размеры. Во всех дисперсиях концентрационные соотношения углеродных частиц были одинаковы ~ 5 мас. %. Таким образом, для приготовления слоев использовались: раствор ЭПГ – 4 мас. % КМЦ, (№ 1); дисперсия – 4 мас. % КМЦ + 5 мас. % МУНТ (№ 2); дисперсия – 4 мас. % КМЦ + 5 мас. % сажа К-354 (№ 3). Присвоенные номера соответствовали номерам серии слоев, полученных из соответствующих растворов или дисперсий. Из них контрольными являются образцы № 1 и 3, а образец № 2 – объектом исследования.

Слои наносились на все типы подложек при одних и тех же условиях методом шелкографии, т. е. на подложке через трафарет наносились слои в форме квадрата с размерами 20×20 мм² или прямоугольника с размерами 20×30 мм². Дисперсии всех серий имели очень хорошие адгезии на подложках ОБ и ХБТ, а самую плохую адгезию проявляли на подложках ПС и Si/SiO₂. В этой связи поверхности данных подложек подвергались дополнительной промывке и ионно-химической очистке в вакууме. Слои на подложках высушивались при температуре около 30 °С в течение ~ 60 ч. На полученных образцах проводились измерения, которые повторялись после их отжига на воздухе при температуре 180 °С в течение 30 мин или после их отжига в среде водорода при температуре 200 °С в течение 30 мин. После отжига образцы теряли влагу и общую массу приблизительно в 4-5 раз относительно начальных значений.

Проводимость образцов измерялась как двухзондовой, так и четырехзондовым методами. В первом случае определялась проводимость σ_{sq} , приведенная на квадрат поверхности, а во втором случае – объемная удельная проводимость σ . В обоих случаях из измеренных значений тока i , электрического напряжения u и толщины слоя d вычислялась объемная удельная проводимость σ по формуле

$$\sigma \approx \frac{0,22 \cdot i}{u \cdot d} \quad (1)$$

Величина σ_{sq} определялась как $\sigma_{sq} = \sigma \cdot d$, где σ вычислялась по формуле (1). Удельные проводимости, оцененные из измеренных значений параметров согласно выражению (1) и из значений σ_{sq} , отличались менее чем на 15...20 %, что говорило о неплохой однородности исследованных слоев и выполнении необходимых условий измерения двухзондовым и четырехзондовым методами в нашем эксперименте. В обоих случаях измерения проводились в двух различных местах образца, расположенных взаимно перпендикулярно относительно друг друга, и определялись средние значения σ и σ_{sq} .

Толщины d слоев на подложках оценивались интерференционным и микрометрическим методами. Во всех случаях относительная погрешность величин d не превышала 15...20 % от среднего значения. Значения d для исследованных слоев фиксировались в интервале ~0,5...5 мкм.

Результаты и обсуждение

Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) были получены изображения слоев, нанесенных на подложки ПС и Si/SiO₂. В ходе исследований удалось получить изображение матрицы ЭПГ и наполнителей МУНТ, ЭПГ и сажи К-354. На рис. 1 приведены типичные РЭМ изображения слоев серии № 1 (а, б) и № 3 (в, г) на Si/SiO₂ подложках. Видна существенная разница между картинками: наполнитель МУНТ состоит из длинных (≥ 3 мкм) с диаметром ≤ 30 нм нитеобразных трубок (рис. 1а, б), а наполнитель сажа – из зернообразных скоплений, имеющих большие разбросы линейных размеров – 1...20 мкм (рис. 1в, г).

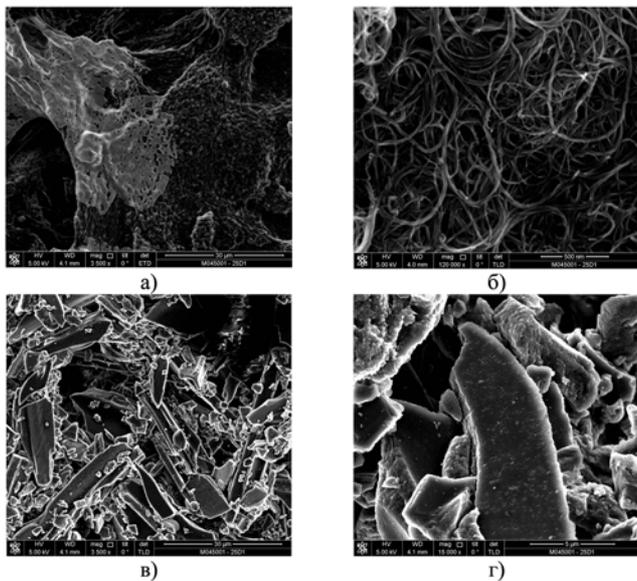


Рис. 1. Типичная РЭМ картинки для слоев серии № 2 (а, б) и № 3 (в, г) на подложках SiO₂, толщина слоев ~5 мкм; слой серии № 2: а) масштаб 30 мкм; б) масштаб 500 нм; слой серии № 3: в) масштаб 30 мкм; г) масштаб 500 нм

Измерения электрических характеристик для раствора ЭПГ показали: при $t \approx 20$ °С проводимость составляла $\sigma \sim 0,5$ См/м, а температурный коэффициент $\alpha = (\sigma_0 / \sigma - 1) / \Delta t \sim -0,038$ К⁻¹, где σ_0 – удельная проводимость при $t = 0$; Δt – интервал температуры в области $\Delta t \approx 0...70$ °С. Однако после проведенных процедур отжига (в среде воздуха или водорода) для образцов серии № 1 указанные параметры значительно уменьшаются: $\sigma_0 \leq 10^{-5}$ См, $\alpha \sim -0,0024$ К⁻¹. Следовательно, можно полагать, что сушка и отжиг значительно уменьшают концентрацию носителей зарядов.

Отжиг образцов с МУНТ (серия № 2) в средах воздуха и водорода приводил к значительному росту их про-

водимости. При этом в случае отжига в воздухе значения σ увеличивались в несколько раз (< 5), а в случае отжига в среде водорода значения σ увеличивались до 200 раз по сравнению с проводимостью образцов до отжига. Более высокие значения σ достигаются в слоях с небольшими толщинами < 5 мкм, так как в толстых слоях образуются многочисленные трещины и поры, которые, по-видимому, нарушают целостность образцов. В табл. 1 приведены измеренные и расчетные данные некоторых образцов, для которых достигнуты максимальные значения σ .

Из табл. 1 видно, что для образцов, полученных без отжига и нанесенных на мягкие подложки (ОБ, ПЭ, ХТБ), слой с МУНТ (серия № 2) имели в 2-5 раз более высокие значения удельной электропроводимости, чем образцы на твердых подложках (ПС, Si/SiO₂). Однако ситуация кардинально меняется после отжига образцов – значения σ в несколько раз выше в слоях на твердых подложках, чем на мягких подложках ОБ и ХТБ.

Максимальные значения проводимости на квадрат поверхности находились в интервале $\sigma_{sq} \approx 0,2...1,0$ См/м. В контрольных слоях, не содержащих МУНТ (см. табл. 1, серия № 1) или содержащих вместо МУНТ частицы сажи К-354 (см. табл. 1, серия № 3), величины σ были на 5-7 порядков меньше, чем для слоев на основе МУНТ (см. табл. 1, серия № 2).

Высокая удельная электропроводность в исследованных слоях серии № 2 относительно других серий № 1 и 3, по-видимому, обусловлена следующими факторами: большее аспектное отношение для МУНТ – $a = l_c / d_c \geq 10^2$ (l_c – длина углеродной трубки; d_c – диаметр углеродной трубки); высокие значения индивидуальной удельной электропроводности $\sigma_m \geq 10^8$ См/м; оптимальная композиция наноматериала, состоящего из плохо проводящей матрицы (КМЦ) и хорошо проводящего наполнителя (МУНТ). Данная композиция наноматериала обеспечивает при отжиге эффективное удаление полимерной органики, что дает в остатке хорошо проводящие нанотрубки и проводящий графитовый остаток, заполняющий пространство между трубками и повышающий таким образом проводимость слоя.

Образцы на основе МУНТ (серий № 2 и 3) являются композитными материалами, и аналитический расчет их эффективной проводимости σ_e является сложной задачей. В некотором приближении, когда матрица однородная и наполнитель одного типа однородно распределен в объеме, можно оценить величину σ_e [13]:

$$\sigma_e = \sigma_m \frac{\left[1 - \frac{(1-n)f(\sigma_m - \sigma_f)}{(1-n)\sigma_m + n\sigma_f} \right]}{\left[1 + \frac{nf(\sigma_m - \sigma_f)}{(1-n)\sigma_m + n\sigma_f} \right]}, \quad (2)$$

Таблица 1

Некоторые характеристики типичных образцов с максимальными значениями σ

Образцы, №	Состав	Подложка	d, мкм	σ , кСм/м		
				До отжига	Отжиг в воздухе	Отжиг в водороде
Серия № 2	4 мас. % КМЦ + 5 мас. % МУНТ	ОБ	2,1	0,36	0,75	13
«-«		ПЭ	3,7	0,85	2,11	40
«-«		ХТБ	2,2	0,43	0,87	12
«-«		ПС	3,0	0,18	1,73	43
«-«		Si/SiO ₂	3,9	0,16	2,05	38
Серия № 3	4 мас. % КМЦ + 5 мас. % сажи К-354	ОБ	4,5	0,00005	0,00008	0,0001
Серия № 1	4 мас. % КМЦ	Пластика	80	0,001	0,00001	-

где σ_m – удельная электропроводность матрицы; σ_f – удельная электропроводность наполнителя; f – фактор наполнения, т. е. отношение объема включения к объему образца; n – фактор формы частиц включения вдоль одной из главных осей, который совпадает с фактором деполяризации и для УНТ равен $n = a^{-2}[\ln(2a) - 1]$. Из выражения (2) следует, что величина σ_e существенно зависит от параметров f , σ_m и n , например, при сильном заполнении $f \approx 1$, имеет место

$$\sigma_e = \frac{f\sigma_f\sigma_m}{(1-n)\sigma_m + n\sigma_f + (1-f)n\sigma_f} \approx \frac{f\sigma_m}{(1-f)n}. \quad (2)$$

Согласно выражениям (2) и (3), эффективная проводимость композиционного материала сильно растет при уменьшении n и увеличении f . В нашем эксперименте: $n \sim 10^{-4}$, где учтено $a \sim 10^2$ для используемых нами МУНТ (см. п. 1); фактор наполнения¹ $f \approx 0,05$; $\sigma_f \approx \sigma_{in}$, поскольку МУНТ служит наполнителем.

Проводились сравнения расчетных σ_e по выражениям (2), (3) и измеренных σ (по табл. 1) данных. Они сильно отличаются – измеренные σ на несколько порядков больше, чем расчетные σ_e . В самом деле, классические выражения (1) и (2) позволяют определить эффективную удельную проводимость композиционного материала, когда частицы наполнителя ориентированы и изолированы друг от друга частями матрицы. В этом случае на изменение σ_e может больше повлиять варьирование параметров f , n и σ_m , чем σ_f , например: при $f \approx 0,05$, $n \approx 10^{-4}$, $\sigma_m \sim 10^{-5}$ и $\sigma_{in} \sim 10^7$ См/м величина σ_e имеет порядок $\leq 10^{-1}$ См/м, а при $f \approx 0,99$ и тех же остальных параметрах $\sigma_e \sim 10$ См/м. Даже минимальное измеренное значение $\sigma \approx 360$ См/м для композиционного наноматериала 4 мас. % КМЦ + 5 мас. % МУНТ (см. табл. 1) значительно превосходит наибольшее оценочное значение $\sigma_e \sim 10$ См/м, рассчитанное по формуле (3).

Сильное различие (более чем на 3-4 порядка) между измеренными и оценочными удельными проводимостями свидетельствует о нахождении частиц МУНТ в матрице в переплетенных неизолированных состояниях с образованием между ними электрических проводящих контактов. По-видимому, случайные и многочисленные электрические контакты между МУНТ создают проводящие бесконечные и параллельные кластеры, которые являются причиной высокой удельной проводимости в исследованных нами слоях. Можно полагать, что контакты между частицами МУНТ являются туннельными и их прозрачность, т. е. их проводимость, определяет проводимость бесконечного кластера. Из этих предположений следует, что эффективная удельная проводимость композиционного наноматериала будет зависеть от плотности бесконечных проводящих кластеров и от их удельной проводимости.

Видимо, предложенный механизм проводимости реализуется в исследованных слоях композиционного наноматериала на основе МУНТ. В вышеописанном эксперименте отжиг способствует увеличению количества туннельных контактов и их контактной проводимости, росту количества параллельно соединенных кластеров и их общей удельной проводимости.

Сделаем оценку σ_{sq} для предельного случая, когда все МУНТ участвуют в образовании проводящих бесконеч-

ных кластеров, имеющих между собой полностью электрически прозрачные контакты, находящиеся в матрице с пренебрежительно малой удельной проводимостью. Тогда слой с размерами 20 мм × 20 мм × 3 мкм можно представить как эквивалентные слоям из плотно упакованных МУНТ с приблизительными размерами 7 мм × 7 мм × 1 мкм. Здесь учтено, что параметр наполнения МУНТ в нашем эксперименте $f \approx 0,05$ и в проводимости на выделенном направлении может участвовать 1/3 часть от всех МУНТ. Тогда для эквивалентного слоя из МУНТ получаем оценку $\sigma_{sq} = \sigma_{in} \cdot d \approx 100$ См, где $\sigma_{in} \sim 10^8$ См/м и $d \sim 1$ мкм, что гораздо больше, чем измеренные значения $\sigma_{sq} \sim 1$ См.

Из этого можно предположить, что в исследованных нами слоях имеется потенциал возможного повышения величин σ и σ_{sq} за счет увеличения прозрачности туннельных контактов между МУНТ в матрице наноматериала. По-видимому, такой положительный эффект удался в нашем эксперименте тогда, когда σ и σ_{sq} были повышены на 3-4 порядка после отжига образцов в среде воздуха или водорода.

Деградационные исследования при многочисленных изгибах мягких подложек не обнаружили существенных изменений значений σ . Например, при изгибе на 180° с радиусом изгиба 1 мм и циклом 300 раз образцов на подложках ОБ и ХБТ проводимость изменялась не более чем на ± 20 % относительно исходных значений. После многочисленных изгибов слои не отслаивались от подложек, не трескались и сохраняли прежний внешний вид.

Заключение

Изготовлены и исследованы слои композиционного наноматериала, полученного из водной дисперсии с составом 4 мас. % КМЦ и 5 мас. % МУНТ на твердых и гибких подложках. Первоначальные проводимости слоев значительно увеличивались после отжига образцов в среде воздуха (до 5 раз) или водорода (до 200 раз). Образцы композиционного наноматериала на основе МУНТ после отжига обладали на 4-6 порядков более высокими величинами электропроводности, чем контрольные образцы на основе 4 мас. % КМЦ или 4 мас. % КМЦ и 5 мас. % сажи К-354. Достигнутые значения объемной удельной проводимости (~ 40 кСм/м) и поверхностной проводимости ($\sim 0,2$ См) имели такие же порядки, какие были получены для слоев buscuraper на основе как МУНТ [5], так и ОУНТ [14]. Многочисленные изгибы гибких подложек не изменяли проводимости слоев с толщинами ≤ 5 мкм.

Исследованные нами слои после сушки теряли влагу, и их масса уменьшалась приблизительно в 4-5 раз относительно начальной. Следовательно, в них возрастала концентрация нанотрубок от ~ 5 мас. % МУНТ до $C \sim 20...25$ мас. % МУНТ, однако она была значительно меньше по сравнению с $C \approx 100$ мас. % МУНТ в слоях buscuraper [5]. При этом имеется возможность дальнейшего повышения величины σ в слоях композиционного материала, предложенного нами, за счет оптимального подбора технологии его приготовления и лазерной стимуляции, не увеличивая концентрацию МУНТ.

Измеренная проводимость образцов была на несколько порядков выше, чем оценочные значения проводимости для классических композиционных материалов.

¹ Фактор наполнения приблизительно совпадает с удельной частью МУНТ (концентрация 5 %) из-за того, что мало отличаются плотности матрицы (ЭПГ – 1,4 г/см³) и наполнителя (МУНТ – 1,6 г/см³) и допускаем $f \approx 0,05$.

Предположим, что в исследованных композиционных наноматериалах образуются проводящие бесконечные кластеры из МУНТ. На основе этого предположения устанавливаются шаги для повышения проводимости композиционного материала путем повышения прозрачности туннельных контактов, образующихся в местах соприкосновения МУНТ.

Исследованный нами композиционный наноматериал с биосовместимой матрицей имеет высокую объемную удельную электропроводимость и поверхностную проводимость, хорошую адгезию на гибких подложках и является перспективным материалом для различных применений. Например, на его основе можно создать электроды для электростимуляции в физиотерапии, элементы электродов для литий-ионных аккумуляторов повышенной емкости, а также простые экраны от электромагнитного излучения, цена которых будет значительно ниже существующих. Представляется также возможным их применение в биомедицине: биочипы и биодатчики, искусственные мышцы, эластомеры, электропроводящие электроды и нити для биологических тканей, бионанороботы и др. [15].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт № 14.513.12.0002, соглашение 14.B37.21.0567) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 12-08-12014).

Список литературы:

1. Carbon Nanotubes – Growth and Applications / Edited by Mohammad Naraghi, Published by InTech, Janeza rdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, Copyright © 2011 InTech. 604 p.
2. Ngo Q., Cassell A.M., Austin A.J. et al. Characteristics of aligned carbon nanofibers for Interconnect Via applications // IEEE. Elec. Dev. Lett. 2006. Vol. 27 (4). PP. 221-224.
3. Zhao Y., Wei J., Vajtai R., Ajayan P.M., Barrera E. Iodine doped carbon nanotube cables exceeding specific electrical conductivity of metals // Sci. Rep. 2011. Vol. 1. PP. 83-89.
4. Mukoyama S., Yagi M., Hirata H., Suzuki M., Nagaya S., Kashima N., Shiohara Y. Development of YBCO High-Tc Superconducting Power Cables // Furukawa Review. 2009. № 35. PP. 18-22.
5. Wang D., Song D., Liu C., Wu W., Fan S. Highly oriented carbon nanotube papers made of aligned carbon nanotubes // Nanotechnology. 2008. Vol. 19.
6. Hone J., M. Llaguno C., Nemes N.M., T. Johnson A., Fischer J.E., Walters D.A., Casavant M.J., Schmidt J., Smalley R.E. Electrical and thermal transport properties of magnetically aligned single wall carbon nanotube films // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77. № 5. PP. 666-668.
7. Yang K., He J., Puneet P., Su Z., Skove M.J., Gaillard J., Tritt T.M., M. Rao A. Tuning electrical and thermal connectivity in multiwalled carbon nanotube buckypaper // J. Phys.: Condens. Matter. 2010. Vol. 22.
8. Li H.J., Lu W.G., Li J.J., Bai X.D., Gu C.Z. Measurements of the current through a single multiwalled carbon nanotube demonstrate a high conduction capacity, which would be important if such tubes were used in integrated circuits // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. Issue 8.

9. Ичкидидзе Л.П., Комлев И.В. Углеродные нанотрубки и композитные наноматериалы: токсичность // Лазеры в науке, технике, медицине. Сб. научных трудов. Том 21 / Под ред. В.А. Петрова. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2010. С. 103-113.
10. Zhang R., Dowden A., Baxendale M., Peijs T. Conductive network formation in the melt of carbon nanotube thermoplastic polyurethane composite // Composite Science and Technology. 2009. Vol. 69. Issue 10. PP. 1499-1504.
11. Ичкидидзе Л.П., Подгаецкий В.М. Электропроводный биосовместимый композиционный наноматериал с углеродными нанотрубками // Медицинская техника. 2011. № 6 (270). С. 25-29.
12. Ичкидидзе Л.П., Рындина Т.С., Селищев С.В., Пономарева О.В., Табулина Л.В., Шулицкий Б.Г., Галперин В.А., Шаман Ю.П., Благоев Е.В. Объемный композитный наноматериал на основе белка и углеродных нанотрубок // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 3. С. 13-19.
13. Корнюшин Ю.В. Об эффективной проводимости композитных материалов // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 9. С. 50-53.
14. Лобач А.С., Буравов Л.И., Спицина Н.Г., Елецкий А.В., Деминьев А.П., Маслаков К.И. Исследование электрического сопротивления пленок одностенных углеродных нанотрубок в интервале температур 4,2...290 К // Химия высоких энергий. 2011. Т. 45. № 4. С. 360-366.
15. Heintz A.M., Christiaen An-C., Vijayendran R.B., Elhard J.D., Lalgudi R.S., Robbins W.B., Gupta Ab., Cafmeyer J. Electrical conductive coating composition / Patent US 2010/0126981 A1, pub. Date: May 27, 2010.

Леван Павлович Ичкидидзе,
канд. физ.-мат. наук, доцент,
ст. научный сотрудник,
Виталий Маркович Подгаецкий,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
Александр Сергеевич Приходко,
аспирант,
Борис Михайлович Путря,
аспирант,
кафедра биомедицинских систем,
ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Зеленоград,
Евгений Владимирович Благоев,
д-р физ.-мат. наук,
зам. директора,
Александр Александрович Павлов,
канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник,
Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,
г. Москва,
Вячеслав Александрович Гальперин,
канд. техн. наук,
Евгений Павлович Кицюк,
аспирант,
Юрий Петрович Шаман,
мл. научный сотрудник НИЛ ПП,
НПК «Технологический центр» МИЭТ,
г. Зеленоград,
e-mail: leo852@inbox.ru