

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

СИНТЕЗ И СТРУКТУРА СУЛЬФИДОВ ФОСФОРА ВО ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ ОУНТ

Окотруб А.В., Вофоломеева А.А., Сысоев В.И., Седельникова О.В., Гурова О.А.,
Булушева Л.Г.

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

Атомы серы, фосфора и углерода могут образовывать низкоразмерные аллотропные формы. Так соединения серы при повышенных температурах формируют линейные цепочки S_n из молекул S_8 , S_4 , S_2 , а из молекул белого фосфора P_4 может быть получен квазиодномерный красный фосфор. Заполнение углеродных нанотрубок идет через газовую фазу в результате реакции молекул фосфора или серы в полости нанотрубок. Ранее методом высокоразрешенной просвечивающей микроскопии было показано, что молекулы серы и фосфора, попадая во внутреннюю полость УНТ, полимеризуются и формируют гибридные наноматериалы [1-3]. Существуют молекулярные соединения серы и фосфора, называемые сульфидами фосфора P_4S_3 , P_4S_7 , P_4S_{10} и др., которые могут, при соответствующих условиях, сформировать в нанотрубках низкоразмерные смешанные соединения P_4S_x .

В работе для заполнения внутренней полости мы использовали ОУНТ компании ОКСИАЛ. Методом ампульного синтеза получены гибридные материалы $S@SWNT$, $P@SWNT$, $P_4S_x@SWNT$ и измерены спектры комбинационного рассеяния, рентгеноэлектронные спектры, магнитные и сенсорные свойства. Обнаружено, нагрев заполненных нанотрубок можно использовать для декапсуляции серы и фосфора, настраивая локальный состав и, следовательно, функциональные свойства материалов на основе ОУНТ [4]. Приводятся данные о повышении сенсорных свойств гибридных нанотрубок по отношению к молекулам NO_2 [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-13-00219).

Библиографические ссылки

1. Sedelnikova O.V. et. al. *Nanomaterials* 10 (2020) 818.
2. Rybkovskiy D.V., et. al. *ACS Nano*, 16 (2022) 6002-6012.
3. Vorfolomeeva A.A. et. al. *Inorganic Chemistry*, 61 (2022) 9605–9614.
4. Vorfolomeeva A.A. et. al. *Nanomaterials*, 13 (2023) 153.
5. Sedelnikova O.V. et. al. *Carbon* 186 (2022) 539-549.

ПРОЗРАЧНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Илатовский Д. А.¹, Гильштейн Е. П.², Глухова О. Е.³, Красников Д. В.¹, Гольдт А. Е.¹,
Насибулин А. Г.¹

¹*Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия*

²*Empa – Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Überlandstrasse
129, Dübendorf, 8600 Switzerland*

³*Саратовского национального исследовательского государственного университета
имени Н. Г. Чернышевского*

a.nasibulin@skol.tech

Тонкопленочные электропроводящие материалы, обладающие высокой прозрачностью, являются важнейшими компонентами оптоэлектронных устройств.

Прогресс в области применения прозрачных проводников требует замены оксида индия-олова (ITO), одного из ключевых материалов в электронике. Несмотря на то, что ITO является наиболее часто используемым прозрачным проводящим материалом, он, как и другие оксиды металлов, обладает рядом недостатков, включая ограниченную механическую гибкость, высокий показатель преломления, ограниченную химическую стабильность и ограниченные запасы сырья. Однослойные углеродные нанотрубки являются одной из наиболее перспективных альтернативных материальных платформ, рассматриваемых для создания прозрачных проводящих пленок, благодаря их превосходным оптоэлектронным свойствам и уникальной механической гибкости и растяжимости. Здесь мы анализируем последние достижения в области оптоэлектронных характеристик прозрачных электродов на основе нанотрубок. Мы также описываем дорожную карту для дальнейших исследований и разработок прозрачных проводников, использующих “рациональный дизайн”, который предсказывает возможность получения прозрачных проводников с характеристиками близкими к теоретическому пределу.

Авторы благодарят Российский научный фонд за поддержку проекта № 22-13-00436.

ТОНКАЯ НАСТРОЙКА СВОЙСТВ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ НАНОТРУБОК

Красников Д.В., Рамирез Х.А.Б., Рагинов Н.И., Кондрашов В.А., Глушу Ю.Г.,
Насибулин А. Г.

Сколковский институт науки и технологии, г. Москва, Россия

d.krasnikov@skoltech.ru

Свободно-стоящие мембраны на основе углеродных нанотрубок интегрируют уникальные характеристики исходного материала (аспектное соотношение, электро- и теплопроводность, оптические свойства) с поразительной механической прочностью (мембрана может быть стабильна даже при толщинах менее 10 нм), макропористой структурой, позволяющей обеспечить рекордную добротность аэрозольной фильтрации, и термоакустические характеристики высокоэффективного излучателя. Настоящая работа посвящена оптимизации свойств как самих нанотрубок, так и мембран в целом для таргетированной оптимизации для заранее заданных приложений.

Работа поддержана Советом по грантам президента РФ (грант № МК-3000.2022.1.3).

ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

Сысоев В.И., Ворфоломеева А.А., Гурова О.А., Лаврухина С.А., Булушева Л.Г.,
Окотруб А.В.

*Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Пр-т Академика
Лаврентьева, 3, Новосибирск, Россия*

Определение токсичных паров и газов атмосфере требуют высокой чувствительности, быстрого отклика/регенерации при комнатной температуре, а также высокой селективности. Кроме того, немаловажным фактором является дешевизна и простота технологического процесса производства для их практического применения. Применение немодифицированных углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве газовых сенсоров хорошо изучено в литературе. Однокомпонентные сенсоры на основе УНТ как правило показывают невысокую селективность, а также относительно высокие рабочие температуры (150-300 °С). Разработка многокомпонентных гибридных

материалов в качестве чувствительного элемента позволяет усилить слабые стороны индивидуальных компонентов, достигая повышенной чувствительности и улучшенной кинетики отклика и регенерации материалов. В настоящей работе предлагается создание резистивных газовых сенсоров на основе тонких пленок одностенных УНТ. Для увеличения сенсорного отклика использованы нековалентная модификация ОУНТ с использованием простых веществ (сера, фосфор), бинарных неорганических соединений (сульфиды фосфора) и сложных органических молекул. Было показано, что введение второго компонента приводит к следующим основным эффектам: (1) изменению зарядового состояния в системе, (2) уменьшение влияния объемных процессов при адсорбции анализируемого газа и (3) формирование рецепторного слоя на поверхности УНТ. Модификация ОУНТ серой, фосфором и сульфидами фосфора оказывает наиболее сильное влияние на кинетику отклика и регенерации за счет интеркаляции в пространство внутри и между нанотрубками. Нанесение каликсаренов позволяет создать слой, который специфично взаимодействует с молекулами по механизму гость-хозяин. Последний случай осуществляется за счет нанесения донорных (тетратиофульвален) и акцепторных (тетрацианохинодиметан) молекул, которые позволяют улучшать или уменьшать чувствительность к молекулам в зависимости от их природы путем настройки взаимодействия с переносом заряда в системе. Полученные гибридные материалы обладают высокой к диоксиду азота ($0,1-0,5\% \text{ ppb}^{-1}$), небольшими характерными временами (от 30 до 5 мин) и относительно невысокой рабочей температуре ($75-150 \text{ }^\circ\text{C}$).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ №22-13-00219.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЛИУРЕТАНОВОЙ МАТРИЦЕ В ДИАПАЗОНЕ СВЧ

Кревсун В.В.², Суслиев В.И.¹, Бондалетов В.Г.², Журавлев В.А.¹, Кулешов Г.Е.¹, Денисенко³ А.В.

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, г.Томск, РФ ²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск, РФ

³ООО «Полимер» г.Томск, РФ

Потребность в материалах, определяющих степень воздействия высокочастотного электромагнитного излучения на объекты различной природы, постоянно нарастает в связи с расширением сферы применения радиоэлектронного оборудования: в медицине (томографы, приборы СВЧ-терапии и диагностики); в приборостроении (электромагнитная совместимость и герметизация), в пищевой промышленности (сушка, пастеризация, размораживание, сублимация), в технологии получения горючих жидкостей и газа из различных веществ, в быту (сотовая связь, микроволновки, Wi-Fi, компоненты «умного дома», приборы с импульсными источниками питания) и др.

Для решения перечисленных задач в настоящее время широко используются композиционные материалы, активной фазой в которых применяются углеродные материалы: однослойные и многослойные трубки, графены. Многочисленными публикациями доказана эффективность взаимодействия таких композитов с электромагнитным излучением широкого диапазона. Однако стоимость их пока еще достаточно высока, поэтому продолжают развиваться разработки новых материалов с более дешевыми и более доступными компонентами [1].

В настоящей работе описывается метод получения материалов с различной концентрацией активной фазы (5 – 25 весовых процентов) и результаты исследования электромагнитных характеристик в диапазоне частот 0,5 -18 ГГц

Для получения образцов композиционных материалов были использованы полиуретановый двухкомпонентный заливочный компаунд марки Силагерм 6050П и технический углерод марки OMCARB CN85. Технический углерод после предварительной осушки (120 °С, 90 мин) небольшими порциями вводили в компонент А полиуретанового компаунда Силагерм 6050П. Перемешивание смеси осуществлялось с помощью трехлопастной мешалки с частотой вращения 1500 об/мин. Далее к смеси добавляли компонент Б полиуретанового компаунда, вели перемешивание с помощью трехлопастной мешалки в течение 2 мин. Компоненты А и Б были взяты в соотношении 1 : 1 по массе. Полученную композицию подвергали вакуумной дегазации, после чего заливали в форму для получения образцов. Процесс отверждения композиции происходил при температуре 20–25 °С.

Измерения комплексных значений диэлектрической проницаемости производились волноводным коаксиальным методом. В высокочастотной части электромагнитного диапазона от 4 до 18 ГГц, где практически наблюдается постоянство комплексных составляющих, в зависимости от концентрации действительная изменяется от 2,7 до 12 относительных единиц, а мнимая от 0,25 до 2,0.

По измеренным значениям комплексной диэлектрической проницаемости смоделированы компоненты электромагнитного отклика: коэффициенты отражения, прохождения и поглощения для различных толщин с целью определения области применения разработанных материалов.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития ТГУ («Приоритет-2030»), проект НИР № НУ 2.4.4.22 ЛМУ.

Библиографические ссылки

1. Michael Green, Xiaobo Chen Recent progress of nanomaterials for microwave absorption // Journal of Materiomics (2019), №5, 5503-541 <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.07.003>.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ В НАНОРАЗМЕРНОМ СЛОЕ

Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж., Базарова С.Б., Очиров Т.Ч.
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физического материаловедения*

Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ, Россия

Определение диэлектрических характеристик жидкости в наноразмерном слое известными классическими методами затруднено в связи с малым размером объекта исследования. Кроме того, при исследовании диэлектрических свойств жидкости необходимо учитывать динамический характер равновесного состояния жидкости и зависимость ее структуры от силового поля твердой поверхности.

Для исследования диэлектрических свойств жидкости в наноразмерном слое предлагается использовать акустоэлектрический метод, основанный на применении поверхностных акустических волн (ПАВ), распространяющихся по поверхности пьезоэлектрического звукопровода, нагруженного тонким слоем жидкости. ПАВ в системе «пьезоэлектрик – тонкий слой жидкости» описываются дисперсионными уравнениями, связывающими затухание α и изменение скорости ПАВ ΔV с акустическими и диэлектрическими характеристиками слоистой системы:

$$-\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_0 - V_s}{V_0} = \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \sqrt{1 - \frac{V_f^2}{V_s^2}} + \frac{\pi K^2 \varepsilon_p \varepsilon'}{(\varepsilon_p + 1)^2} \right) \cdot \frac{h}{\lambda}, \quad \alpha = \left(\frac{\beta \rho_f V_f}{\rho_s \sqrt{V_s^2 - V_f^2}} + \frac{\pi \omega K^2}{V_s} \frac{\varepsilon_p \varepsilon''}{(\varepsilon_p + 1)^2} \right) \cdot \frac{h}{\lambda}, \quad (1)$$

где ρ_f и ρ_s – плотности жидкости и твердого тела, ε_p – диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика, ε' и ε'' – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости жидкости ε^* ; V_f – скорость звука в жидкости, V_s – скорость ПАВ в слоистой системе, V_0 и V_s – скорости ПАВ на свободной и металлизированной поверхности ниобата лития, h – толщина жидкого слоя, λ – длина поверхностной волны, K – коэффициент электромеханической связи, β – коэффициент ослабления звука в жидкости [Нп/см], который учитывает потери на вязкое трение в жидкости, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

Аналитический характер уравнений (1) позволяет определить значения ε' и ε'' из акустических измерений α и $\Delta V/V$:

$$\varepsilon' = \frac{(\varepsilon_p + 1)^2}{\pi K^2 \varepsilon_p} \left(\frac{\lambda(V_0 - V_s)}{hV_0} - \frac{\rho_f}{\rho_s} \sqrt{1 - \frac{V_f^2}{V_s^2}} \right), \quad \varepsilon'' = \frac{V_s (\varepsilon_p + 1)^2}{\pi \omega K^2 \varepsilon_p} \left(\frac{\lambda \alpha}{h} - \frac{\beta \rho_f V_f}{\rho_s \sqrt{V_s^2 - V_f^2}} \right). \quad (2)$$

Предложено для описания диэлектрических релаксационных свойств воды в наноразмерном слое, как в случае объемной воды и льда, использовать уравнения Дебая:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)/(1 + i\omega\tau),$$

где ε_s и ε_∞ – соответственно низко – и высокочастотный предел области дисперсии; τ – время релаксации.

Для иллюстрации возможностей метода определения диэлектрических свойств наноразмерной жидкости представлены результаты исследования дисперсии диэлектрической проницаемости воды при разных значениях толщины слоя. Экспериментальные значения ε' и ε'' рассчитаны из уравнений (1) с использованием акустических измерений α и $\Delta V/V$. Численная оценка проводилась в диапазоне частот 20 – 400 МГц с использованием уравнений Дебая. Показано, что диэлектрические релаксационные свойства объемной воды и воды в наноразмерном слое существенно отличаются, с ростом толщины нанослоя область дисперсии диэлектрической проницаемости смещается в сторону более высоких частот.

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ НАНОСТРУКТУР НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ К ПРИМЕНЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ

^{1,2}Образцова Е.А., ³Сорокина Е.В., ⁴Скворцов Д.А., ¹Бирюков С.И., ³Зарубина А.П.,
¹Клинов Д.В., ²Скворцова Н.Н.

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

³Биологический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Химический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В работе представлены результаты анализа токсичности наноструктур из углерода и нитрида бора с использованием тестовых систем на основе клеток человека (линии НЕК293Т, МСF7, А549, VА13) и бактериальных клеток (E.coli).

Для оценки влияния структуры и химического состава была проведена инкубация бактериальных клеток с модельными наноструктурированными

материалами в форме суспензий. Были исследованы 6 образцов: наночастицы графита; ультрадисперсный алмаз; одностенные углеродные нанотрубки; наночастицы нитрида бора в гексагональной и кубической форме; нанотрубки из нитрида бора. Было показано, что нанотрубки из обоих материалов оказывают значительное токсическое действие на клетки. В то время, как другие исследованные наноструктурированные материалы не оказывали значимого эффекта и могут считаться нетоксичными в концентрациях до 200 мг/л.

Была проведена оценка токсичности материалов, полученных из смеси титана с бором и нитридом бора в ходе цепных колебательных реакциях, инициируемых мощными микроволновыми импульсами гиротрона. Получаемые таким образом частицы нано- и микро размеров являются перспективными для целого ряда применений. При содержании в среде до миллиграммов в литре исследованные частицы не обладают выраженной цитотоксичностью. Низкая токсичность на уровне клеток свидетельствует о потенциале безопасного использования предложенных микро структур, но требует дальнейшей проверки безопасности на организменном уровне.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание) N 075-03-2023-206 FSMG-2023-0015 и РНФ 22-14-00168.

МОРФОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК С НАПЫЛЕНИЕМ ЖЕЛЕЗА, МОЛИБДЕНА И МЕДИ

^aБаскакова К.И., ^aГородецкий Д.В., ^aГребёнкина М.А., ^aЛавров А.Н., ^{a,b}Булушева Л.Г.,
^{a,b}Окотруб А.В., ^aСедельникова О.В.

^a *Институт неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия*

^b *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск,
Россия*

Одной из актуальных задач материаловедения является разработка и исследование новых полупроводниковых структур с заданными свойствами для применений в интегральной и силовой электронике. В данной работе исследована возможность изменения электропроводности алмазных пленок с металлическим покрытием за счет образования новых родственных структур в результате термической обработки.

Поликристаллические алмазные покрытия были выращены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. В качестве подложки для роста алмазной пленки использовались пластины монокристаллического кремния с предварительной нуклеацией ростовой поверхности наноалмазами. Рост алмазных пленок осуществлялся в микроволновом плазменном реакторе пониженного давления в течение 24 часов. Генерация плазмы осуществлялась микроволновым излучением частотой 2,45 ГГц мощностью 3,5 кВт. Рабочее давление в камере составляло 110 Тор. Во время синтеза температура подложки составляла около 1100 °С. Главным плазмообразующим газом являлся водород (скорость потока 500 мл/мин), а в качестве углеродосодержащего газа использовался пентан (скорость потока 15 мл/мин). Для улучшения электропроводности алмазных пленок на их поверхность были нанесены тонкие слои железа, молибдена и меди методом вакуумного магнетронного напыления при температуре подложки 250 °С. После нанесения металлических слоев пленки были термически обработаны при 800 °С в течение 1 часа в потоке аргона.

Проведено исследование влияния состава нанесенной металлической пленки и термической обработки на морфологию и электропроводность алмазных покрытий на основе данных растровой электронной микроскопии и четырехконтактного метода измерения сопротивления в диапазоне 4,2–300 К для слоев наноалмазов, снятых с кремниевой подложки, с напыленными на их поверхность железом, молибденом или медью.

Установлено, что отжиг при 800 °С приводит к снижению сопротивления образцов на основе алмазных покрытий, обусловленному появлением графитизированного слоя на их поверхности. В таких образцах проводимость имеет металлический характер и проявляет эффекты слабой локализации при низкотемпературных значениях менее 50 К. В отожженных пленках на основе алмаза с напыленным слоем железа обнаружено изменение механизма электронного транспорта при низких температурах с металлического на активационный. Анализ морфологии и химического состояния поверхности показал, что при отжиге образцов с напыленным слоем молибдена на поверхности алмаза формируются наночастицы карбида молибдена, покрытые тонкими слоями графена. При отжиге пленок с напыленным слоем меди при температуре 800 °С происходит самоорганизация меди в почти сферические субмикронные частицы. В этом случае не наблюдается формирование sp^2 -углерода, а сопротивление отожженных образцов превышает 1 ГОм/квадрат.

Исследование выполнено при поддержке РФФ, грант № 22-72-10097.

НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОДВЕШЕННЫХ ПЛЕНОК CVD-МУЛЬТИГРАФЕНА ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Небогатикова Н.А.,¹ Антонова И.В.^{1,2}

*Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия*

В последние годы направление исследования двумерных материалов привлекает большое внимание исследователей как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения возможности прикладного использования новых материалов. Для развития нанoeлектроники необходима разработка методов создания новых материалов с возможностью управляемого изменения их свойств. Особый интерес представляет идея сочетать несколько материалов в одном, например, создавать наноразмерные включениями одного материала в другом материала за счет использования подходов для локального наноструктурирования.

Данная работа посвящена экспериментальному созданию и исследованию пленок CVD-мультиграфена, наноструктурированных путем облучения быстрыми тяжелыми ионами. Для облучения были использованы ионы ксенона Хе ксенон с энергией 167 либо 26 МэВ (электронные потери $S_e \sim 17.3$ и 8 кэВ/нм, соответственно). Облучение производилось на циклотроне IC-100 в ОИЯИ (г. Дубна), в вакууме при давлении 8.4×10^{-4} Па, при комнатной температуре. Доза облучения варьировалась в диапазоне от 5×10^{10} до 5×10^{12} ионов/см². В ходе данной работы нами были исследованы пленки CVD-графена, перенесенные на специальные медные сетки для просвечивающей микроскопии в связи с тем, что ранее нами было обнаружено, что в наноструктурирование пленок CVD-графена ионами высоких энергий происходит наиболее эффективно в локально подвешенных областях, у которых отсутствует контакт с подложкой [1].

Для облученных пленок при помощи просвечивающей микроскопии были получены изображения. Было показано, что в результате облучения в пленках формируются наноструктурированные области с различными межслойными

расстояниями в зависимости от начальной энергии облучающих ионов. При энергии ионов 167 МэВ в облученных CVD-пленках преобладают наноструктуры с межплоскостными расстояниями 0.19-0.22 нм, наличием осей 5-го порядка и характерными размерами 7-16 нм. Подобные образования характерны для метеоритов либо детонационных алмазов. При облучении с энергией ионов 26 МэВ характерно преобладание межплоскостных расстояний в наноструктурированных областях ~ 0.24-0.27 нм, наличие осей 4-го порядка и характерные размеры ~8-24 нм. Согласно предварительно проведенным расчетам стабильности структуры, наблюдаемые нанообъекты могут быть интерпретированы как кристаллиты как наноалмазы с преимущественной ориентацией (100) и (110). Таким образом, показано, что изменяя количество энергии, передаваемой от ионов материалу, можно значительно влиять на характер наноструктурирования многослойного CVD-графена вблизи треков ионов.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 22-19-00191.

Библиографические ссылки

1. I.V. Antonova, N.A. Nebogatikova, S.V. Erohin, V.A. Prenas, D.V. Smovzh, E.A. Suprun, V.A. Volodin, A. Olejniczak and P.B. Sorokin *Nanostructuring of CVD graphene by high-energy heavy ions*. *Diamond and related materials*, **123**, 108880 (2022). DOI 10.1016/j.diamond.2022.108880

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ И АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

¹Бирюков С.И., ^{1,2}Образцова Е.А., ¹Клинов Д.В.

¹*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

²*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН*

Представляем результаты по использованию наноструктурированных материалов для улучшения качества изображений атомно-силовой (АСМ) и электронной микроскопии (ЭМ). В настоящее время метода АСМ и ЭМ широко применяются как в научных лабораториях, так и для проведения рутинных анализов в производственных процессах. Однако, в отдельных случаях при исследовании специфических образцов требуется улучшить такие характеристики получаемых изображений как разрешение, контраст и др. Мы демонстрируем несколько примеров, когда применение наноматериалов эффективно повышает качество изображений:

- использование монокристаллических алмазных пирамид в качестве прочного и достаточно острого зонда атомно-силового микроскопа;
- нанесение сверхострых нанопуглеродных структур на острие зонда атомно-силового микроскопа для достижения ультравысокого разрешения;
- использование сетчатой пленки из нанотрубок или нанопроволок в качестве сетки для электронной микроскопии для повышения контраста изображений.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание) N 075-03-2023-206 FSMG-2023-0015 и РНФ 21-72-10164.

ЭФФЕКТ МЕЖФАЗНОГО ФОТОГЕЙТИНГА В ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ПОДЛОЖКЕ Si/SiO₂ ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ФОТОДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Серебрянникова С.И., Копылова Д.С., Гладуш Ю.Г., Красников Д.В., Маилис С.,
Насибулин А.Г.

Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва, Россия

Однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ) являются перспективным материалом для фотодетекторов, в том числе фототранзисторов, благодаря своим уникальным оптоэлектрическим свойствам, например, высокой подвижности носителей и большому диапазону значений ширины запрещенной зоны. В данной работе мы представляем высокочувствительные фототранзисторы с каналами из ОУНТ на подложке из кремния/оксида кремния, которые основаны на эффекте фотогейтинга. Отклик канала из ОУНТ на затворное напряжение, вызванное эффектом фотогейтинга, существенно зависит от типа проводимости канала («металлический» или «полупроводниковый» в зависимости от формы передаточных характеристик), который определяется металличностью задействованных ОУНТ. В ходе работы мы определяем зависимость характеристик данных транзисторов от свойств подложки и типа ОУНТ, формирующих канал. Оптимизация структуры фототранзисторов с каналом, состоящим из разреженной сети ОУНТ, позволила нам улучшить удельную обнаружительную способность и относительный отклик по сравнению с ранее описанными фотодетекторами из графена [1] и углеродных нанотрубок [2]. В данной работе мы достигли значений абсолютной чувствительности ~ 60 А/Вт (при мощности падающего света ~ 2 нВт), удельной обнаружительной способности $7.8 \cdot 10^{11}$ см \cdot Гц^{1/2}/Вт и времени отклика 300 мкс, что свидетельствует о высоком потенциале детекторов из ОУНТ на основе эффекта фотогейтинга для обнаружения очень слабых сигналов с высоким отношением сигнал/шум.

Авторы выражают благодарность Совету по грантам Президента Российской Федерации грант № НШ-1330.2022.1.3.

Библиографические ссылки

1. X. Guo, W. Wang, H. Nan, Y. Yu, J. Jiang, W. Zhao, J. Li, Z. Zafar, N. Xiang, Z. Ni, W. Hu, Y. You and Z. Ni, “High-performance graphene photodetector using interfacial gating” *Optica*, vol. 3, № 10, p. 1066–1070, 2016.
2. M. S. Marcus, J. M. Simmons and O. M. Castellini, “Photogating carbon nanotube transistors” *J. Appl. Phys.*, vol. 100, 2006.

УПРАВЛЯЕМОЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Агафонова Е.Е., Серебрянникова С.И., Красников Д.В., Насибулин А.Г.

Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) считаются перспективными материалами для гибких прозрачных электронных и оптоэлектронных устройств. Они выступают конкурентами оксиду индия-олова благодаря своей низкой отражательной способности и возможности нанесения с использованием технологий рулонной печати. Несмотря на значительный прогресс в исследовании синтеза ОУНТ, до сих пор не существует методики контроля распределения хиральностей и проводимости плёнки.

В этой работе мы предлагаем методологию постсинтетического легирования, основанную на электрохимическом стробировании с использованием [BMIM][TFSI].

Мы продемонстрировали возможность тонкого изменения сопротивления в пределах 25% от первоначального значения посредством развертки напряжения в компактной трехэлектродной ячейке.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФТОРИРОВАННЫХ ГРАФИТОВ

Гребёнкина М.А.^{1,2}, Чехова Г.Н.¹, Пинаков Д.В.¹, Лавров А.Н.¹, Булушева Л.Г.¹,
Окотруб А.В.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», г. Новосибирск, Россия

Преимущества фторирования как одной из химических модификаций графита заключаются в возможности получения широкого диапазона степеней фторирования и внедрения в межслоевое пространство фторированных графитов разнообразных молекул. Это приводит к тому, что фторированные графиты представляют интерес как материалы для электродов, сенсоров и хранения активных молекул. Изучение диэлектрических и магнитных характеристик фторированных графитов позволяет получить информацию об организации внедрённых молекул в межслоевом пространстве и распределении атомов фтора вдоль слоёв материала. В настоящей работе были исследованы магнитные и диэлектрические свойства фторированных графитов CF_x , где $0.04 \leq x \leq 0.52$, с внедрёнными бромом, ацетонитрилом, тетрахлорметаном и дихлорметаном, полученные с помощью фторирования при комнатной температуре. Показано, что вымораживание движения внедрённых молекул, обладающих дипольным моментом, приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости материала, и продемонстрирована зависимость диэлектрической проницаемости фторированных графитов от содержания фтора. Были выделены вклады в магнитную восприимчивость от диамагнетизма Ланжевена, парамагнетизма Паули, парамагнетизма Кюри-Вейсса и орбитального диамагнетизма. Моделирование магнитной восприимчивости фторированных графитов показало применимость модели Котосонова для дефектных графитов структур для описания орбитального диамагнетизма фторированного графита. Зависимость величины константы Кюри от степени фторирования не выявила влияния содержания фтора на концентрацию парамагнитных центров. Также воздействия не оказывают внедрённые молекулы, однако, в случае внедрённого брома можно предположить влияние переноса заряда с нефторированных участков на величину константы Кюри. Орбитальный диамагнетизм не зависит от типа внедрённых молекул, а данный вклад становится незначительным при $x \geq 0.3$, то есть при данной степени фторирования сопряжённая π -система слоёв графена в значительной степени разбита присоединёнными атомами фтора.

Авторы благодарят Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, проект 121031700314-5.

ГЛУБИНА ПРОНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОГЛОЩАЮЩИЕ СРЕДЫ

^aАтугова Я.Е., ^bКоровин Е.Ю., ^cГармаев Б.З., ^cБазаров А.В., ^cАтутов Е.Б.,

^a *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

^b *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^c *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия*

В [1] было представлено решение задачи Френеля при облучении границы раздела однородных, изотропных и поглощающих сред. Принципиальным отличием от общепринятого математического описания заключалось в том, что при решении учитывалось оба корня волнового уравнения. Физически это обосновывается тем, что в результате взаимодействия поля исходной волны с зарядами вдоль ее пути распространения возбуждаются вторичные источники, которые в свою очередь излучают волны, бегущие как по направлению исходной волны, так и строго назад. Результирующее излучение вторичных источников назад образует волну встречную к исходной.

При переходе границы раздела из второй в первую среду встречная волна испытывает отражение и преломление в соответствии с законами Снеллиуса. Следовательно, встречная волна на границе расщепляется на зеркально отраженную обратно во вторую среду и преломленную в первую. Данное преломленное излучение и встречное излучение в первой среде формируют обратное отражение.

Таким образом, этот механизм не только объясняет многие явления (отражение «назад» от гладких поверхностей при косом угле падения, усиление обратного отражения при угле Брюстера, конечность глубины проникновения), но и предсказывает ряд физических явлений в однородных граничащих средах: преломление во второй среде под отрицательным углом; наличие кроссполаризованных компонент поля, поскольку линейно поляризованное поле, проникая в среду и встречная ей волна, вызывают движение зарядов не только в направлении поляризации проникающего поля, но и в других направлениях, поскольку заряды в среде взаимодействуют между собой.

Одним из ключевых параметров конечных выражений является глубина проникновения первичной волны в среду. Учитывая среднюю энергию осцилляторов по формуле Планка в докладе представлена её оценка.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН по теме № 0270-2022-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

Библиографические ссылки

1. Lomukhin Yu.L., Atutov E. B., Butukhanov V. P. Backward Reflection in the Fresnel Problem // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. 2018. V.66. No.4. P.1838-1845.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА И ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Кревсун В.В., Бондалетов В.Г., Денисенко А.В., Матыскин К.Е.

Работа посвящена исследованию электромагнитных свойств полимерных композиционных материалов на основе полиуретана и технического углерода марки OMCARB CH85.

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МУНТ

^а Мерешкина В.С., ^{а,б} Доценко О.А.

^а ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск, Россия

^б ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Томск, Россия

Разработка композиционных материалов является одним из способов получения продуктов с уникальными свойствами, в которых концентрация наполнителя и технологические приемы, используемые при изготовлении, играют решающую роль. Одним из методов создания композиционных материалов является добавление твердых включений в жидкое связующее и последующее равномерное распределение в объеме при помощи ультразвукового воздействия. Этот процесс приводит к получению эмульсий, которые можно разными способами наносить на поверхность.

В работе представлены результаты влияния ультразвуковой обработки (УЗО) на электропроводность (ЭП) композиционного материала состава: 95,5 масс.% вододисперсионная краска (база А и база С) и 0,5 масс.% многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) [1]. Методика изготовления экспериментальных образцов подробно описана в работе [2]. Краски база А и база С отличаются количеством белого красящего пигмента и насыщенностью цвета изготовленных экспериментальных образцов. Были изготовлены образцы с временем обработки ультразвуком от 0 до 10 минут.

При исследовании использовались конденсаторный метод – в диапазоне частот от 100 кГц до 2 МГц и оптическая цифровая фотография.

Результаты показали, что в процессе обработки в объеме исходной смеси происходят структурные изменения в распределении наполнителя по объему смеси, приводящие к нелинейной зависимости электрической проводимости экспериментальных образцов от времени и мощности ультразвуковой обработки.

С увеличением времени УЗО исходной смеси удельная проводимость композита сначала увеличивается, потом уменьшается, а затем снова увеличивается. Увеличение проводимости соответствует дезагломерации нанотрубок в смеси и появлению контактов между трубками, уменьшение проводимости – разрушению нанотрубок по местам дефектов и появлению разрывов проводящих структур, дальнейшее увеличение проводимости – появлению контактов между укороченными нанотрубками. Такое поведение наполнителя подтверждается оптическими снимками экспериментальных образцов, на которых прослеживается неравномерное изменение распределения наполнителя и интенсивности окрашивания поверхности. Изменение мощности ультразвуковых колебаний приводит к подобным изменениям, но уже при других временах обработки.

Из полученных результатов следует, что можно изменять значения электрической проводимости композита для одной и той же концентрации МУНТ,

проводя обработку исходной смеси с помощью ультразвука и изменяя тем самым внутреннюю структуру образцов.

Библиографические ссылки

1. Kuznetsov V. L. et. al. Multi-walled carbon nanotubes with ppm level of impurities // Phys. Status Solidi B. – 2010. – № 247. – С. 2695 – 2699.
2. Червинская А.С. и др. Влияние ультразвуковой обработки на диэлектрическую проницаемость композитов с углеродными нанотрубками // Известия вузов. Физика. – 2023. – Т. 66, № 5. – С. 96 – 102.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ВКЛЮЧЕНИЙ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

¹Дорофеев И.О., ²Мосеенков С.И., ¹Дорожкин К.В., ¹Суслиев В.И., ²Кузнецов В.Л.,
²Санькова Н.Н., ²Пархомчук Е.В., ²Заворин А.В.

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г.Томск, Россия*

²*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова
Сибирского отделения Российской академии наук», Новосибирск, Россия*

Одним из ключевых моментов современной стратегии в области создания новых материалов, эффективно взаимодействующих с ЭМИ гигагерцового и терагерцового диапазонов, является разработка способов изготовления материалов с заданными электромагнитными свойствами. В настоящее время активно разрабатываются композиционные материалы, в которых активной фазой, взаимодействующей с ЭМИ, являются углеродные наноматериалы. Композиты на основе полимерных матриц и наноструктурных наполнителей обычно представляют собой однородные материалы с хаотически расположенными включениями [1]. Характеристики такого композита определяются свойствами матрицы, свойствами наполнителя и его концентрацией.

Хаотическое, непредсказуемое распределение углеродных наночастиц в композитах является серьезным препятствием для получения материалов с требуемыми характеристиками. Однако в [2] показано, что можно выделить отдельный класс сред, для которого характерно то, что наполнитель расположен в матрице в виде некоторой пространственной структуры. Эта структура может быть регулярной или псевдoreгулярной (эффективно регулярной за счет пространственного усреднения).

Один из вариантов углеродного нанокompозита регулярной структуры, полученного путем темплатного синтеза рассмотрен в [3]. Электромагнитные свойства данных материалов изменяются в широких пределах не только за счет изменения концентрации включений, но и за счет выбора характерного размера ячейки пространственного распределения, что достигается использованием наполнителей в виде полистирольных сфер с узкими распределениям по диаметру.

В данной работе проведено сравнение характеристик данных композитов с композитами, полученными по традиционной технологии механического смешивания. При этом характеристики матрицы (полистирол и сжатые полистирольные сферы диаметром 900 нм, 1600 нм и 2000 нм) и характеристики многостенных углеродных нанотрубок оставались неизменными. Используемые в работе МУНТ получали путем пиролиза этилена на FeCo катализаторе при температуре 680°C в реакторе с псевдосжиженным слоем. Средний диаметр нанотрубок составлял 9.6 нм.

Значения комплексной диэлектрической проницаемости материалов были измерены на спектрометре СТД-21 на базе интерферометра Маха-Цендера в диапазоне 115 – 512 ГГц. Образцы представляли собой пленки толщиной 300 мкм и диаметром

20 мм. Исследованы вариации действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости при сходных значениях массовой концентрации нанотрубок.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0038.

Библиографические ссылки

1. G.Spinelli, et. al. / Materials 12, 2369 (2019), doi.org/10.3390/ma12152369
2. E.Forati, G.W.Hanson / Phys.Rev. B88, 125125(2013), doi.org/10.1103/PhysRevB.88.125125
3. S.I.Moseenkov, et al. / J. Appl. Phys. 131, 064103 (2022), doi.org/10.1063/5.0075242

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ НАНОПОРОШКОМ И МИКРОВОЛОКНАМИ ЭПОКСИДНЫЕ КАРБОНОВЫЕ КОМПОЗИТЫ, СОЗДАННЫЕ ДВУМЯ МЕТОДАМИ

Южаков И.А.^а, Манхиров В.Н.^а, Гармаев Б.З.^а, Аюрова О.Ж.^б, Номоев А.В.^а

*^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физического материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук*

*^бФедеральное государственное бюджетное учреждение науки
Байкальский институт природопользования
Сибирского отделения Российской академии наук*

Для производства летательных аппаратов требуются материалы с высокой прочностью и малым весом. Таким требованиям соответствуют эпоксидные композиты с углеродной тканью. Существует два основных метода создания эпоксидных композитов с применением армирующих материалов. Первый – это вакуумное формование, с применением вспомогательных материалов (жертвенная ткань, вакуумная пленка) и вакуумного насоса. После пропитки армирующих материалов эпоксидным связующим, на них укладываются вспомогательные материалы и покрываются вакуумной пленкой. В дальнейшем, внутри вакуумного мешка создается остаточное давление, которое способствует удалению излишков смолы и воздуха. Детали, произведенные по этой технологии, отличаются высоким качеством (отсутствие воздушных пузырей), малой массой и высокой прочностью. Технология вакуумной инфузии подразумевает собой доработанную технологию вакуумного формования, но основное отличие заключается в процессе пропитки материала. Если при вакуумном формовании пропитка материала осуществляется с помощью кисти или валика, а потом покрывается вакуумной пленкой и вакуумируется, то при вакуумной инфузии изначально делается вакуумный мешок с расположенным внутри материалом и пропитка осуществляется за счет создания вакуума внутри мешка. Данная технология является одной из самых популярных и может применяться при изготовлении практически любых изделий, однако вакуумная инфузия часто не используется в промышленном производстве вследствие увеличения номенклатуры материалов и себестоимости изготовления, сложности разработки схемы пропитки при изготовлении крупногабаритных изделий [1]. Известно, что модификация эпоксидных композитов нанопорошками и микроволоконками улучшает их механические свойства, такие как прочность на сжатие, изгиб и другие [2].

Цель настоящей работы – получение эпоксидных композитов с углеродной тканью двумя методами и с добавлением углеродных микроволокон и нанопорошка диоксида кремния. Проведены исследования по определению модуля Юнга, пределов прочности на сжатие и растяжение. Установлено, что предел прочности на сжатие

образцов, изготовленных вакуумным формованием с добавлением микроволокон увеличивается до 30 процентов по сравнению с контрольным образцом. Образцы, созданные методом вакуумной инфузии показали значительное увеличение прочности на сжатие ~ 66 МПа, в сравнении с вакуумным формованием ~ 20 МПа [3].

Библиографические ссылки

1. <https://www.skb-077.ru/blog/post/composite>.
2. Иржак, В. И. Упрочнение волокнистых композитов наночастицами // Журнал физической химии 95. 2021. Вып. С. 1297–1303.
3. Манхиров В. Н., Номоев А. В., Сызранцев В. В., Аюрова О. Ж. Углепластики: технология получения и определение механических характеристик // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2019. Вып. 2–3. С. 13–21.

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА КРЕМНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНО-ДИСПЕРСНЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Чимытов Т.А.^{1,2}, Номоев А.В.^{1,2}, Базарова Д.Ж.², Калашников С.В.¹

¹ *Институт физического материаловедения СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6*

² *Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а*

Одним из перспективных направлений исследований в области физического материаловедения являются полимерно-дисперсные жидкокристаллические пленки (ПДЖК), допированные различными наночастицами металлов, оксидов и других элементов. Такие материалы могут сочетать в себе как диэлектрические (оптические) свойства жидких кристаллов (ЖК), так и механические упругие свойства, присущие полимерам.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния наночастиц оксида кремния SiO₂ на электрофизические свойства ПДЖК пленок. Нанопорошок кремнезема получен методом газофазного синтеза с использованием релятивистского ускорителя электронов [1]; в качестве жидких кристаллов использовался алкилцианобифенил 4-нпентил-4'-цианобифенил (5ЦБ). Для настоящих целей была разработана измерительная система, работающая по мостовой схеме переменного тока с возможностью подачи постоянного напряжения смещения на ПДЖК образец [2]. Такая система позволяет производить вольт-фарадные измерения в широком диапазоне частот (1 – 30 кГц) генератора переменного тока. В результате таких измерений был обнаружен эффект памяти, который проявляется в гистерезисном поведении емкости ПДЖК. Причиной возникновения такого эффекта является образующаяся в ПДЖК сеть агломератов наночастиц, в ячейках которых упаковываются молекулы ЖК. Такая ячеистая структура не позволяет молекулам ЖК вернуться в исходное состояние после последовательного включения-выключения внешнего электрического поля, что приводит к возникновению гистерезиса и сдвигу значения диэлектрической проницаемости. Также было показано, что эффект памяти существенно зависит от частоты генератора. Наибольшая площадь гистерезиса и наибольшее смещение емкости ячейки наблюдаются на частоте 10 кГц. По-видимому, это связано с тем, что на этой частоте создается сеть наночастиц SiO₂ с максимальным количеством ячеек, содержащих молекулы ЖК. При этом перпендикулярная составляющая диэлектрической проницаемости имеет выраженную дисперсию с минимумом на частоте 10 кГц. Увеличение концентрации SiO₂ от 0,1 мас. % до 1 мас. % снижает диэлектрическую проницаемость ПДЖК до значений, характерных для

беспримесного ЖК. Полученные данные могут способствовать дальнейшим исследованиям в области разработки энергонезависимых наноструктурированных систем хранения данных.

References

1. Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavrukhin A.V., Salimov R.A., Fadeev S.N., Cherepkov V.V. Preparation of nanopowders by evaporation of initial substances on an electron accelerator at atmospheric pressure // Reports of the Academy of Sciences. 2006. v. 409. No. 3, p. 320-323.
2. Kalashnikov S.V., Romanov N.A., Nomoev A.V. Installation for measuring the dielectric anisotropy of liquid crystals at low frequencies by the bridge method with constant displacement. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.1198 (2021) 012006.

МЕМРИСТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ГРАФЕНА

^aАврамчук А.В., ^aНомоев С.А., ^bГармаев Б.З., ^bНомоев А.В.

^a *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

^b *Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия*

В данной работе исследовались эффекты резистивного переключения состояний в МДМ структурах на основе тонких пленок оксида графена, синтезированного методом химического расслоения графита по методу Хаммерса [1]. Модификация графита производилась в сильных окислительных средах $H_2SO_4 + H_3PO_4$ с добавлением перманганата калия $KMnO_4$ с улучшенной стадией нейтрализации продуктов реакции. Характерные особенности D и G пиков для оксида графена по исследованиям Рамановской спектроскопии определены для модифицированного метода синтеза, в отличие, если стадия нейтрализации отсутствовала. Исследование вольт-амперных характеристик структур на основе синтезированных пленок оксида графена в диапазоне -3 до 3 В показывает гистерезисное поведение. Указанное поведение пленок оксида графена позволяет использовать их в мемристорных структурах для реализации нейроморфных систем на кристалле.

РОСТ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГРАФЕНА НА МЕДНОМ КАТАЛИЗАТОРЕ МЕТОДОМ CVD

^{a,b}Борисенко Д.П., ^bРыбин М.Г., ^aНомоев С.А., ^cНомоев А.В.

^a *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

^b *ООО «РУСГРАФЕН»*

^c *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки*

Институт физического материаловедения

Сибирского отделения Российской академии наук

Графен является наиболее исследуемым и известным 2D-материалом. Его уникальные свойства нашли применение во многих областях промышленности и техники. Получение графена в виде монокристаллической плёнки, является наиболее важной и востребованной задачей перед исследователями. Использование CVD-метода для получения графена на медном катализаторе, позволяет получать однослойный графен хорошего качества и большой площади. После травления медного катализатора, графен можно перенести на любую возможную подложку и успешно использовать для различных устройств микро- и нанoeлектроники.

Образцы графена были выращены CVD-методом на медной фольге толщиной 25 мкм (чистота 99,9%) с использованием метана (CH₄) в качестве источника углерода, а затем перенесены на поверхность кремниевых пластин с термическим окислом (~90 нм). Для эксперимента была использована изготовленная в компании ООО «РУСГРАФЕН» CVD-установка с вертикальным реактором и холодными стенками. После процедуры высокотемпературного отжига в среде водорода и аргона, в реактор при температуре 970 °C подавалось некоторое количество метана для роста графена на поверхности катализатора. Перенос графена с поверхности меди на подложку проводился с использованием влажно-химического процесса переноса при комнатной температуре с использованием полимерного каркаса (PMMA). Медная фольга была полностью растворена в водном растворе персульфата аммония. Графеновую пленку несколько раз осторожно промывали в дистиллированной воде перед переносом на целевую подложку.

Проведение высокотемпературного отжига в преимущественно водородной среде, позволило получить на наиболее разогретых участках медного катализатора отдельные монокристаллы графена со средним размером ~90 мкм. Качество графена подтверждается результатами сканирования рамановской спектроскопии, где отношение I_{2D}/I_G ~ 3 с почти полным отсутствием D-пика.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ АЛЬСИФЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Сухоцкий А.Е., Гурневич Е.А., Быченко Д.С., Максименко С.А.

Электромагнитные свойства композиционных материалов на основе хлопьевидных частиц альсифера в полимерной матрице исследовались в диапазоне частот 1-18 ГГц. Проведено сравнение характеристик композитов с ориентированными и разупорядоченными частицами наполнителя. Показано, что ориентация частиц существенно улучшает радиопоглощающие характеристики материалов и позволяет существенно уменьшить их плотность.

ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИЗ ВОДНОГО РАСТВОРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

^aАтутова Я.Е., ^aМышкин В.Ф., ^aОгородников С.А., ^{a,b}Хан В.А., ^cАрыштаев А.М.

^a *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

^b *Институт оптики атмосферы имени академика В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

^c *Федеральное государственное унитарное предприятие Горно-химический комбинат”, Железногорск, Россия*

В настоящее время область применения изотопно-модифицированных материалов активно расширяется. Путем изменения состава изотопов в кристаллах можно достичь улучшения некоторых характеристик. Однако высокая стоимость разделительных технологий ограничивает получение многих изотопных материалов. Поэтому исследования, направленные на поиск и разработку более эффективных методов получения изотопных материалов, остаются актуальными и важными.

В докладе обсуждается эффект изотопный эффект процесса кристаллизации NaCl из водного раствора, протекающий в слабом постоянном магнитном поле. Эксперименты проводились при различных температурах и напряженностях магнитного поля. Ставилась задача поиска оптимальных условий для кристаллизации, обеспечивающих максимальный изотопный эффект.

В процессе исследования были выращены кристаллы при разных температурах раствора и индукции магнитного поля. Размеры получаемых кристаллов находятся в диапазоне 0,5-5 мм. Для изотопного анализа, с помощью ИСР-масс-спектрометра Thermo Finnigan, растворяли послойно большие кристаллы, а также полностью растворяли кристаллы разных размеров. Установлено, что максимальное изменение содержания ^{37}Cl не превышает 1%, а абсолютное значение может быть как больше, так и меньше природного значения. Это указывает на то, что оптимальные условия не определены.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ МНОГОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

^aДоценко О.А., ^aЧервинская А.С., ^bКачусова А.О.

^aФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск, Россия

^bФГУП «Российский Федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Саров, Россия

В современном мире любая инновация, которая оказывает влияние на жизнь человечества, основана на развитии материалов. Материалы, используемые для создания радиоэлектронных устройств, решения задач электромагнитной совместимости и уменьшения эффективной площади рассеяния объектов, находят новые применения или претерпевают изменения в современных реалиях. Примерами таких материалов являются композиты на основе диэлектрического связующего с проводящими включениями.

В качестве связующего используют разнообразные полимеры: эпоксидные смолы, полистирол, пластик для 3D печати, полиуретан, лак для работ по дереву. Использование того или иного связующего зависит от цели применения материала. Обычные строительные краски для отделочных работ в качестве связующего не упоминаются другими авторами.

Цель работы – исследовать электромагнитные характеристики композита, полученного в результате диспергирования ультразвуком многостенных углеродных нанотрубок [1] в вододисперсионной краске.

Для определения электромагнитных характеристик композитного материала использовался резонаторный метод измерений. Оптические изображения образцов получены с помощью микроскопа LEVENHUK 720B.

Методика изготовления экспериментальных образцов описана в работе [2].

Результаты показали, что ультразвуковая обработка не изменяет коэффициент отражения от слоя композита, в то время как коэффициент прохождения уменьшается, а коэффициент поглощения растет с увеличением времени обработки. На частотах выше 12 ГГц поглощение электромагнитного излучения в слое толщиной 5 мм увеличилось примерно на 20%, а прохождение уменьшилось примерно на такую же величину по сравнению с образцом, не подвергавшемся ультразвуковой обработке. Это указывает на то, что внутри образца происходит поглощение электромагнитного излучения за счет наличия проводящих включений определенной конфигурации, на которых происходит рассеивание энергии электромагнитной волны.

Из полученных результатов следует, что с помощью УЗО при одной и той же концентрации МУНТ можно изменять коэффициенты прохождения (T) и поглощения (R) образцов путем изменения времени ультразвукового воздействия.

Исследования проводились в рамках проекта Приоритет 2030 № НУ 2.4.4.22 ЛМУ на оборудовании ЦКП «Центр радиофизических измерений ТГУ».

Библиографические ссылки

1. Kuznetsov V. L. et. al. Multi-walled carbon nanotubes with ppm level of impurities // Phys. Status Solidi B. – 2010. – № 247. – P. 2695 – 2699.
2. Червинская А.С. и др. Влияние ультразвуковой обработки на диэлектрическую проницаемость композитов с углеродными нанотрубками // Известия вузов. Физика. – 2023. – Т. 66, № 5. – С. 96 – 102.

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ С НАНОУГЛЕРОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

^aКулешов Г.Е., ^aАфанасьев Д.И., ^aЖуравлев В.А.

^a*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

В настоящее время из-за широкого распространения микроволновых электронных устройств остро стоит проблема электромагнитной (ЭМ) безопасности и совместимости в СВЧ диапазоне [1]. Поэтому имеется необходимость поиска новых функциональных радиотехнических материалов, которые позволят снизить негативное влияние высокочастотного излучения. В последнее время особое внимание в данном направлении уделяется композитам на основе различного типа углеродных наполнителей, в частности углеродных нанотрубок и графена [2]. При этом, характеристики конечного композита в значительной степени зависят от технологии смешения компонент. В частности, большое влияние на электромагнитные свойства композитов оказывает ультразвуковая обработка в процессе изготовления [3]. В связи с этим, актуальной задачей является исследование влияния времени ультразвуковой обработки в процессе изготовления композиционных материалов на основе углеродных нанотрубок и графена на их сверхвысокочастотные электромагнитные свойства.

В качестве связующего вещества композита использовалась эпоксидная смола с отвердителем. В качестве наполнителей композиционных материалов выступали порошки малослойного графена в концентрации 10 мас.% и многостенных углеродных нанотрубок со средним диаметром 18,6 нм в концентрации 2 мас.%. Связующее тщательно перемешивалось с наполнителем в соответствующих соотношениях по массе. Поскольку углеродные порошки представляли собой крупные агломерации исходных структур, то перед окончательной полимеризацией в композите они подвергались ультразвуковой (УЗ) обработке диспергатором при мощности 75 Вт. Из полученных материалов изготавливались экспериментальные образцы коаксиальной формы.

Измерения проводились волноводным методом в коаксиальной ячейке на векторном анализаторе цепей «Микран» серии Р4М-18 в диапазоне частот от 100 МГц до 18 ГГц. Расчет диэлектрической проницаемости по измеренным *S*-параметрам производится по модернизированной методике Беккера-Джарвиса.

Были получены частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости при различном времени УЗ обработки композитов. Выявлено, что при увеличении времени УЗ обработки действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости с начала увеличивается и достигает максимума при времени порядка 5-6 минут, а далее начинает уменьшаться. Однако для композитов с углеродными нанотрубками и графеном поведение диэлектрической проницаемости в зависимости от времени УЗ воздействия различаются.

Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22.29.20248, <https://rscf.ru/project/22.29.20248/> и средств Администрации Томской области.

Библиографические ссылки

1. Huang Q. et. al. / J. of Mat. Sci. & Tech. 2022. V. 108. P. 90–101.
2. Zhang Q. et. al. / Carbon. 2022. V. 188. P. 442–452.
3. Червинская А.С. и др. / Изв. вузов. Физика. 2023. Т. 66. № 5 (786). С. 96–102.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СЕНСОР ДОФАМИНА НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННЫХ ВОЛОКОН ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Дмитриева В.А., Федоров Ф.С., Четыркина М.Р., Новиков И.В., Насибулин А.Г.
Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

В нашей работе мы исследовали подходы к созданию сенсоров дофамина, важного нейромедиатора, на основе волокон из углеродных нанотрубок (УНТ). Для изготовления УНТ волокон мы использовали быструю и простую технологию «мокрого» вытягивания (wet-pulling technique), которая не требует специального оборудования. Электрохимическое поведение полученных УНТ волокон было изучено при помощи циклической вольтамперометрии и хроноамперометрии. Электрохимические измерения проводились в фосфатно-солевом буфере в диапазоне -400–600 мВ при использовании платинового и хлоридсеребряного электродов в качестве вспомогательного электрода и электрода сравнения, соответственно. Для характеристики материалов были применены методы спектроскопии комбинационного рассеяния и растровая электронная микроскопия. Модификация электродов, позволяющая улучшить их характеристики, в том числе чувствительность к дофамину, проводилась как с помощью предварительного электрохимического окисления волокон для увеличения количества функциональных групп на поверхности, так и денсификацией волокон (скручиванием) для увеличения электрической проводимости.

Было обнаружено, что электроды на основе УНТ волокон проявляют чувствительность к дофамину в диапазоне концентраций 2-100 мкМ, которая может быть увеличена в два раза при электрохимическом окислении и скручивании волокон одновременно. Окисленные скрученные УНТ волокна продемонстрировали возможность применения сенсоров *in vitro* с незначительными потерями в чувствительности в таких условиях, как загрязнение поверхности белками, присутствие таких интерферентов, как мочева и аскорбиновая кислоты, изменение pH, длительное измерение и циклирование в культуральной среде. В сочетании с известными механическими свойствами УНТ волокон полученные результаты подчеркивают потенциал таких УНТ волокон в имплантируемых и гибких датчиках.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-10288, <https://rscf.ru/project/21-73-10288/>.

2D VAN DER WAALS HETEROSTRUCTURES: SYNTHESIS AND THZ APPLICATION

Paddubskaya A.G.^{1*}, Valynets N.I.¹, Korolik O.V.², Mazurenko I.M.³, Vovk D.E.³, Rogov I.P.^{3,4}, and Matyushkin Y.E.³

¹*Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Bobruiskaya str. 11, 220006, Minsk, Belarus. e-mail: [*paddubskaya@gmail.com](mailto:paddubskaya@gmail.com)*

²*Belarusian State University, Faculty of Physics, Bobruiskaya str. 5, 220006, Minsk, Belarus*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny 141700, Russia*

⁴*Skolkovo Institute of Science and Technology, Nobel str. 3, 143026, Moscow, Russia.*

Recently, a strong scientific interest was attracted not only by 2D materials, including graphene, hexagonal boron nitride (h-BN), etc., but also by vertical (or van der Waals) heterostructures based on them [1]. Significant practical potential of the vertical heterostructures in various fields implies the manufacture of devices based on them. On the other hand, various practical applications of terahertz (THz) radiation attract great attention in the scientific community and make the THz technology one of the important areas in modern physics [2, 3].

In this work, using graphene partially covered by hBN as an example, we considered the key features of 2D van der Waals heterostructure fabrication. Raman spectroscopy and atomic force microscopy were used to characterize 2D materials at each fabrication step. In particular, it was shown that for an h-BN coated graphene on a SiO₂/Si substrate, I_{2D}/I_G intensity ratio increases up to 6 times, which is associated with the effects of doping, mechanical stress, and interference of scattered radiation on the oxide layer thickness. The technique for a chemical vapor deposition (CVD) growth of high-quality large-domain single-crystalline graphene (lateral size >100 μm) with the controllable number of layers was developed. The mobility of pure graphene and graphene-based heterostructure was analyzed as a function of the number of graphene layers and the twisted angle. The concept of room temperature operated polarization sensitive THz detector based on exfoliated and CVD graphene was also presented.

This work is supported by RFBR grant no. 20-52-04012, BRFBF grant no. F21RM-057 and Belarusian State Programme for Research 'Physical material science, newmaterials and technologies'. We are thankful to Polina Kuzhir and Georgy Fedorov for fruitful discussion and advice on results interpretation.

References

1. M.A. Giambra, V. Miseikis, S. Pezzini, S. Marconi, A. Montanaro, F. Fabbri, V. Sorianello, A.C. Ferrari, C. Coletti and M. Romagnoli, ACS Nano 15, 3171-3187 (2021).
2. G. Valušis, A. Lisauskas, H. Yuan, W. Knap and H. G. Roskos, Sensors 21, 4092 (2021).
3. Leitenstorfer A. et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 56 (22), 223001 (2023).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОЙ СРЕДЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗВУКА В НАНОПОРОШКЕ

^aГармаев Б.З., ^aБронникова С.М., ^aЮжаков И.А., ^bЗобов К.В., ^bБардаханов С.П.,
^aНомоев А.В.

^a *Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия*

^b *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия*

Нанопорошки резко отличаются от гранулированных сред по физическим свойствам. Соотношение между массой частиц и потенциалами взаимодействия частиц препятствует рассыпанию частиц и формирует упругие агломераты. Кроме этого соотношение между размерами частиц и длиной свободного пробега молекул воздуха ставит под сомнение приближения сплошной среды и классические представления о распространении механических возмущений в такой среде. Большой объем нанопорошка диоксида кремния, полученного методом испарения исходного вещества электронным пучком высокой энергии [1], позволяет предложить методику измерения скорости звука. В настоящей работе приведены теоретические предположения о закономерностях распространения звука в толстом слое нанопорошка. Применялась авторская акустическая измерительная система. Установлено, что скорость звука в нанопорошке меньше, чем в газе и твердом веществе и составляет порядка 35 м/с для использованного нанопорошка.

Предлагается гипотеза о том, что нанопорошок ведет себя как новый тип сплошной среды – «тяжелый газ» при прохождении через него звуковой волны. Гипотеза позволяет применить для данного случая формулы для определения скорости звука в газе. Подставляя в формулу измеренную скорость звука, атмосферное давление и насыпную плотность нанопорошка, найдем постоянную адиабаты для нанопорошка «Таркосил-50», равную $\gamma \approx 1,25$.

Также предложено использовать формулу продольной скорости в приближении эффективной среды, где среда чаще всего рассматривается как случайная упаковка одинаковых эластичных сфер, что приемлемо в случае насыпанных в емкость наночастиц «Таркосил», так как наночастицы имеют сферическую форму. В последнее время действие эвристических подходов к получению эффективных параметров, таких как закон контакта Герца-Миндлина, распространили на наномасштаб [2]. Подставляя в формулу измеренные параметры, получаем, что радиус контакта сферических наночастиц равен $2 \cdot 10^{-12}$ м. Такое малое значение подтверждается небольшой насыпной плотностью нанопорошка. Она составляет всего лишь 5% от плотности твердого вещества. Таким образом, около 95% объема порошка занимает воздух. Это подтверждает предположение о неплотной упаковке наночастиц и малом радиусе контакта между ними.

Библиографические ссылки

1. Bardakhanov S. P. et al. Nanopowder production based on technology of solid raw substances evaporation by electron beam accelerator //Materials Science and Engineering: B. – 2006. – Т. 132. – №. 1-2. – С. 204-208.
2. Girard A. et al. Contact laws between nanoparticles: the elasticity of a nanopowder //Nanoscale. – 2018. – Т. 10. – №. 4. – С. 2154-2161.

НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КОВАЛЕНТНЫХ ТРИАЗИНОВЫХ КАРКАСОВ И Pd ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ВОДОРОДА ИЗ МУРАВЬИНОЙ КИСЛОТЫ

Булушев Д.А.¹

¹Институт катализа им. Г.К. Борескова, Лаврентьева 5, Новосибирск
dmitri.bulushev@catalysis.ru

Ковалентные триазиновые каркасы (СТФ) обычно состоят из углерода, азота и водорода. Поверхностные азотные центры могут стабилизировать нанесённые на них металлы в форме наночастиц, молекулярных комплексов и отдельных атомов. В идеальном случае структура STF является слоистой. Удельные площади поверхности STF и их термическая устойчивость очень высоки. Это позволяет их использовать в качестве носителей для катализаторов.

В работе было приготовлено пять STF материалов из различных органических прекурсоров, содержащих карбонитрильные группы. Методом пропитки был нанесён Pd (1 вес%), и полученные материалы были исследованы в реакции получения водорода из газообразной муравьиной кислоты. Показано, что активность и селективность катализаторов определяются молекулярной структурой активных Pd центров, которая была определена методами EXAFS/XANES, XPS и электронной микроскопии. Катализаторы с моноатомными центрами Pd²⁺-N₄ и Pd²⁺-O₄ проявили низкую активность в реакции, в то время как катализаторы с моноатомными центрами Pd²⁺-C₂N₂ и Pd²⁺-CN₃ продемонстрировали значительно более высокую активность, которая превышала активность металлических частиц (1-5 нм), нанесённых на пористый углерод или графитоподобный нитрид углерода [1-2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-23-00608.

Библиографические ссылки

1. Bulushev, D. A.; Golub, F. S.; Trubina, S. V.; Zvereva, V. V.; Bulusheva, L. G.; Gerasimov, E. Y.; Navlani-García, M.; Krot, A. D.; Jena, H. S., Single-Atom Pd Catalysts Supported on Covalent Triazine Frameworks for Hydrogen Production from Formic Acid. ACS Applied Nano Materials 2022, 5, 12887-12896.
2. Bulushev, D. A.; Golub, F. S.; Trubina, S. V.; Zvereva, V. V.; Gerasimov, E. Y.; Prosvirin, I. P.; Navlani-García, M.; Jena, H. S., Pd Active Sites on Covalent Triazine Frameworks for Catalytic Hydrogen Production from Formic Acid. ACS Applied Nano Materials 2023, accepted for publication.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАННОГО ТОРФА НА СПЕКТРЫ ИММИТАНСА ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ТВЕРДЕНИЯ

^aЖуравлев В.А., ^aСусяев В.И., ^aЖуравлев А.В., ^bПрищеп И.А., ^bГорленко Н.П.,
^bСаркисов Ю.С.

^aНациональный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

^bТомский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

В работах [1, 2] предложен метод синтеза новой органоминеральной добавки для цементных систем на основе термомодифицированного торфа (ТМТ) в условиях ограниченного доступа воздуха. Проведенные исследования режимов получения добавки показали, что при введении в цементную систему добавки ТМТ-600,

полученной при 600 °С, достигается существенное улучшение прочностных и гидрофизических характеристик цементного камня. Было выяснено, что оптимальной с точки зрения улучшения прочностных характеристик цементного камня является концентрация добавки, равная 0,5 масс. %. В [3] установлено, что при введении добавки ТМТ-600 в портландцемент ускоряются сроки схватывания и повышается прочность при сжатии цементного камня в 28 суточном возрасте на 54,2 %. В результате рентгенофазовых исследований продукта ТМТ-600 выяснилось, что он является многофазным. Добавка ТМТ-600 содержит в своем составе различные фазы в нанодисперсном состоянии, в том числе фуллерены и другие формы нанougлерода, которые изменяют кинетику и механизм взаимодействия цемента с водой и впоследствии приводят к повышению предела прочности, водостойкости и морозостойкости цементного камня.

В работе [4] проведен анализ суточного изменения спектров иммитанса (импеданса и адмиттанса) цементного теста в процессе твердения. Спектры измерялись в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц на прецизионном измерителе RLC Agilent E4890A с помощью изготовленной конденсаторной измерительной ячейки. Исследования проведены с целью установления оптимальных эквивалентных электрических схем, описывающих трансформацию электрофизических свойств цементного теста и интерфейсных явлений в приэлектродном слое измерительной ячейки от времени твердения. Установлена чувствительность параметров эквивалентных схем к разным этапам твердения цементного теста. Показана связь спектров электрофизических параметров с физико-химическими процессами твердения цементного камня.

В данном сообщении представлены результаты исследований по влиянию добавки ТМТ-600 на электрофизические свойства цементного теста и цементного камня в начальный период твердения. Проведен сравнительный анализ спектров иммитанса цементного теста контрольных образцов и с добавкой ТМ-Т600. Показано, что при введении добавки ТМТ-600 в цементное тесто наблюдается как снижение времени схватывания по сравнению с контрольными образцами, так и появление новых структурных элементов, увеличивающих прочность цементного камня. Это отражается на параметрах эквивалентных схем, описывающих спектры иммитанса.

Полученные данные можно использовать для анализа радиофизическими методами физико-химических процессов, происходящих при схватывании цементного теста и формировании цементного камня.

Библиографические ссылки

1. Копаница Н.О. и др. / Вестник ТГАСУ. 2013. № 4. С. 184–190.
2. Копаница Н.О. и др. / Строительные материалы. 2015. № 4. С. 93-96.
3. Прищепя И.А. и др. / Вестник ТГУ. Химия. 2020. № 18. С. 35-46.
4. Zhuravlev V.A. et al. / IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2021. **1198**. 012014.

FACTORS AFFECTING THE CHEMIRERESISTIVE PROPERTIES OF MOLYBDENUM DISULFIDE

Bulusheva L.G., Lavrukhina S.A., Fedorenko A.D., Okotrub A.V.

Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Molybdenum disulfide (MoS₂) is the second most popular 2D material after graphene. The MoS₂ layer has a sandwich structure, in which molybdenum atoms are surrounded by sulfur atoms on both sides, and, unlike graphene, MoS₂ is a semiconductor. Thin layers of MoS₂ have a large number of sites for adsorption, and their electrical conductivity is sensitive

to the transfer of electron density, which makes MoS₂ promising for use in chemiresistive gas sensors. This report presents a review of the literature data in this area, analyzes the main structural factors affecting the sensitivity and sensitivity of the sensor, and also shows the results obtained in this area in our laboratory.

The first MoS₂-based sensor device was fabricated in 2012 from mono- and few-layered films mechanically detached from a single crystal [1]. These exfoliated films were n-doped and their resistance increased when exposed to NO gas, indicating charge transfer from MoS₂ to the adsorbate. Films consisting of two to four MoS₂ layers exhibited high sensitivity to NO with a detection limit of 0.8 ppm (parts per million) at room temperature, while the response of the MoS₂ monolayer was fast but unstable. Later, it was confirmed that several layers of mechanically delaminated MoS₂ have a more stable response to NO₂ and NH₃ as compared to a monolayer [2]. The use of a CVD-grown MoS₂ monolayer as a sensing element allowed reducing the detection limit for gaseous NO₂ to 20 ppb and gaseous NH₃ to 1 ppm at room temperature [3]. The extremely high sensitivity of the sensor was associated with a large surface area of the monolayer, and it was proposed that the detection limit can be further reduced by optimizing the device configuration.

The edges of MoS₂ are more reactive than the basal plane and the films with a vertical orientation relative to the substrate showed 4-times and 5-times enhanced response as compared to horizontally oriented MoS₂ layers for the electron donor ethanol and electron acceptor NO₂ molecules, respectively. The electrical response of the device directly correlated with the density of the exposed sulfur edges [4]. Our comparative study of CVD-synthesized MoS₂ layers oriented vertically and horizontally with respect to the substrate showed a high response to NO₂ and NH₃ at room temperature of the former sensor and sensitivity of the latter sensor only to gaseous NO₂.

The sensitivity of the sensor can also be improved by increasing the operation temperature and creating atomic defects. The lowest detection limit of 1.4 ppb NO₂ was achieved using a CVD-grown MoS₂ monolayer at room temperature. The developed heteroatom-doped MoS₂ sensors also detect sub-ppm concentrations of NO₂ and N-doped MoS₂ demonstrated the lowest detection limit [5]. Heteroatom doping made it possible to significantly improve the response of the MoS₂-based sensor to NO and N(CH₂CH₃)₃ gases.

This work was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 23-73-00048).

References

1. Li H. et al. / Small. 2012. Vol. 8. P. 63–67. Doi:10.1002/sml.201101016.
2. Late D.J. et al. / ACS Nano. 2013. Vol. 7. P. 4879–4891. Doi:10.1021/nn400026u.
3. Liu B. et al. / ACS Nano. 2014. Vol. 8. P. 5304–5314. Doi:10.1021/nn5015215.
4. Cho S.-Y. et al. / ACS Nano. 2015. Vol. 9. P. 9314–9321. Doi:10.1021/acsnano.5b04504.
5. Bulusheva L.G. et al. / Nanomaterials. 2023. Vol. 13. P. 2182. Doi:10.3390/nano13152182.

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ГЕКСАФЕРРИТОВ И УГЛЕРОДНОЙ ФИБРЫ

Карева К. В., Журавлев В. А., Вагнер Д. В., Митрофанов С. В.

В докладе рассматриваются диэлектрические свойства композиционных материалов на основе гексаферрита BaFe₁₂O₁₉ и углеродной фибры. Показано, что при применении постоянного магнитного поля вдоль поверхности композита во время его полимеризации, происходит изменение значений комплексной диэлектрической проницаемости и, соответственно, значений удельной проводимости материала в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц. Также обсуждаются спектры комплексной диэлектрической проницаемости композитов в диапазоне частот 10 МГц – 18 ГГц.

МОРФОЛОГИЯ АЛМАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОТЖИГЕ УГЛЕРОДНЫЕ

^aСедельникова О.В., ^aД.В. Городецкий, ^aЛ.Г. Булушева, ^bЮ.Н. Пальянов,
^aА.В. Окотруб

^a Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

^b Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Графен на алмазе (Gr/D) - это перспективный гибридный материал с большим потенциалом для использования в развивающихся областях электроники. Графен отличается уникальными электрофизическими характеристиками, включая высокую электропроводность, большую подвижность электронов и исключительную механическую прочность, которые сочетаются с объемными свойствами идеального алмаза, функционирующего как широкополосный диэлектрик. Эта комбинация делает Gr/D идеальным выбором для новых электронных устройств углеродной электроники, требующих высокой эффективности и надежности.

Графеновые слои на алмазных поверхностях можно получить разными способами, в том числе при термической перестройке поверхности алмаза при высокотемпературном отжиге. В данном исследовании, мы анализируем процесс формирования графеновых слоев на поверхности алмазных кристаллов, применяя различные методы, включая просвечивающую электронную микроскопию, спектроскопию комбинационного рассеяния света, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию, спектроскопию рентгеновского поглощения и квантовую химию. Это исследование направлено на углубление нашего понимания процесса образования графеновых слоев на алмазе и возможного использования Gr/D в будущих устройствах углеродной электроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-72-10097, https://rscf.ru/prjcard_int?22-72-10097).

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС СЛОИСТОЙ СРЕДЫ «СНЕГ-ЛЕД-ВОДА- ДОННЫЙ ГРУНТ» В ДИАПАЗОНЕ 10 КГЦ- 1.8 ГГЦ

Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л. Х., Дембелов М.Г., Буянова Д.Г.
Институт физического материаловедения СО РАН

Представлены результаты численного моделирования частотной зависимости поверхностного импеданса слоистой среды «снег-лед-вода-донный грунт» в диапазоне 10 кГц–1,8 ГГц, полученные для реки Селенга. Показано, что аналогичные природные электромагнитные структуры характерны для многих крупных рек Сибири и Дальнего Востока России. Определены области применимости импедансных граничных условий для вертикально-поляризованной волны в диапазоне 10 кГц–1,8 ГГц. Установлены существенные изменения фазы импеданса от сильно-индуктивных до сильно-емкостных значений в узких полосах частот в КВ-УКВ диапазонах. Результаты численного моделирования необходимы для расчетов функции ослабления W и уровня поля E радиополос, использующих широкополосные радиосигналы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН по теме № 0270-2022-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕФРАКЦИИ ПРИЗЕМНОЙ ТРОПОСФЕРЫ НА РАДИОФИЗИЧЕСКОМ НАУЧНОМ СТАЦИОНАРЕ «ХУРУМША»

Базарова А.С., Базаров А.В., Атутов Е.Б., Башкуев Ю.Б.

Институт физического материаловедения СО РАН

E-mail: arunabas@mail.ru, alebazaro@gmail.com, evgeniy_atutov@mail.ru, buddich@mail.ru

Неоднородность атмосферы вызывает искривление (рефракцию) траектории луча ультракоротких радиоволн. Значение градиента рефракции g_N влияет на кривизну траектории радиолуча. При этом если $g_N < 0$, то траектория распространения вдоль земной поверхности обращена выпуклостью вверх, если $g_N > 0$, то траектория обращена выпуклостью вниз. Соответственно с эти различают три вида тропосферной рефракции: отрицательная рефракция при $g_N > 0$, нулевая рефракция ($g_N = 0$), положительная рефракция, когда $g_N < 0$, причем для нормальной атмосферы $g_N < 0 = -0,04$ 1/м. В работе показаны суточные изменения градиента рефракции в нижнем 10-метровом слое приземной атмосферы. Измерения метеопараметров (температура, давление и влажность) на $h_1 = 1$ и $h_2 = 10$ м проводились с использованием атмосферно-почвенного измерительного комплекса, установленного на Радиофизическом научном стационаре «Хурумша» Института физического материаловедения СО РАН, расположенного в засушливой центральной области Селенгинского среднегорья Республики Бурятия. На их основе рассчитана статистика радиометеорологических параметров на этих высотах, построена динамика градиента рефракции в течение типичных суток по пятилетним данным с 2017 по 2021 год. Обнаружена значительная изменчивость градиента в течение суток для центральных месяцев сезонов года: января, апреля, июля, октября. Установлено, что отрицательная рефракция в этом слое наблюдается в дневные часы во все сезоны года, а в июле — во все стандартные метеорологические сроки. При этом явлении радиолуч удаляется от поверхности Земли, а дальность видимости уменьшается.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН по теме № 0270-2022-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

РЕЗОНАНСНАЯ БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ СВЧ-ТОМОГРАФИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Галка А. Г., Костров А. В.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

Исследование внутренней структуры однородных и неоднородных материальных сред является актуальной задачей во многих приложениях науки и техники, в том числе, физика плазмы, медицина, дефектоскопия, геологоразведка, материаловедение. Наиболее востребованными считаются методы, дающие информацию о свойствах объекта без нарушения его целостности. Среди существующих способов следует выделить развивающийся метод ближнепольной

СВЧ-томографии, позволяющий визуализировать трехмерное распределение электромагнитных характеристик – диэлектрической проницаемости и проводимости. Пространственное разрешение метода не ограничено длиной волны и составляет доли миллиметра, что намного меньше размеров зондирующего датчика. По результатам измерения импеданса электрически малой антенны, расположенной над объектом, определяются электродинамические характеристики среды, усредненные в области локализации квазистатического поля. Масштаб данной области по порядку величины совпадает с апертурой датчика. Для получения глубинного профиля комплексной диэлектрической проницаемости используется система датчиков с переменной апертурой. Массив интегральных значений электродинамических характеристик, дополненный двухмерным сканированием вдоль поверхности объекта, является основой для решения обратной задачи ближнеполевой томографии неоднородной среды. Высокая чувствительность к малым изменениям параметров среды достигается за счет применения резонатора в составе измерительной системы. Основным источником диагностической информации являются сдвиг и уширение резонансной кривой. Собственная частота резонатора соответствует дециметровому диапазону длин волн, при этом глубина проникновения электромагнитного поля внутрь объекта порядка сантиметра.

В докладе приведено развитие метода резонансной ближнеполевой томографии на примере решения модельной задачи по поиску локализованных неоднородностей в слабопоглощающих средах. С помощью набора датчиков с разными глубинами зондирования определены верхняя, нижняя и боковые границы и диэлектрические свойства прямоугольного параллелепипеда. Выполнены оценки предельной чувствительности измерительной системы. Развита и экспериментально реализована неинвазивная диагностика биологических тканей. Показаны различия диэлектрических свойств здоровой кожи, невуса и меланомы. Обнаружены изменения глубинной структуры кожи в области термической травмы по сравнению с тканями здоровой кожи. Для определения параметров разреженных сред развит и реализован амплитудно-фазовый метод, позволяющий повысить точность. Разработан высокочувствительный датчик влажности воздуха при низком давлении. Показано, что развитый метод расширяет диагностические возможности плазменного резонансного СВЧ-зонда, увеличивая диапазон измеряемых значений на три порядка вниз по концентрации [1]. Предложен новый метод измерения параметров ионосферной плазмы на борту микроспутника.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 22-22-20093.

Библиографические ссылки

1. Galka A.G. et al. // J. Appl. Phys. 2019. V. 125, N. 12. 124501.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЯ НАД ИМПЕДАНСНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ДВ-СВ-КВ ДИАПАЗОНАХ РАДИОВОЛН

Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б.

Институт физического материаловедения СО РАН

Описаны формулы для расчета функции ослабления поля земной волны над реальными импедансными подстилающими средами. Рассмотрено поле вертикального электрического диполя над плоской импедансной поверхностью. Поверхностный импеданс для неоднородной слоистой среды обладает емкостными и индуктивными свойствами, при этом выражается довольно сложно через электрические свойства среды. Рассмотрены свойства распространения радиоволн над емкостными

импедансами. Функция ослабления над сильно индуктивной поверхностью имеет особенности, главной из которых является присутствие поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ). Установлены эффекты, связанные с наличием ПЭВ, когда электромагнитное поле проявляет отчетливо выраженный поверхностный характер. Показано, что условия распространения ДВ-СВ-КВ радиоволн над сильно индуктивной структурой «лед-море» наиболее ярко демонстрируют наличие ПЭВ, при этом на некоторых расстояниях от источника они более благоприятны, чем над идеально проводящей средой из-за возникновения ПЭВ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН по теме № 0270-2022-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАЙГРАЕВСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ.

Сычев Р.С., Базаров А.В., Атутов Е.Б., Башкуев Ю.Б.
Институт физического материаловедения СО РАН

Причины пожаров в лесах могут быть условно поделены на природные и антропогенные. В качестве определяющих факторов антропогенности лесных пожаров в работе рассматриваются близость лесных пожаров к инфраструктурным объектам — населенным пунктам и дорожной сети. В процессе выполнения работы были построены векторные слои населенных пунктов и всех типов дорог по оцифрованным топографическим картам в масштабе 1:100000 и актуализированы по спутниковым снимкам Sentinel-2. Рельеф построен по данным SRTM-2. Точечные слои очагов лесных пожаров за период с 2011 по 2020 годы воссозданы согласно информации ИСДМ-Рослесхоз. Геоинформационными методами рассчитаны расстояния от мест возгораний до ближайших дорог или населенных пунктов. Ряды данных расстояний проанализированы методами описательной статистики. Распределения данных (расстояний) отличаются от нормального согласно статистическим критериям как Колмогорова-Смирнова, так и Шапиро-Уилка. Следовательно, в исследовании в качестве меры центральной тенденции и вариации целесообразно использование медианы и квартилей [1]. Так как значимое количество пожаров лежит в уже пределах первых рангов распределений, исследуется предположение об антропогенности пожаров, лежащих в трех первых квартилях (то есть ближайших 75%) значений расстояний. Соответственно, дальний четвертый квартиль пожаров, предположительно, является природным (наименее доступным). Построены «буферы антропогенности». Данные по пожарам отсортированы на очаги, расположенные в буфере и не попавшие в него, для дальнейшего анализа. Предлагаемый подход является первой попыткой исследования антропогенного влияния на возникновение лесных пожаров на исследуемой территории.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН по теме № 0270-2022-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

Библиографические ссылки

1. Гржибовский А.М. Типы данных, проверка распределения и описательная статистика // Экология Человека. 2008. № 1. Р. 52–58.

СФЕРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОВОДЯЩИХ МАКРОМОЛЕКУЛ СЕМИЭЛЕКТРИКОВ ПОЛИАЦЕНХИНОНОВ

^aМухаева Л.В., ^aАфанасьев Н.В., ^bМухаева Д.В.

^a *Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск,
Россия*

^b *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физического материаловедения
Сибирского отделения Российской Академии наук, Улан-Удэ Россия*

Целью настоящей работы является определение экспериментально обоснованной структурной модели и механизма поляризации этих полимеров, отнесенных нами к семиэлектрикам. Это полимерные полупроводники, ожидаемые особые диэлектрические свойства которых определяются новым электронным явлением – постулированной локальной электропроводностью макромолекул. Необходимость измерения полного диэлектрического спектра семиэлектриков очевидна для предварительного построения их феноменологической теории [1] и разработки на ее основе экспериментальных методов физики семиэлектриков.

При этом для определения математической модели семиэлектриков использована обобщенная формула Лорентца – Лоренца [2]. В результате ее последовательного применения к прессованному образцу полиаценхинона и к смеси его порошка с парафином получена общая формула

$$\frac{1}{N} = \frac{(1 - v')}{\epsilon'_n} \left[\frac{\Delta\epsilon'}{\mu} \frac{1}{v} - (\epsilon'_\infty - \epsilon'_n) \right], \quad (1)$$

где $0 \leq N \leq 1$ – коэффициент деполяризации проводящих макромолекул, принимающий значение $1/3$ для их сферической формы, v' – объемная концентрация проводящей фазы в смеси, $\epsilon'_n = 2.2$ – диэлектрическая проницаемость парафина, $\Delta\epsilon'$ – инкремент диэлектрической проницаемости ϵ' в области дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости, ϵ'_∞ – высокочастотный предел ϵ' , $\mu = v'_m/v_m$ – коэффициент псевдоизоляции макромолекул, v'_m и v_m – частота максимума коэффициента потерь соответственно в спектре смеси порошка полиаценхинона с парафином и в области дисперсии спектра прессованного образца полиаценхинона.

Рассчитанные значения параметров модели (1) полиаценхинонов согласуются с измеренными при условии $N = 1/3$, т.е. для сферической формы проводящих макромолекул.

Это является основанием для утверждения, что для полиаценхинонов справедлива сферическая структурная модель полидисперсии, адекватной механизму межслойной поляризации проводящих макромолекул.

Библиографические ссылки

1. Гейзенберг, В. Роль феноменологических теорий в системе теоретической физики / В. Гейзенберг // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 91. – В. 4. – С. 731-733.
2. Мухаева, Л.В. Самоорганизация проводящих макромолекул полиаценхинона в процессе синтеза / Л.В. Мухаева, Н.В. Афанасьев, Д.В. Мухаева, М.Г. Воронков // Докл. Академии наук – 2015. – Т. 461. № 6. – С. 677.

ВЛИЯНИЕ СЕРЫ И ФОСФОРА НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Гребёнкина М.А.^{1,2}, Ворфоломеева А.А.¹, Лавров А.Н.¹, Булушева Л.Г.¹,
Окотруб А.В.¹

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия*

² *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», г. Новосибирск, Россия*

Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), внутреннее пространство которых заполнено серой и фосфором, представляют интерес для применения в электрохимии, электрокатализе и газовых сенсорах. Свойства ОУНТ после заполнения зависят от типа образовавшейся во внутренней полости структуры и её взаимодействия с компонентами ОУНТ (углеродом и железным катализатором). Данные процессы также сказываются на магнитных свойствах образцов. По этой причине изучение магнитных характеристик заполненных ОУНТ позволяет дополнить сведения о взаимодействии ОУНТ и внедрённых веществ. В данной работе были исследованы магнитные свойства ОУНТ, заполненных серой и фосфором в ампульном синтезе за счёт испарения и последующей конденсации серы и фосфора во внутренней полости ОУНТ. Полученные результаты показали, что при заполнении ОУНТ серой возникает новая магнитная фаза, образование которой приводит к появлению новой температуры Кюри около 200 К. В случае заполнения ОУНТ фосфором наблюдалось уменьшение ферромагнетизма относительно исходных ОУНТ, то есть взаимодействие фосфора и ОУНТ заключается в образовании диамагнитной фазы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-13-00219).

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МУНТ ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ МЕТАЛЛОВ ПЕРЕХОДНОЙ ГРУППЫ

Коровин Е.Ю., Качалов А.С.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск,
Россия*

Известно, что степень отражения электромагнитных волн зависит от величины согласования волнового сопротивления материала со свободным пространством: чем лучше согласованы эти величины, тем меньший коэффициент отражения и больший коэффициент поглощения электромагнитных волн можно получить при прочих равных условиях. Благодаря наличию полости, т.е. особенностям строения многостенные углеродные нанотрубки могут выступать в качестве капсулы, наполнителем которой будет являться то или иное соединение. Используя в качестве наполнителя металлы подгруппы железа, можно ожидать существенного изменения электрофизических и электромагнитных характеристик и, в частности, волнового сопротивления. Кроме того, благодаря наличию в таких материалах магнитной фазы возможно создание упорядоченных структур, что в свою очередь приведет к анизотропным электрофизическим свойствам, управлять которыми возможно посредством магнитного поля.

Ранее в [1, 2] показано существенное уменьшение эффективной магнитной проницаемости частицы при достижении нанометрового размера, за счет перераспределения вкладов поверхностных и объемных фракций частицы. Для определения эффективной проницаемости частиц с поверхностным слоем используется квазистатическая модель. Данная модель основана на решении задачи расчета потенциалов и результирующих магнитных полей для двухслойного сферического включения, находящегося в бесконечной среде.

В работе решена задача о двухслойном цилиндре находящимся в постоянном магнитном поле. Получены выражения позволяющие вычислить потенциалы и результирующие поля. На основе сравнения потенциалов для однослойного и двухслойного цилиндров получено выражение позволяющее рассчитать эффективную проницаемость магнитной частицы инкапсулированной в МУНТ.

Проведено моделирование эффективной магнитной проницаемости в зависимости от количества слоев и радиуса МУНТ. Показано существенное уменьшение эффективной магнитной проницаемости, как от радиуса, так и количества слоев МУНТ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00686, <https://rscf.ru/project/23-29-00686/>.

Библиографические ссылки

1. Suslyayev V. et. al. / Int. J. Nanotechnology 2015. Vol. 12. P. 192.
2. Коровин Е.Ю. / Дис. к.ф.-м. н.// Томский государственный университет. Томск, 2009

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ КОБАЛЬТА

Сусляев В.И., Павлова А.А., Качалов А.С. Коровин Е.Ю.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая механическая прочность, высокая тепло- и электропроводность, химическая стойкость, а также за счет их относительной дешевизны, относятся к числу наиболее перспективных наполнителей для получения полимерных композитных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами [1]. Введение МУНТ в полимеры позволяет существенно улучшить их механические свойства. При этом электропроводность таких полимерных композитов на несколько порядков выше исходных полимеров, что широко используется для получения изделий с антистатическими свойствами. Введение МУНТ в полимерную матрицу повышает теплопроводность, термостойкость и огнестойкость ряда полимеров [2].

Активно изучаются электромагнитные характеристики композиционных материалов на основе углеродных нанотрубок в различных диапазонах частот. В обзоре [3] приведены величины электромагнитных характеристик композиционных материалов на основе углеродных наноструктур полученных различными методами. Следует отметить, что в рассмотренных работах в качестве связующего используются 19 различных полимерных матриц, а концентрация активной фазы варьируется от 0,007 вес.% до 30 вес.%.

Благодаря наличию полости, т.е. особенностям строения многостенные углеродные нанотрубки могут выступать в качестве капсулы, наполнителем которой будет являться то или иное соединение. Используя в качестве наполнителя металлы подгруппы железа, можно ожидать существенного изменения электрофизических и электромагнитных характеристик и, в частности, волнового сопротивления.

В работе проведено исследование композиционных материалов на основе МУНТ инкапсулированным частицами кобальта. Исследованы частотные зависимости комплексных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей. Проведен расчет коэффициентов отражения, прохождения и поглощения при расположении материала в свободном пространстве и на металлической поверхности.

Показано, что в свободном пространстве влияние введенных частиц Со выражается в лучшем согласовании волнового сопротивления материала со свободным пространством. Для случая расположения материала на проводящей поверхности минимальное отражение составляет – 23 дБ на 17,6 ГГц при толщине 1,5 мм, а максимальная ширина полосы отражения по уровню – 10 дБ составляет 6,5 ГГц при толщине образца 2 мм.

Из полученных результатов следует, что варьируя соотношения компонентов Со:МУНТ позволяет получать композитные материалы для различных приложений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00686, <https://rscf.ru/project/23-29-00686/>.

Библиографические ссылки

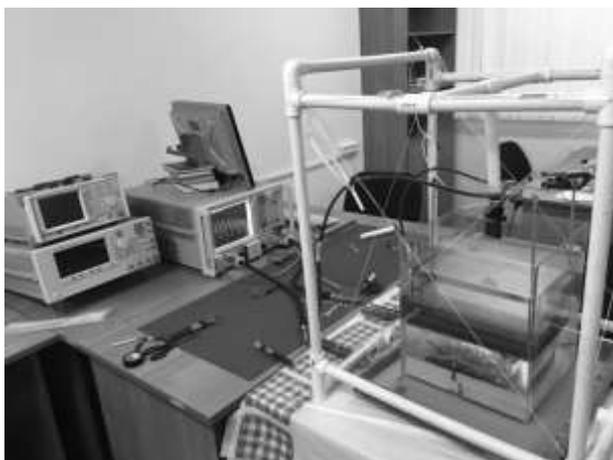
1. Mazov I.N. et. al. / Nanoscience and Nanotechnology Letters. 2011. V. 3. N 1. P. 18 – 23.
2. Tarlton T. et. al. Journal of Applied Physics. 2017. V. 121. N 8. P. 085103.
3. Qin F. et. al. / Journal of Applied Physics. 2012. V. 111. P. 061301.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЛАБО ПОГЛОЩАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

АТУТОВ Е.Б.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск,
Россия*

Развитие современной контрольно-измерительной техники и вычислительных технологий обуславливает новые возможности для разработки эффективных, быстродействующих, безопасных сенсоров и датчиков определения комплексной диэлектрической проницаемости. В работе представлена экспериментальная установка, собранная для определения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) исследуемой жидкости. Рупорные антенны излучают и принимают линейно поляризованную электромагнитную волну по нормали к поверхности жидкости, а положение металлической пластины (21см x 29см) обеспечивается за счет поворота направляющих штырей. Поворот направляющих на угол 45° при шаге резьбы 1,5 мм будет соответствовать поднятию или опусканию пластины на $\frac{1,5\text{мм}}{8} = 0,1875\text{мм}$.



В качестве тестовой жидкости со слабым поглощением было выбрано пищевое подсолнечное рафинированное дезодорированное растительное масло «Алтай» (ГОСТ 1129-2013).

Для индикации и генерации сигнала использовался векторный анализатор цепей PNA-X N5247A фирмы Agilent Technologies. Связь с рупорными антеннами (поперечные размеры 17мм×17мм, длина 46 мм) осуществлялась посредством высокочастотных кабельных сборок и волноводно-коаксиальных переходов ПКВ1А-14 сечением 7,2мм×3,4 мм производства АО «НПФ «Микран» [1].

Антенны располагались на расстоянии 8,5 см от поверхности жидкости, находящейся в стеклянном резервуаре размером 50см×50см×50 см.

Преимущество разработанного способа заключается в том, что при измерениях антенно-фидерные устройства не соприкасаются с тестируемой средой и не могут быть выведены из строя вследствие каких-либо химических реакций.

Библиографические ссылки

1. https://www.micran.ru/productions/IIS/accessory/KW_connectors/kw_connectors.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

АТУТОВ Е.Б.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

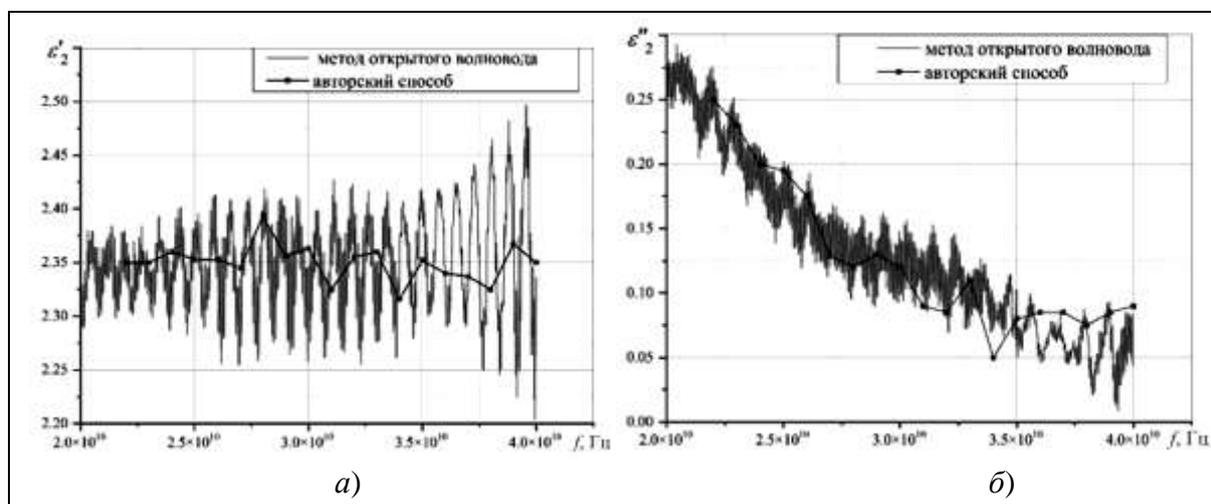
Процедура поиска вещественной ε'_2 и мнимой ε''_2 частей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) заключается в следующем. Вещественную часть КДП исследуемой жидкости ε'_2 определяем по выражению:

$$\varepsilon'_2 = \left[-\frac{c}{2f(d_{\min 1} - d_{\min 2})} \right]^2$$
, где c – скорость света; f – частота облучающего поля; $d_{\min 1}$ и $d_{\min 2}$ – толщины слоев, при которых наблюдаются рядом стоящие минимумы.

Мнимую часть КДП исследуемой среды ε''_2 находим путем подбора до максимального совпадения положения самого глубокого минимума измеренной интерференционной зависимости с рассчитанным по формуле [1]:

$$V^2 = \left[\frac{V_{12} + V_{23} \exp(-2ik_2d)}{1 + V_{12}V_{23} \exp(-2ik_2d)} \right]^2$$
, где $V_{12} = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}$, $V_{23} = \frac{k_2 - k_3}{k_2 + k_3}$; $k_1 = \frac{\omega}{c}$, $k_2 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon'_2 - i\varepsilon''_2}$, $k_3 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_3}$; $\omega = 2\pi f$; ε_3 – КДП металлической пластины, определяемая по формуле Друде; d – толщина зондируемого слоя; i – мнимая единица.

На рисунке представлены значения вещественной ε'_2 и мнимой ε''_2 частей КДП тестируемой жидкости, полученные согласно приведенной процедуре поиска.



Из рисунка видно, что усредненные значения, полученные интерференционным способом и используемым методом открытого волновода [2] совпадают.

Библиографические ссылки

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1973. 344 с.
2. <https://www.keysight.com/ru/ru/product/85070E/dielectric-probe-kit.html>

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНИМОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА

Гармаев Б.З.

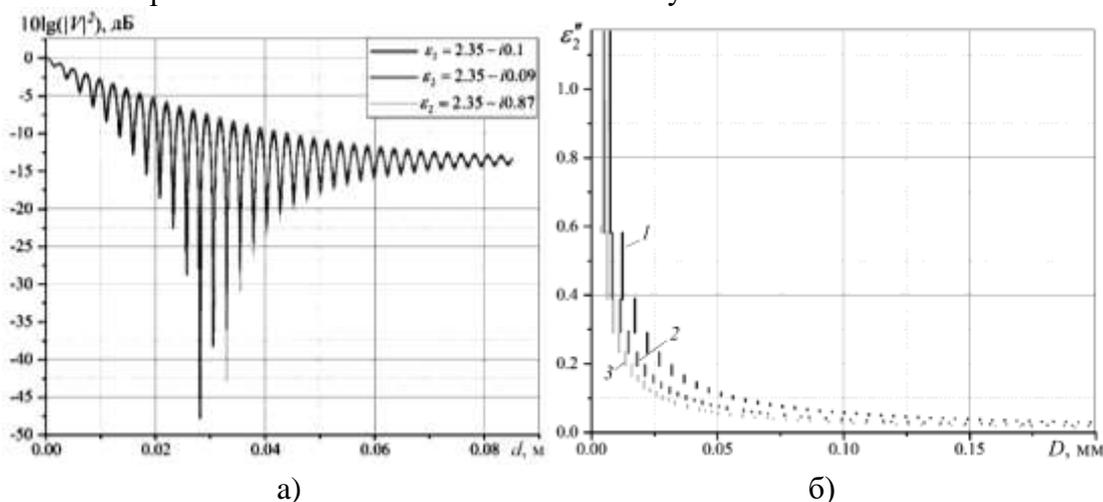
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

При интерференционном методе определения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) есть особенность определения ее мнимой части, связанная с областью применения этого метода. Метод используется для слабо поглощающих жидкостей с малой величиной мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости. Мнимую часть КДП исследуемой среды ε_2'' находим путем подбора до максимального совпадения положения самого глубокого минимума измеренной интерференционной зависимости с рассчитанным по формуле [1]:

$$V^2 = \left[\frac{V_{12} + V_{23} \exp(-2ik_2d)}{1 + V_{12}V_{23} \exp(-2ik_2d)} \right]^2, \text{ где } V_{12} = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}, V_{23} = \frac{k_2 - k_3}{k_2 + k_3}; k_1 = \frac{\omega}{c}, k_2 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_2' - i\varepsilon_2''}, k_3 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_3}$$

; $\omega = 2\pi f$; ε_3 – КДП металлической пластины, определяемая по формуле Друде; d – толщина зондируемого слоя; i – мнимая единица.

Представленные на рисунке а) зависимости коэффициента отражения от толщины слоя иллюстрируют отражательную способность слоя. Видно, что самый глубокий минимум наблюдается для $\varepsilon_2'' = 0,1$ при $d = 0,028125$ м, для $\varepsilon_2'' = 0,09$ при $d = 0,0305625$ м и для $\varepsilon_2'' = 0,87$ при $d = 0,033$ м. Положение минимумов в интерференционной картине не зависит от значения мнимой части КДП (в этом случае меняется только значения интенсивности поля). Положение самого глубокого минимума меняется дискретным образом. Для определения значения ε_2'' применим численные методы, так как строгий анализ формулы из [1] не представляется возможным. Полученные в результате расчета зависимости положения глубокого минимума D от значений мнимой части КДП представлены на рисунке б), где 1 – это ε_2'' при 20 ГГц; 2 – 30 Гц; 3 – 40 ГГц. Видно, что положение самого глубокого минимума меняется только в определенном диапазоне значений мнимой части КДП, а величина этого диапазона уменьшается с увеличением положения и практически не зависит от частоты излучения.



Библиографические ссылки

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1973. 344 с.

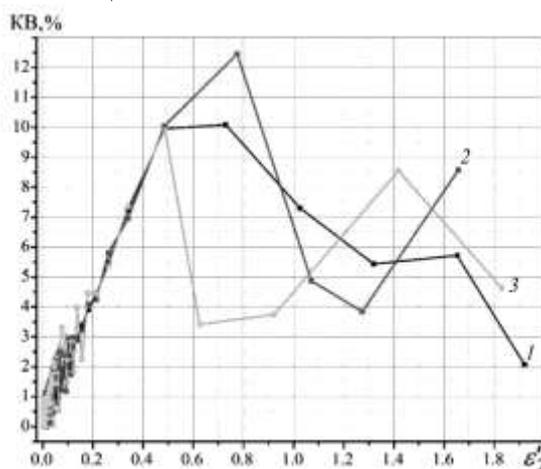
ПОГРЕШНОСТЬ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНИМОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Гармаев Б.З.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

При интерференционном методе определения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) есть особенность определения ее мнимой части (ε_2''). Для определения ее значений применяются численные методы [1]. Полученные в результате расчета значения мнимой части КДП меняются только в определенном диапазоне значений, а величина этого диапазона уменьшается с увеличением положения и практически не зависит от частоты излучения.

В работе выполним оценку методической ошибки предлагаемого способа определения КДП, для этого рассчитаем ее коэффициенты вариации (КВ) для разных значений ε_2'' . Считаем, что значение ε_2'' равновероятно во всей полосе значений. Следовательно, коэффициент вариации можно рассчитать, как отношение разницы верхней и нижней границы диапазона ε_2'' к ее среднему значению. График зависимости коэффициента вариации от мнимой части ε_2'' приведен на рисунке, где линия 1 – это КВ при 20 ГГц; 2 - 30 Гц; 3 - 40 ГГц.



Видно, что вариацию найденных значений ε_2'' можно условно разделить на две области: 1) $0 < \varepsilon_2'' < 0,47$ – область линейного возрастания; 2) $\varepsilon_2'' > 0,47$ – область, где зависимость от частоты излучения.

В начале первой области с увеличением частоты наблюдаются изменения коэффициента вариации, но, в целом, его значения не превышает 5%. Во второй области ($\varepsilon_2'' > 0,47$) значительный разброс коэффициента вариации и зависимость от частоты указывают на верхний предел применимости предлагаемого способа. Это можно объяснить тем, что метод использует формулу для случая идеального диэлектрика без потерь, а вторая область не соответствует случаю слабого поглощения: $\varepsilon_2' / \varepsilon_2'' \leq 5$. Проведенный анализ методической погрешности интерференционного метода определения мнимой части КДП жидкости со слабым поглощением показывает границы применимости метода.

Библиографические ссылки

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1973. 344 с.