

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ
PHYSICAL CHEMISTRY

УДК 541.64:539.2:546.264-31:547.76
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-3-183-195>

Поступила в редакцию 14.03.2025
Received 14.03.2025

**Ж. В. Игнатович¹, Л. Н. Филиппович^{1, 2}, Д. А. Данилова⁴,
С. Н. Лемешонок¹, А. В. Петкевич¹, С. Н. Шахаб^{1, 2, 3}, А. А. Рогачев¹**

¹Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

³Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

⁴Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь

**КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ПОЛИАНИЛИНА**

Аннотация. Проведено квантово-химическое моделирование молекулы проводящего полимера полианилина (ПАНИ), разработаны и оптимизированы методы синтеза ПАНИ по реакции окислительной полимеризации с последующим комплексным исследованием морфологии, физико-химических свойств. Сформированы полимерно-композиционные материалы, состоящие из ПАНИ и углеродных материалов в матрице полилактида (PLA), которые по данным циклических вольт-амперных характеристик (ВАХ) и импедансной спектроскопии обладают проводимостью от 0,10 до 25 См/см, что делает их перспективными для применения в различных сенсорных устройствах в микро- и нанoeлектронике, биомедицине, а также создания антикоррозионных и антистатических покрытий.

Ключевые слова: квантово-химическое моделирование, электропроводящие материалы, полианилин, технический углерод, полилактид

Для цитирования. Квантово-химическое моделирование, синтез и свойства электропроводящих материалов на основе полианилина / Ж. В. Игнатович, Л. Н. Филиппович, Д. А. Данилова [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2025. – Т. 61, № 3. – С. 183–195. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-3-183-195>

**Zh. V. Ihnatovich, L. N. Filippovich, D. A. Danilova, S. N. Lemeshonok, A. V. Petkevich,
S. N. Shahab, A. A. Rogachev**

¹Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Institute of Physical-Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Belarus

⁴Scientific and Practical Center of the State Committee for Forensic Examinations of the Republic of Belarus

**QUANTUM-CHEMICAL MODELING, SYNTHESIS AND PROPERTIES
OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE MATERIALS BASED ON POLYANILINE**

Abstract. Quantum-chemical modeling of the polyaniline (PANI) molecule was performed. Methods for synthesizing PANI via oxidative polymerization were developed, and the morphology and physicochemical properties were comprehensively studied and optimized. Polymer-composite materials consisting of PANI and carbon-based materials within a PLA matrix were formed. According to cyclic voltammetry and impedance spectroscopy, these composites exhibit conductivities ranging from 0.10 to 25 S/cm, making them promising for use in various sensor devices in micro- and nanoelectronics, biomedicine, as well as in the development of anti-corrosion and antistatic coatings.

Key words: quantum chemical modeling, conductive materials, polyaniline, carbon black, polylactide

For citation. Ihnatovich Zh. V., Filippovich L. N., Danilova D. A., Lemeshonok S. N., Petkevich A. V., Shahab S. N., Rogachev A. A. Quantum-chemical modeling, synthesis and properties of electrically conductive materials based on polyaniline. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2025, vol. 61, no. 3, pp. 183–195 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-3-183-195>

Введение. Известно, что проводящие полимеры (ПП) могут находиться в разных состояниях окисления и также, как неорганические полупроводники, дают закономерный отклик на внешнее воздействие, что позволяет их относить к «умным материалам». Под действием электрического потенциала или химических агентов полимеры могут обратимо окисляться – восстанавливаться, меняя в широких пределах уровень электропроводности и ряда свойств, включая спектральные характеристики (цветность), диэлектрическую и магнитную проницаемость, плотность. Кроме того, ПП не токсичны, устойчивы в агрессивных химических средах, имеют высокую термическую стабильность и относительно низкую себестоимость. Важно отметить, что свойства ПП полианилина (ПАНИ) зависят от многих факторов: условий получения (химический или электрохимический синтез), концентрации исходных реагентов, температуры реакции окислительной полимеризации, толщины получаемого пленочного материала и др. В зависимости от метода получения электропроводность ПП может меняться в очень широком диапазоне: от 10^{-10} до 100 См/м. ПАНИ является широко изучаемым ПП благодаря высокой проводимости, удачному сочетанию физико-химических, электрохимических и оптических характеристик, которые делают его перспективным для использования в химических и биологических сенсорах, в качестве электродных материалов в аккумуляторах и конденсаторах, электрохромных устройствах, материалах для антикоррозионной защиты, «искусственных мускулов» и т. д. [1–3]. Следует отметить, что ПАНИ обладает неудовлетворительными механическими характеристиками (малая прочность, высокая хрупкость) и не способен образовывать механически стабильные пленки. Наиболее перспективным способом решения этой проблемы и получения новых материалов является разработка различных композитов, включающих ПАНИ в качестве одного из компонентов.

Углеродные материалы (УМ) – углеродные нанотрубки (УНТ), графен, технический углерод обладают уникальным набором характеристик и находят широкое применение при разработке новых функциональных материалов с улучшенными эксплуатационными параметрами [4, 5]. Существенным недостатком УМ является невозможность их равномерно диспергировать по объему образца, суспензии не обладают стабильностью. Одним из наиболее распространенных способов получения композиционных материалов ПАНИ/УМ является окислительная полимеризация анилина *in situ* в присутствии УМ [6]. Основным достоинством данного метода считается возможность варьирования параметров реакции для получения продукта с заданными свойствами, простота синтеза и возможность его масштабирования. При механическом смешении ПАНИ и УМ в твердой или жидкой фазе не обеспечивается равномерность распределения компонентов в объеме композита из-за их склонности к образованию агрегатов.

Синтетические биополимеры, синтезированные из мономеров биологического происхождения (молочной кислоты), весьма перспективны благодаря своей биосовместимости, механическим и технологическим характеристикам, близким к широко распространенным синтетическим термопластам. Механически устойчивую и эластичную подложку на основе PLA, ПП и УМ можно рассматривать как удобную систему для практического применения полезных характеристик композита, включающих электропроводящие, газоразделительные, ионообменные и другие свойства.

Цель исследования – провести квантово-химическое моделирование ПАНИ, разработать воспроизводимые методы его синтеза, сформировать электропроводящие полимерные материалы (ЭПМ), исследовать их структурный, фазовый состав и электрофизические свойства.

Объекты и методы исследования. Для расчета стартовой геометрии молекул выбран метод молекулярной механики MMFF94 программного пакета ChemBioOffice 2020. Выбор метода MMFF94 обоснован тем, что он разработан для органических молекул, учитывает потенциальные поля, формируемые всеми атомами рассчитываемой системы, и позволяет гибко модифицировать параметры расчета в зависимости от конкретной задачи [7, 8]. Стартовую геометрию молекул дополнительно оптимизировали в среде растворителя (вода) полиэмпирическим методом PM7 программного пакета Gaussian 16 до достижения глобального минимума полной энергии изучаемых систем. Для определения глобального энергетического минимума и наиболее устойчивых конформеров находили и анализировали все стационарные точки на поверхности потенциальной энергии молекулы. Методом PM7 находили оптимизированные геометрические

конфигурации [9], общую энергию молекул [10], электронные свойства и энтальпию образования вещества [11]. Для визуализации результатов использовали программы Gauss View 06 и ChemCraft 1.7.

Определение структурных параметров композитов проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе JCM-6000PLUS Neoscope с ЭДС детектором (JEOL, Япония), оптического люминесцентного микроскопа Планар Микро МБ (Беларусь). Запись УФ-спектров проводилась с использованием спектрофлуориметра SOLAR (СМ2203, Беларусь) в диапазоне от 200 до 800 нм. ИК-спектры записывали в диапазоне 4 000–400 см⁻¹ на ИК-Фурье спектрометре Tensor-27 (Bruker, Германия) на просвет образцов, полученных путем их прессования в таблетку с KBr. Жидкостная хроматомасс-спектрометрия проводилась на хроматомасс-спектрометре в составе ВЭЖХ Agilent 1200 RRLC и масс-детектора Agilent 6410 Triple Quad LC/МС. Проводимость пленок и прессованных таблеток определялась в ячейке в режиме циклической непрерывной развертки в диапазоне ±1В на потенциогальваностате Р45-Х (Electrochemical Instruments, РФ). Кривые вольт-амперных характеристик (ВАХ) записывали в режиме циклической развертки в диапазоне потенциала ±1В с помощью потенциостата-гальваностата Р45-Х. Пленку помещали между двумя электродами, ток протекал перпендикулярно плоскости пленки. Расчет удельной объемной проводимости σ вели по формуле:

$$\sigma = 1 / (R \cdot l), \quad (1)$$

где σ – удельная проводимость образца, См/м; l – расстояние между электродами, равное толщине пленки, м; R – объемное сопротивление образца, Ом. Полная удельная проводимость образцов рассчитывалась также по данным импедансной спектроскопии в диапазоне частот 100–10⁶ Гц.

Покрытия осаждали из активной газовой фазы, образованной электронно-лучевым диспергированием исходного ПАНИ под действием потока низкоэнергетических электронов, ускоряемых напряжением до 2,5 кВ и плотностью 0,01–0,03 А/см². Начальное давление остаточных газов в вакуумной камере составляло порядка 4 мПа. В качестве подложек использовали пластины монокристалла кремния, их температура в процессе нанесения не изменялась и соответствовала комнатной. Толщину покрытий измеряли непосредственно в процессе нанесения с помощью кварцевого измерителя толщины (КИТ) и она не превышала 300 нм. Для нанесения покрытий использовали порошки олигомерного ПАНИ со временем синтеза 4 ч. Кроме того, тонкопленочные материалы на основе ПАНИ различного состава получали из раствора компонентов в хлороформе (PLA в концентрации 60 мг/мл, массовое соотношение ПАНИ (или ПП) и PLA варьировали в диапазоне 0,1–0,4) либо из 9–10%-го раствора поливинилового спирта (ПВС) (150 кДа, Mowiol 28-99, Германия), содержащего (мас.%) глицерин (2,8–3,0), диметилформамид (ДМФА) (4,0–4,5), Н₃ВО₃ (0,05–0,10), композит (олигомерный ПАНИ + наночастицы WO₃ или V₂O₅ (0,6), щавелевую кислоту (2,0) и воду (до 100 %), который нагревали на водяной бане до температуры 85–90 °С для полного растворения ПВС в воде. Пленки формировали методом полива на стеклянные подложки. Образцы сушили в течение 60 мин при комнатной температуре. Толщина пленок составила 30–80 мкм.

Методика получения полианилина. К 100 мл 0,2 М раствора соляной кислоты прибавили 0,1 мл додецилбензолсульфокислоты (ДБСК), 1,0 мл (0,01 моль, 1 экв.) анилина и перемешивали на магнитной мешалке при комнатной температуре в течение 30 мин. Затем охладили реакционную смесь до 0–5 °С, прибавили 2,85 г (0,013 моль, 1,25 экв.) персульфата аммония ((NH₄)₂S₂O₈) в 50 мл 1 н раствора HCl, в случае получения композита ПАНИ/поливинилпирролидона (ПВП40) прибавили 0,2 г ПВП40 и перемешивали при охлаждении 1 ч, убрали охлаждение и продолжили перемешивать при комнатной температуре в течение 12 ч, в случае получения олигомерного ПАНИ – в течение 2 ч. Далее осадок ПАНИ отделяли центрифугированием, промывали дистиллированной водой и 0,5 М водно-этанольным раствором HCl. Получили 0,9–0,95 г темно-зеленого осадка целевого полимера с выходом 90–95 %.

Получение композитов полианилина с оксидами вольфрама и ванадия. Метод А. 0,96 мл (0,009 моль) анилина растворили в 10 мл хлороформа, прибавляли по каплям раствор 2,3 г

(0,01 моль) $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ в 100 мл 1 М HCl при перемешивании на магнитной мешалке в течение 3 ч. Затем в реакционную смесь ввели 0,15 г (15 мас.%) наночастиц WO_3 или V_2O_5 . Отделили органическую фазу (продукт реакции находился преимущественно в водной фазе). Осадок композита из водной фазы отделяли центрифугированием с последующей промывкой дистиллированной водой и 0,25 М водно-этанольным раствором HCl. Выход целевого продукта составил 72,8 %.

Метод В. 0,96 мл (0,009 моль) анилина растворили в 10 мл хлороформа, затем по каплям прибавляли раствор 2,3 г (0,01 моль) $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ в 100 мл 1 М HCl при перемешивании на магнитной мешалке в течение 2 ч. Затем в реакционную смесь ввели 0,15 г (15 мас.%) наночастиц WO_3 или V_2O_5 и перемешивали еще 1 ч. На делительной воронке отделяли органическую фазу (продукт реакции находился преимущественно в водной фазе). Осадок композита из водной фазы отделяли центрифугированием с последующей промывкой дистиллированной водой и 0,25 М водно-этанольным раствором HCl. Выход целевого продукта составил 70,5 %.

Методика получения композита ПАНИ/УМ. 20,0 мл концентрированной HCl растворили в 1,5 л воды, прибавили 1,5 мл (0,0045 моль) ДБСК, затем 35 г (0,27 моль) анилина гидрохлорида и 35 г технического углерода марки С140. Полученную смесь перемешивали на магнитной мешалке при комнатной температуре в течение 30 мин. Затем к ней прибавили 85,5 г (0,375 моль, 1,25 экв.) персульфата аммония, растворенного в 1,5 л раствора HCl (1 н) и продолжили перемешивать в течение 16 ч при комнатной температуре. Далее темно-зеленый осадок композита ПАНИ/УМ отделяли центрифугированием, промывали дистиллированной водой и 0,5 М водно-этанольным раствором HCl. Выход целевого продукта составил 92,8 %.

Результаты и их обсуждение. Расчеты показали, что у молекулы ПАНИ (рис. 1) ширина запрещенной зоны составила $E_g = -6,154 + 9,066 = 2,912$ эВ. Общая энергия равна $-137,8$ ккал/моль.

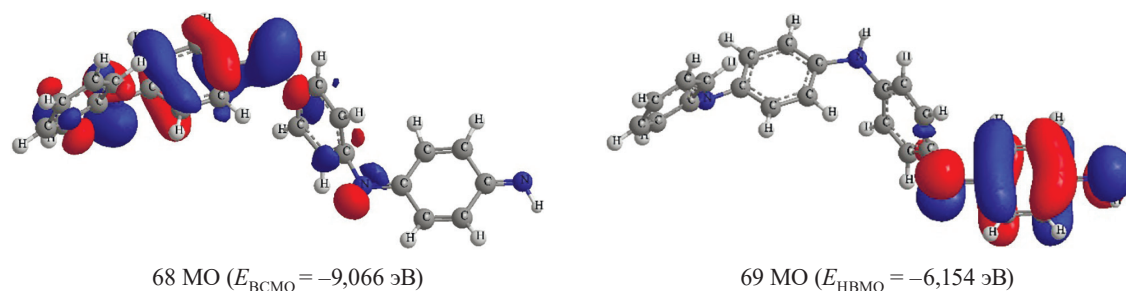


Рис. 1. Структурная формула ПАНИ

Fig. 1. Structural formula of PANI

Первая интенсивная полоса поглощения с максимумом при 234,68 нм (рис. 2, а) относится к переходу в возбужденное синглетное состояние молекулы ($S_0 \rightarrow S_3$). Расчеты показали, что данное возбужденное состояние описывается волновой функцией, отвечающей наложению трех функций: $(80 \rightarrow 85)$, $(83 \rightarrow 84)$ и $(83 \rightarrow 85)$. Возбуждение электрона с верхней свободной молекулярной орбитали 83 (ВСМО) на нижнюю вакантную молекулярную орбиталь 84 (НВМО) оказало основное воздействие на полосу поглощения при 234,68 нм (табл. 1, рис. 2). В УФ-спектре поглощения экспериментального образца ПАНИ также имелась интенсивная полоса поглощения с максимумом при 300 нм (рис. 2, б).

Таблица 1. Электронная структура ПАНИ в воде, рассчитанная методом CAM-B3LYP/6-31+G* относительно основных пиков

Table 1. Electronic structure of PANI in water calculated by CAM-B3LYP/6-31+G* method relative to the main peaks

Состояние	Длина волны (нм)	Разложение волновых функций по однократно возбужденной конфигурации	Сила осциллятора (f)
$S_0 \rightarrow S_3$	234,68	80 $\rightarrow$ 85 (0,11 514) 83 $\rightarrow$ 84 (0,39 255) 83 $\rightarrow$ 85 (0,55 637)	0,0809

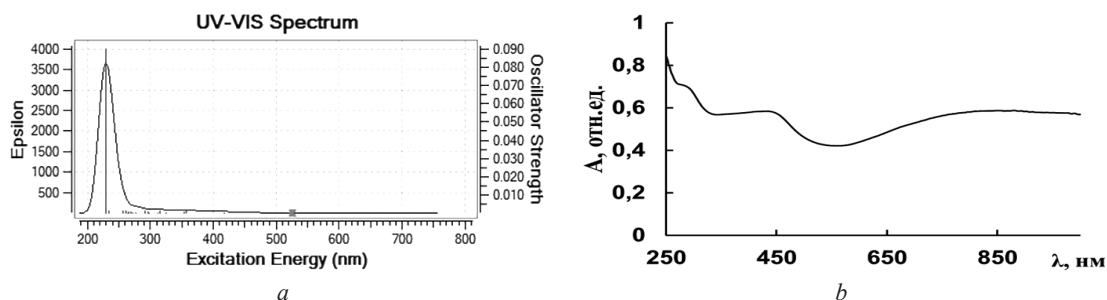


Рис. 2. Рассчитанные в среде растворителя (вода) УФ-спектр поглощения ПАНИ (а),
УФ-спектр поглощения экспериментального образца ПАНИ (b)

Fig. 2. UV absorption spectrum of PANI calculated in a solvent environment (water) (a),
UV absorption spectrum of the experimental sample of PANI (b)

В результате варьирования соотношения реагентов (окислитель : мономер), выбора кислоты – допанта (HCl , H_2SO_4 , HOOC-COOH , ДБСК), pH реакционной смеси, продолжительности реакции нами отработана воспроизводимая методика синтеза ПАНИ (в том числе олигомерного) с электропроводностью (в прессованной таблетке) $1,45\text{--}5,30 \cdot 10^{-2}$ См/м.

Проведение матричной полимеризации анилина в присутствии HCl (рис. 3, а, b) привело к образованию сферических агрегированных частиц с гидродинамическим диаметром от 2,1 до 5,2 мкм. Средний размер агрегатов частиц ПАНИ, определенный с использованием оптического люминесцентного микроскопа Планар Микро МБ (Беларусь), составлял 20–25 мкм. Удельная электропроводность ПАНИ, измеренная в прессованной таблетке, составила $1,46\text{--}1,49 \cdot 10^{-2}$ См/м. Дополнительное допирование полианилиновой цепи функционализированными агентами, например ДБСК (рис. 3, c), способствовало улучшению растворимости ПАНИ в большинстве растворителей (вода, ацетон, спирты, ксилол, хлороформ, толуол) и привело к образованию ПАНИ с более высокой проводимостью $5,12\text{--}5,3 \cdot 10^{-2}$ См/м и хорошим выходом до 95 %, а также

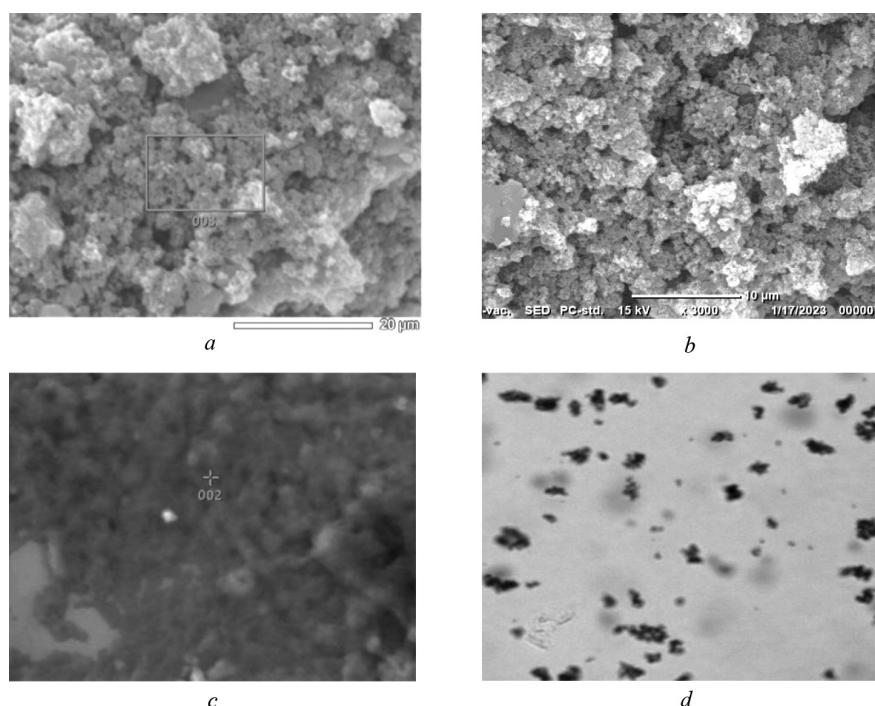


Рис. 3. СЭМ-изображения: олигомерный ПАНИ (а), ПАНИ (b, кислота допант HCl),
ПАНИ (c, допан ДБСК/ HCl), ПАНИ/ПВП40 (d)

Fig. 3. SEM images: oligomeric PANI (a), PANI (b, acid dopant HCl), PANI (c, dopant DBSA/ HCl), PANI/PVP40 (d)

изменило его морфологию от глобул до нановолокон со средней длиной 14,5–20,5 мкм. Проведение матричной полимеризации анилина в присутствии ПВП40 г/моль препятствовало агрегированию частиц ПАНИ и приводило к образованию агрегатов частиц ПАНИ со средним размером 1,0 мкм (рис. 3, *d*).

С целью получения олигомерного ПАНИ, необходимого для формирования наноразмерных покрытий методом плазмохимического напыления, время протекания реакции окислительной полимеризации уменьшили в 4 раза. При продолжительности реакции в течение 3 ч по данным жидкостной хроматомасс-спектрометрии получен олигомерный ПАНИ, состоящий из 8–12 анилиновых мономерных звеньев (рис. 4).

В УФ-спектре олигомерного ПАНИ (рис. 5, *a*) присутствовало поглощение в области 300–380 нм, которое относят к электронным π, π^* -переходам фенильных колец, связанных с амино- и имино-структурами, также наблюдался максимум поглощения в областях 800–880 нм, характерный для ПАНИ в состоянии протонированный эмеральдин. О том, что получен олигомер, можно судить по уменьшению интенсивности и сдвигу максимумов поглощения при 380 и 840 нм (рис. 6, кривая 2), при этом в УФ-спектрах композитов наблюдалось уширение и увеличение интенсивности максимума поглощения при 370 нм.

В ИК-спектре ПАНИ (рис. 5, *b*) присутствовала широкая полоса поглощения с максимумом около $3\,060\text{ см}^{-1}$, что указывает на присутствие в структуре вторичных аминных и протонированных иминных групп ($-\text{NH}^+=$). Установлены основные полосы в районе $500\text{--}1\,700\text{ см}^{-1}$ (1 627, 1 598, 1 571, 1 482, 1 302, 1 248, 1 170–1 140, 823), которые отнесены к характеристическим полосам ПАНИ; полосы при 1 571 и 1 482 см^{-1} , соответствующие колебаниям хиноидного и бензольного колец полианилинового фрагмента соответственно, а также полосы при 1 407 см^{-1} , ответ-

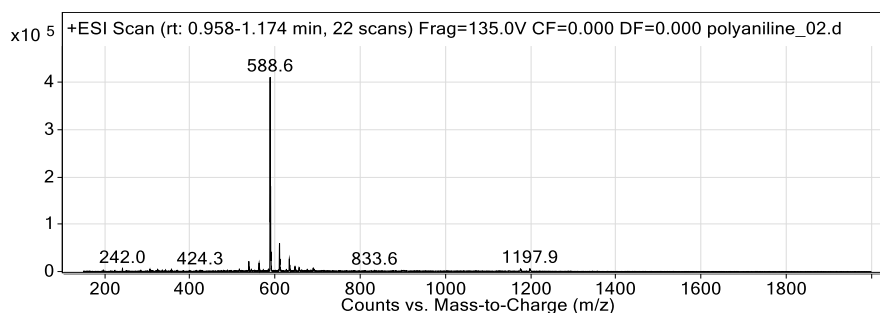


Рис. 4. Масс-спектр олигомерного ПАНИ

Fig. 4. Mass spectrum of oligomeric PANI

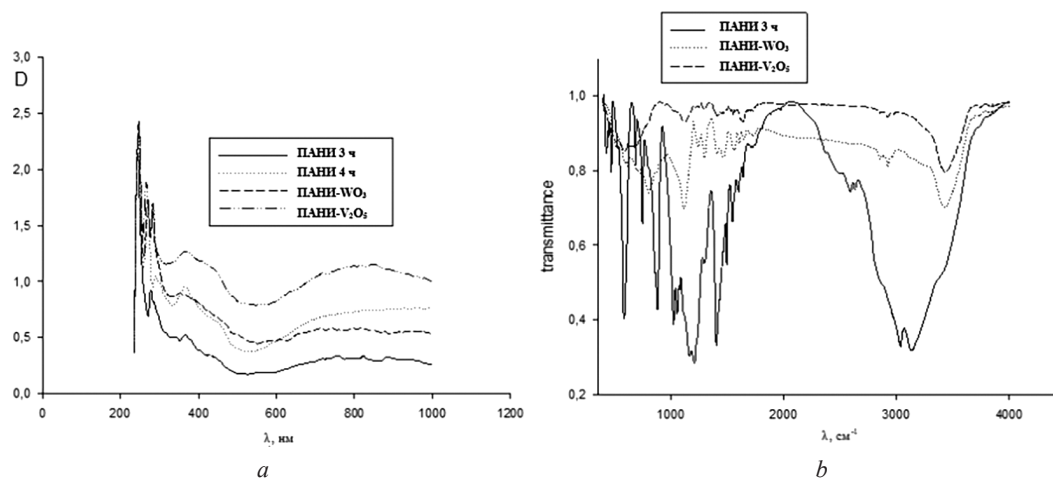


Рис. 5. Спектры поглощения (*a*) и ИК-спектры (*b*) олигомерных ПАНИ и их композитов с наночастицами WO_3 и V_2O_5

Fig. 5. Absorption spectra (*a*) and IR spectra (*b*) of oligomeric PANI and their composites with WO_3 and V_2O_5 nanoparticles

ственные за колебания связи C–N. Полосы поглощения при $2\,580\text{ см}^{-1}$ и в области частот $1\,440\text{--}1\,025\text{ см}^{-1}$ характерны для проводящих форм ПАНИ, высокой степени делокализации электронов. Для V_2O_5 характерны полосы при 840 и $1\,008\text{ см}^{-1}$ [16–18]. Уширение и уменьшение интенсивности основных полос поглощения в ИК-спектрах особенно заметны у композита ПАНИ- V_2O_5 (рис. 6, b).

На основе ПАНИ, полученного при продолжительности реакции 12 ч, не удалось получить покрытия методом плазмохимического напыления. Олигомерный ПАНИ, полученный при продолжительности реакции окислительной полимеризации в течение 3 и 4 ч, проявил способность к плазмохимическому напылению, в результате чего сформированы наноконпозиционные покрытия с толщиной $75\text{--}80\text{ нм}$ для использования в качестве защитных проводящих покрытий.

Кинетические зависимости процесса диспергирования и формирования покрытий представлены на рис. 6. Под воздействием потока электронов на порошок олигомерного ПАНИ начинался рост давления в вакуумной камере (с 3 до 24 мПа), КИТ при этом не фиксировал рост покрытия (см. рис. 6), длительность данного индукционного периода составила около 120 с.

При попытке нанесения без индукционного периода и увеличении ускоряющего напряжения сразу после включения электронной пушки наблюдались сильная зарядка полимерного порошка и выбросы его из тигля, после чего дальнейшее нанесение было невозможным. Через 120 с начиналась адсорбция диспергируемых фрагментов ПАНИ и формирования покрытия, давление в камере при этом краткосрочно возрастало, затем снижалось и после 200 с диспергирования стабилизировалось. Ускоряющее напряжение в стабильной фазе нанесения составляло до 2 кВ при снижении скорости нанесения. По завершении процесса нанесения покрытия на основе олигомерного ПАНИ в тигле наблюдались деструктурированные фракции исходного материала, образованные в результате диспергирования. Максимальная скорость нанесения составила $8,5\text{ нм/с}$.

Методом полива на стеклянную подложку на основе 9–10%-го раствора ПВС получены пленки, электропроводность которых рассчитывали из циклических вольт-амперных (ЦВА) кривых (рис. 7) по формуле 1. Значения электропроводности составили (См/м): $5,4\text{--}8,8 \cdot 10^{-5}$ (образец ПАНИ- $\text{V}_2\text{O}_5/\text{ПВС}$) и $3,2\text{--}4,1 \cdot 10^{-7}$ (образец ПАНИ- $\text{WO}_3/\text{ПВС}$).

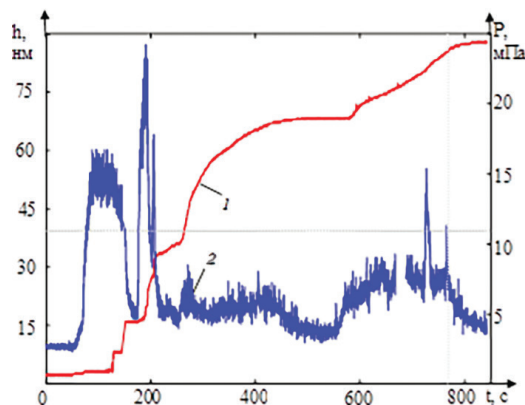


Рис. 6. График диспергирования и осаждения олигомерного ПАНИ: толщина по КИТ, h , нм – 1; давление остаточных газов в вакуумной камере, P , мПа – 2

Fig. 6. Graph of dispersion and deposition of oligomeric PANI: thickness according to KIT, h , nm – 1; residual gas pressure in the vacuum chamber, P , mPa – 2

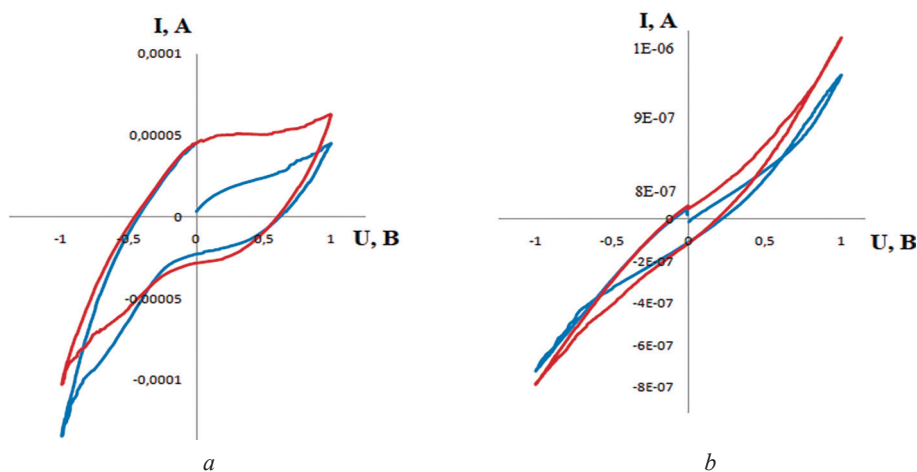


Рис. 7. ЦВА кривые пленок (по два цикла) композитов ПАНИ- V_2O_5 (a) и ПАНИ- WO_3 (b) в матрице ПВС

Fig. 7. VA curves of PANI- V_2O_5 (a) and PANI- WO_3 (b) composite films in a PVA matrix

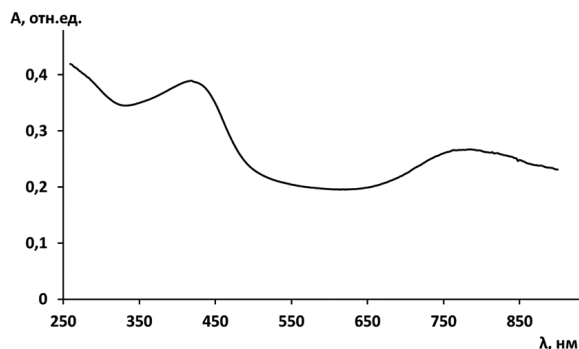


Рис. 8. УФ-вид спектра поглощения пленки PLA/ПАНИ

Fig. 8. UV-vis absorption spectrum of PLA/PANI film

На основе синтезированного ПАНИ в гибкой матрице полилактида были получены электропроводящие композиционные пленки различного состава, в том числе и на основе углеродных материалов, изучены их оптические и электрофизические свойства.

Получены композиционные пленки ПАНИ/PLA, соотношение проводящего полимера к PLA варьировали от 10 до 60 %, пленки имели насыщенно-зеленую окраску, которая усиливалась при увеличении содержания ПАНИ.

В спектре поглощения эластичной пленки на основе PLA/ПАНИ наблюдались максимумы поглощения при 416 и 780 нм (рис. 8), характерные для ПАНИ в форме эмеральдиновой соли [12].

Ширина оптической запрещенной зоны определялась по краю собственного поглощения пленок [13]. Связь между коэффициентом поглощения (α) и энергией падающего фотона ($h\nu$) можно записать следующим образом:

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^n. \quad (2)$$

Значение показателя степени n связано с электронной природой запрещенной зоны. В целом n может принимать значения $1/2$ и 2 для непрямых и прямых разрешенных переходов соответственно. Для определения энергии оптических переходов строились графики степенной зависимости α^n от энергии фотонов [14]. Ширину запрещенной зоны для прямых и непрямых переходов определяли экстраполяцией прямолинейного участка зависимости $(\alpha h\nu)^2$ и $(\alpha h\nu)^{1/2}$ от энергии фотона $h\nu$ до пересечения с осью абсцисс (рис. 9).

Ширина запрещенной зоны ПАНИ составила 2,44 и 2,32 эВ для прямого и непрямого разрешенного перехода соответственно. Полученные данные коррелируют с рассчитанным с использованием квантово-химического моделирования значением, равным 2,912 эВ.

По данным импедансной спектроскопии (рис. 10) в диапазоне частот 1–10⁶ Гц была рассчитана полная удельная проводимость пленок PLA/ПАНИ, которая изменялась в диапазоне 0,1–0,8 См/см при увеличении концентрации ПАНИ в композиционных пленках.

Исследованы сенсорные свойства пленки PLA/ПАНИ на чувствительность к аммиаку. При воздействии парами аммиака происходило изменение спектра поглощения – исчезали полосы поглощения в областях 416 и 780 нм и появлялись новые пики при 345 и 630 нм (рис. 11), что связано с депротонированием ПАНИ и образованием основания эмеральдина. Спустя 30 мин

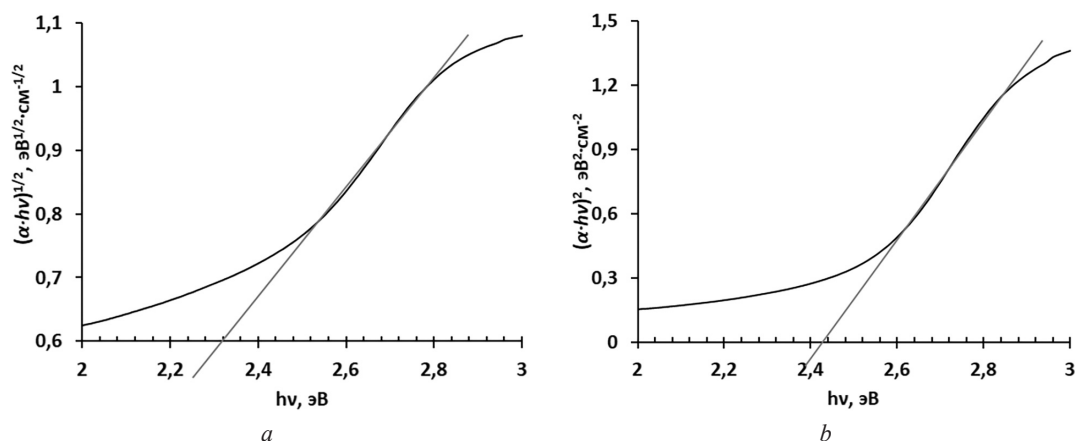


Рис. 9. Определение ширины запрещенной зоны по УФ-области спектра поглощения пленки PLA/ПАНИ

Fig. 9. Determination of the band gap width by the UV absorption spectrum of the PLA/PANI film

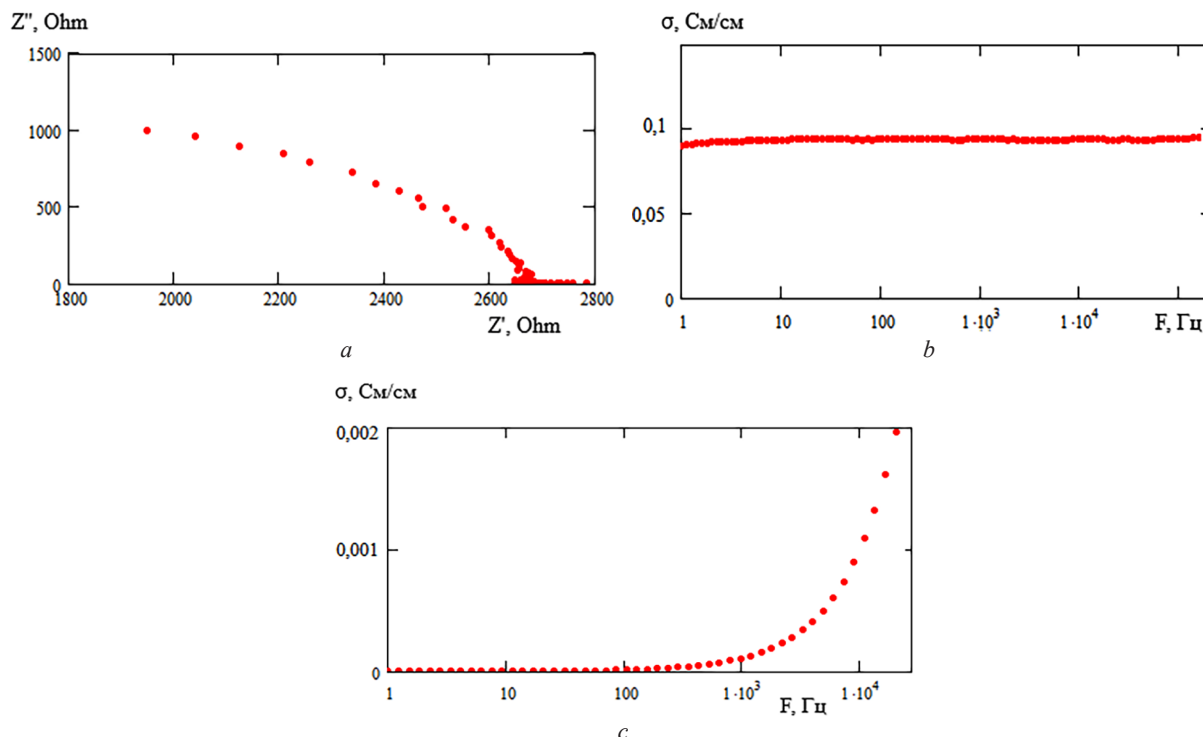


Рис. 10. Импедансная спектроскопия композиционной пленки PLA/ПАНИ: годограф (а) и зависимость удельной проводимости пленки от частоты до (b) и после (c) воздействия аммиаком

Fig. 10. Impedance spectroscopy of the PLA/PANI composite film: hodograph (a) and dependence of the film's specific conductivity on frequency before (b) and after (c) exposure to ammonia

нахождения обработанной пленки на воздухе происходило «восстановление» спектра поглощения, близкого к исходному.

Удельная проводимость пленки PLA/ПАНИ после воздействия парами аммиака составила $4 \cdot 10^{-6}$ См/см (рис. 10, c). Следовательно, депротонирование ПАНИ приводит к существенному уменьшению (в 10^6 раз) удельной проводимости композиционных пленочных материалов на его основе.

Композиционные пленки ПАНИ в матрице PLA были использованы также в качестве масс-чувствительного слоя пьезосенсора. Высокая чувствительность, избирательность таких сенсоров достигались путем использования специфических физико-химических процессов, протекающих на поверхности ПАНИ под действием различных химических веществ. Для улучшения адгезии к металлическим электродам в ПП вводили PLA. Методом капельного нанесения были сформированы тонкие пленки ПАНИ/PLA на поверхности пьезокварцевого резонатора. Осаждение проводили из разбавленного раствора полимеров в хлороформе (соотношение ПАНИ : PLA = 1 : 1,5 по массе сухого вещества). Изменение частоты колебаний пьезосенсора с нанесенным покрытием определяли на специально разработанном частотомере [20]. Схематическое изображение ячейки представлено на рис. 12, а. Датчик попеременно подвергался воздействию воздуха и фиксированного уровня концентрации NH_3 (900 ppm) при комнатной температуре.

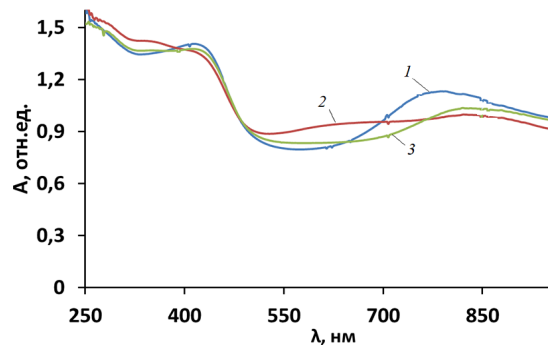


Рис. 11. Изменение спектра поглощения пленки PLA/ПАНИ до (кривая 1) и после воздействия аммиака (кривая 2), а также спустя 30 мин нахождения обработанной пленки на воздухе (кривая 3)

Fig. 11. Change in the absorption spectrum of PLA/PANI film before (curve 1) and after exposure to ammonia (curve 2), as well as after 30 minutes of exposure of the treated film to air (curve 3)

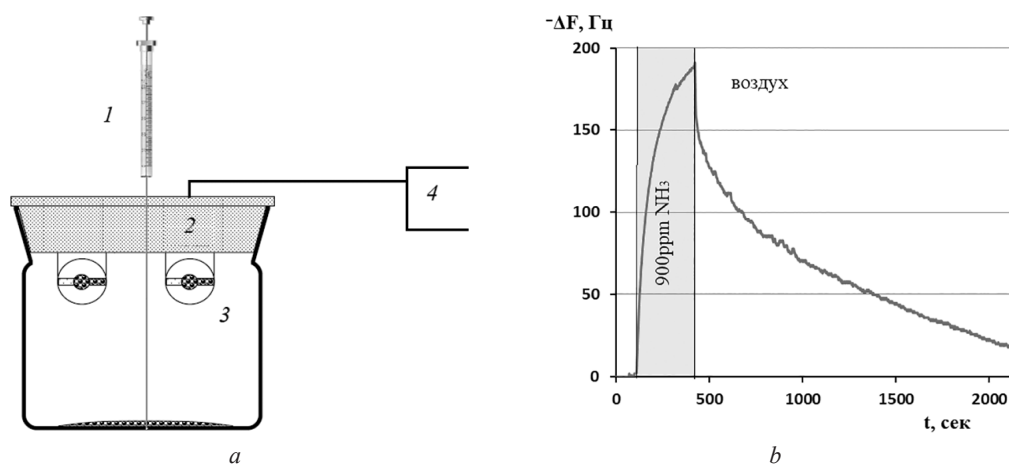
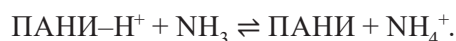


Рис. 12. Схематическое изображение ячейки масс-чувствительного сенсора:

1 – микрошприц с анализитом, 2 – герметичная крышка, 3 – рабочий и контрольный пьезокварцевый резонатор, 4 – измеритель частоты (а); кривая отклика/восстановления пьезосенсора на основе ПАНИ/PLA (b)

Fig. 12. Schematic representation of the cell of the mass-sensitive sensor: 1 – microsyringe with analyte, 2 – sealed lid, 3 – working and control piezoelectric quartz resonator, 4 – frequency meter (a); response/recovery curve of a PANI/PLA based piezoelectric sensor (b)

При введении NH_3 в измерительную ячейку наблюдалось резкое уменьшение частоты колебаний резонатора (рис. 12, а), что связано с адсорбцией паров аммиака на сенсоре. Адсорбцию/десорбцию молекул аммиака на поверхности пленки ПАНИ можно рассматривать как обратимый процесс хемосорбции:



При пропускании воздуха через ячейку происходило постепенное увеличение частоты колебания до базового уровня за счет обратного процесса протонирования ПАНИ и высвобождения молекул аммиака. Отметим, что в нашем случае такой процесс протекал не полностью, о чем свидетельствует наличие величины $-\Delta F$ порядка 20 Гц даже после выдержки без анализита в течение более 2 000 с. Таким образом, композиционные пленки ПАНИ в PLA могут быть использованы в качестве масс-чувствительного слоя пьезосенсора паров аммиака.

Окислительной полимеризацией анилина *in situ* в присутствии технического углерода C140 получены электропроводящие пленки на основе композита ПАНИ/УМ в матрице полилактида. Анализ данных сканирующей электронной микроскопии позволил установить, что полученный композит ПАНИ/УМ состоит из агрегированных сферических частиц со средним размером 1–2 мкм со структурой ядро (ТУ)/оболочка (ПАНИ), элементный состав: углерод – 94,84 %, азот – 2,33 %.

При получении тонкопленочного материала композит ПАНИ/УМ равномерно распределялся в PLA. По данным импедансной спектроскопии в диапазоне частот 1–10⁶ Гц была рассчитана полная удельная проводимость пленок, которая незначительно зависит от соотношения композит : полимерная матрица и составляет 23–29 См/см. Проводимость пленок PLA/ПАНИ-40 % и PLA/УМ-40 % равна 9 и 25 См/см соответственно. Таким образом, проводимость пленок, содержащих композит ПАНИ/УМ, определяется проводимостью УМ [21]. Однако поверхностная проводимость наблюдалась только у образцов с содержанием компонентов 30 % и более. Пленка PLA/[ПАНИ/УМ]-40 % была испытана в качестве сенсора на пары аммиака. Образец помещали в герметичный бокс и фиксировали изменение силы тока (I), протекающего по поверхности пленки, от времени при фиксированном напряжении (1 В). После введения в бокс капли раствора аммиака (10 мкл, с $(\text{NH}_3) = 100$ мг/мл) наблюдалось резкое уменьшение I . Отношение I спустя 10 мин нахождения исследуемой пленки в среде аммиака к I в начальный момент времени (I_0) составило 0,41. После открытия бокса проводимость пленки медленно возрастала и достигла первоначального значения спустя 5 ч.

Закключение. Разработана воспроизводимая методика синтеза ПАНИ с электропроводностью (в прессованной таблетке) $1,45\text{--}5,30 \cdot 10^{-2}$ См/м. Предложен метод синтеза олигомерного

ПАНИ, получены композиты олигомерного ПАНИ с 15 мас.% наночастиц V_2O_5 и WO_3 , на основе которых в полимерной матрице сформированы гибкие электропроводящие материалы с удельной электропроводностью (См/м): $3,2\text{--}4,1 \cdot 10^{-7}$ и $5,4\text{--}8,8 \cdot 10^{-5}$. Путем электронно-лучевого диспергирования сформированы нанокомпозиционные покрытия на основе олигомерного ПАНИ, синтезированного в течение 3 ч, с толщиной 75–80 нм и растворными методами пленки толщиной 60–80 мкм. Полученные композиционные покрытия и пленки имели высокие электрофизические свойства, перспективны для возможного применения в суперконденсаторах и для экранирования электромагнитных волн.

На основе ПАНИ и композита ПАНИ/УМ в PLA получены материалы с высокой электропроводностью от 0,1 до 25 См/см, которые при обработке парами аммиака изменяют свои электрофизические свойства, что делает их перспективными для производства гибких газовых сенсорных пленок, в том числе для создания «умной упаковки» продуктов питания. Показано, что композиционные пленки ПАНИ в PLA могут быть использованы в качестве масс-чувствительного слоя пьезосенсора паров аммиака.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T23Y3B-059) и Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» (задание 8.4.2.2).

Acknowledgments. The work was carried out with financial support from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project T23Y3B-059) and State Program of Scientific Research “Materials Science, New Materials and Technologies” (task 8.4.2.2).

Список использованных источников

1. Conjugated Polymers. Processing and Applications / ed. by T. A. Skotheim, J. R. Reynolds. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 656 p. <https://doi.org/10.1201/b10739>
2. Preparations, properties, and applications of polyaniline and polyaniline thin films—a review / M. Beygisangchin, S. Abdul Rashid, S. Shafie [et al.] // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, № 12. – P. 2003. <https://doi.org/10.3390/polym13122003>
3. Fabrication of polypyrrole gas sensor for detection of NH_3 using an oxidizing agent and pyrrole combinations: Studies and characterizations / A. Jain, A. N. Nabeel, S. Bhagwat [et al.] // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9, № 7. – P. 17611. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17611/>
4. Recent advances in bioactive 1D and 2D carbon nanomaterials for biomedical applications / O. Erol, I. Uyan, M. Hatip [et al.] // *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. – 2018. – Vol. 14, № 7. – P. 2433–2454. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2017.03.021/>
5. Sinha, N. Carbon nanotube-based sensors / N. Sinha, J. Ma, J. T. W. Yeow // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2006. – Vol. 6, № 3. – P. 573–590. <https://doi.org/10.1166/jnn.2006.121>
6. Synthesis of a new polyaniline/nanotube composite: “in-situ” polymerisation and charge transfer through site-selective interaction / M. Cochet, W. K. Maser, A. M. Benito [et al.] // *Chemical Communications*. – 2001. – № 16. – P. 1450–1451. <https://doi.org/10.1039/B104009J>
7. Расчет УФ-, ИК- и ЯМР-спектров молекулы диэтил 2,2'-([1,1'-бифенил]-4,4'-диилбис(азанедиил)диацетата / X. A. Алмодарресие, С. Н. Шахаб, В. М. Зеленковский [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2014. – Т. 81, № 1. – С. 42–49.
8. Электронная структура и абсорбционный спектр натрий 2-гидрокси-5-((2-метокси-4((4-сульфофенил)дiazенил)фенил)дiazенил)бензоата / X. A. Алмодарресие, С. Н. Шахаб, В. М. Зеленковский // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2014. – Т. 81, № 1. – С. 145–147.
9. Quantum Chemical Modeling of New Derivatives of (E,E)-Azomethines: Synthesis, Spectroscopic (FT-IR, UV/Vis, Polarization) and Thermophysical Investigations / S. Shahab, M. Sheikhi, L. Filippovich [et al.] // *Journal of Molecular Structure*. – 2017. – Vol. 1137. – P. 335–348. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.02.056>
10. Molecular structure and UV-Vis spectral analysis of new synthesized azo dyes for application in polarizing films / S. Shahab, F. H. Hajikolaee, L. Filippovich [et al.] // *Dyes and Pigments*. – 2016. – Vol. 129. – P. 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.02.003>
11. New derivatives of (E,E)-azomethines: Design, quantum chemical modeling, spectroscopic (FT-IR, UV/Vis, polarization) studies, synthesis and their applications: Experimental and theoretical investigations / M. Sheikhi, S. Shahab, L. Filippovich [et al.] // *Journal of Molecular Structure*. – 2017. – Vol. 1152. – P. 368–385. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.09.108/>
12. Wan, M. Absorption spectra of thin film of polyaniline / M. Wan // *Journal of polymer science: Part A. Polymer Chemistry*. – 1992. – Vol. 30. – P. 543–549. <https://doi.org/10.1002/pola.1992.080300404>
13. Charge Transport through Polyaniline Incorporated Electrically Conducting Functional Paper / K. L. Bhowmik, K. Deb, A. Bera [et al.] // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2016. – Vol. 120, № 11. – P. 5855–5860. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08650>

14. Sagar, R. Nanoarchitecture of PANI/CNT/GO hybrid nanocomposites with enhanced dielectric and gas sensing properties / R. Sagar, M. S. Gaur, A. A. Rogachev // *Polymer Bulletin*. – 2023. – Vol. 80. – P. 1773–1793. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04127-z>.
15. Композиты на основе полианилина, сополимеров полианилина с о-анизидином и анилин-2-сульфокислотой, допированные наночастицами оксида никеля / Х. А. Новик, Л. Н. Филиппович, Ж. В. Игнатович [и др.] // *Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2022): сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 28–30 июня 2022 г.* – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2022. – С. 151.
16. Корреляция между ИК-спектрами и электропроводностью композиционных материалов полиэтилен-полипиррол / О. А. Андреева, Л. А. Буркова, М. А. Смирнов, Г. К. Ельяшевич // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. – 2006. – Т. 48, № 12. – С. 2195–2199.
17. Polyaniline/Vanadium oxide composites: An effective control in morphology by varying reactant concentrations / S. Goswami, U. N. Maiti, S. Maiti [et al.] // *Materials Chemistry and Physics*. – 2013. – Vol. 138, iss. 1. – P. 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.11.063>
18. Polyaniline/V₂O₅ composites for anticorrosion and electromagnetic interference shielding / N. Maruthi, M. Faisal, N. Raghavendra [et al.] // *Materials Chemistry and Physics*. – 2021. – Vol. 259, iss. 1. – P. 124059. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124059>
19. Electrodeposition and pseudocapacitive properties of tungsten oxide/polyaniline composite / B.-X. Zou, Y. Liang, X.-X. Liu, D. Diamond [et al.] // *Journal of Power Sources*. – 2011. – Vol. 196, iss. 10. – P. 4842–4848. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.073>
20. Molecular structure, optical, electrical and sensing properties of PANI-based coatings with silver nanoparticles deposited from the active gas phase / A.A. Ragachev, M. A. Yarmolenko, J. Xiaohong [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 351. – P. 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.008>
21. Soluble self-aligned carbon nanotube/polyaniline composites / R. Sainz, A. M. Benito, M. T. Martínez [et al.] // *Advanced Materials*. – 2005. – Vol. 17, № 3. – P. 278–281. <https://doi.org/10.1002/adma.200400921>

References

1. Skotheim T. A., Reynolds J. R. (eds.). *Conjugated Polymers. Processing and Applications*. 3rd ed. Boca Raton, CRC Press, 2007. 656 p. <https://doi.org/10.1201/b10739>
2. Beygisanchin M., Abdul Rashid S., Shafie S., Sadrolhosseini A. R., Lim H. N. Preparations, properties, and applications of polyaniline and polyaniline thin films—a review. *Polymers*, 2021, vol. 13, iss. 12, pp. 2003. <https://doi.org/10.3390/polym13122003>
3. Jain A., Nabeel A. N., Bhagwat S., Kumar R., Sharma S., Kozak D., Hunjet A., Kumar A., Singh R. Fabrication of polypyrrole gas sensor for detection of NH₃ using an oxidizing agent and pyrrole combinations: Studies and characterizations. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 7, pp. 17611. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17611>
4. Erol O., Uyan I., Hatip M., Yilmaz C., Tekinay A. B., Guler M. O. Recent advances in bioactive 1D and 2D carbon nanomaterials for biomedical applications. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 2018, vol. 14, iss. 7, pp. 2433–2454. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2017.03.021>
5. Sinha N., Ma J., Yeow J. T. W. Carbon nanotube-based sensors. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2006, vol. 6, iss. 3, pp. 573–590. <https://doi.org/10.1166/jnn.2006.121>
6. Cochet M., Maser W. K., Benito A. M., Callejas M. A., Martínez M. T., Benoit J.-M., Schreiber J., Chauvet O. Synthesis of a new polyaniline/nanotube composite: “in-situ” polymerisation and charge transfer through site-selective interaction. *Chemical Communications*, 2001, vol. 16, pp. 1450–1451. <https://doi.org/10.1039/B104009J>
7. Almodarresiyeh H. A., Shahab S. N., Zelenkovsky V. M., Ariko N. G., Filippovich L. N., Agabekov V. E. Calculation of UV, IR, and NMR Spectra of Diethyl 2,2'-[(1,1'-Biphenyl)-4,4'-Diylbis(Azanediyl)]Diacetate. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2014, vol. 81, no. 1, pp. 31–36. <https://doi.org/10.1007/s10812-014-9882-0>
8. Almodarresiyeh H. A., Shahab S. N., Zelenkovsky V. M., Agabekov V. E. Electronic Structure and Absorption Spectra of Sodium 2-Hydroxy-5-({2-Methoxy-4[(4-Sulfophenyl)Diazenyl]Phenyl}Diazenyl)Benzoate. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2014, vol. 81, no. 1, pp. 161–163. <https://doi.org/10.1007/s10812-014-9903-z>
9. Shahab S., Sheikhi M., Filippovich L., Dikuser E. A., Yahyaei H. Quantum Chemical Modeling of New Derivatives of (E,E)-Azomethines: Synthesis, Spectroscopic (FT-IR, UV/Vis, Polarization) and Thermophysical Investigations. *Journal of Molecular Structure*, 2017, vol. 1137, pp. 335–348. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.02.056>
10. Shahab S., Hajikolaee F. H., Filippovich L., Darroudi M., Loiko V. A., Kumar R., Borzehandani M. Y. Molecular structure and UV–Vis spectral analysis of new synthesized azo dyes for application in polarizing films. *Dyes and Pigments*, 2016, vol. 129, pp. 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.02.003>
11. Sheikhi M., Shahab S., Filippovich L., Yahyaei H., Dikuser E., Khaleghian M. New derivatives of (E,E)-azomethines: Design, quantum chemical modeling, spectroscopic (FT-IR, UV/Vis, polarization) studies, synthesis and their applications: Experimental and theoretical investigations. *Journal of Molecular Structure*, 2017, vol. 1152, pp. 368–385. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.09.108>
12. Wan M. Absorption spectra of thin film of polyaniline. *Journal of polymer science: Part A. Polymer Chemistry*, 1992, vol. 30, pp. 543–549. <https://doi.org/10.1002/pola.1992.080300404>
13. Bhowmik K. L., Deb K., Bera A., Nath R. K., Saha B. Charge Transport through Polyaniline Incorporated Electrically Conducting Functional Paper. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, vol. 120, no. 11, pp. 5855–5860. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08650>

14. Sagar R., Gaur M. S., Rogachev A. A. Nanoarchitecture of PANI/CNT/GO hybrid nanocomposites with enhanced dielectric and gas sensing properties. *Polymer Bulletin*, 2023, vol. 80, pp. 1773–1793. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04127-z>.
15. Novik K. A. Composites based on polyaniline, copolymers of polyaniline with o-anisidine and aniline-2-sulfonic acid, doped with nickel oxide nanoparticles. *Polimernye kompozity i tribologiya (Polikomtrib-2022): sb. dokladov Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., 28-30 iyunya 2022 g.* [Polymer composites and tribology (Polycomtrib-2022): Abstracts of the International scientific and technical conference]. Gomel, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 2022, pp. 151 (in Russian).
16. Andreeva O. A., Burkova L. A., Smirnov M. A., El'yashevich G. K. Correlation between IR spectra and electrical conductivity of polyethylene-polypyrrole composites. *Polymer Science. Series B. Chemistry*, 2006, vol. 48, no. 6, pp. 331–334 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/s1560090406110066>
17. Goswami S., Maiti U. N., Maiti S., Mitra M. K., Chattopadhyay K. K. Polyaniline/Vanadium oxide composites: An effective control in morphology by varying reactant concentrations. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, vol. 138, iss. 1, pp. 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.11.063>
18. Maruthi N., Faisal M., Raghavendra N., Prasanna B. P., Nandan K. R., Yogesh Kumar K., Prasad S. B. B. Polyaniline/ V_2O_5 composites for anticorrosion and electromagnetic interference shielding. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, vol. 259, iss. 1, pp. 124059. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124059>
19. Zou B.-X., Liang Y., Liu X.-X., Diamond D., Lau K.-T. Electrodeposition and pseudocapacitive properties of tungsten oxide/polyaniline composite. *Journal of Power Sources*, 2011, vol. 196, iss. 10, pp. 4842–4848. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.073>
20. Ragachev A. A., Yarmolenko M. A., Xiaohong J., Shen R., Luchnikov P. A., Rogachev A. V. Molecular structure, optical, electrical and sensing properties of PANI-based coatings with silver nanoparticles deposited from the active gas phase. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 351, pp. 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.008>
21. Sainz R., Benito A. M., Martínez M. T., Galindo J. F., Sotres J., Baró A. M., Corraze B., Chauvet O., Maser W. K. Soluble self-aligned carbon nanotube/polyaniline composites. *Advanced Materials*, 2005, vol. 17, iss. 3, pp. 278–281. <https://doi.org/10.1002/adma.200400921>

Информация об авторах

Игнатович Жанна Владимировна – кандидат химических наук, заместитель директора. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ignatovich@ichnm.by

Филиппович Людмила Николаевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, доцент. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: luda1977@list.ru

Данилова Дарья Александровна – младший научный сотрудник. Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь (ул. Филимонова, 25, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: danilovad11@gmail.com

Лемешонек Светлана Николаевна – научный сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 36, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ichnm-lpp@mail.ru

Петкевич Анна Васильевна – научный сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 36, 220084, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: m_a_w1987@mail.ru

Шахаб Сиямак Насер – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой. Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова БГУ (ул. Долгобродская, 23/1, 220070, Минск, Республика Беларусь). E-mail: siyamakshahab@mail.ru

Рогачев Александр Александрович – член-корреспондент, доктор технических наук, профессор, директор. Институт химии новых материалов НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 36, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rogachev78@mail.ru

Information about the authors

Ihnatovich Zhanna V. – Ph. D. (Chemistry), Deputy Director. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36 F. Skorina Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatovich@ichnm.by

Filippovich Lyudmila N. – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher, Associate Professor. Institute of Physical-Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: luda1977@list.ru

Danilova Darya A. – Junior Researcher. Scientific and Practical Center of the State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus (25, Filimonov Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: danilovad11@gmail.com

Lemeshonok Svetlana N. – Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ichnm-lpp@mail.ru

Petkevich Anna V. – Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ichnm-lpp@mail.ru

Shahab Siyamak N. – Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Head of Department. Sakharov International State Ecological Institute BSU (23/1, Dolgobrodskaya Str., 220070, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: siyamakshahab@mail.ru

Rogachev Alexander A. – Corresponding Member, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Director. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220084 Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rogachev78@mail.ru