

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ ПОЛИМЕРОВ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

© 2024 А. В. Юрков¹, А. В. Будаев²

¹ студент, направление 11.03.04 – Электроника и нанoeлектроника

e-mail: AlexandrNewton@yandex.ru

² кандидат физико-математических наук,

старший преподаватель кафедры физики и нанотехнологий

e-mail: budartem@mail.ru

Курский государственный университет

В статье рассмотрены электрофизические свойства проводящих полимеров, охарактеризованы основные представители данного класса веществ, такие как полиацетилен (РА), полипиррол (РРy), политиофен (PTh), полианилин (PANI), полифениленвинилен (PPV), поли(3,4-этилендиокситиофен) (PEDOT), полифенилен и полипарафенилен (PPP), а также представлен обзор применения этих соединений в электронике и других областях, составленный на основе изучения исследований российских и иностранных авторов.

Ключевые слова: электроактивные полимеры, проводящие полимеры, полевые транзисторы, светодиоды, электрохромные устройства, суперконденсаторы, аккумуляторы, солнечные батареи, датчики.

APPLICATIONS OF CONDUCTING POLYMERS IN ELECTRONICS

© 2024 A. V. Yurkov¹, A. V. Budaev²

¹ Student, 11.03.04 – Electronics and Nanoelectronics

e-mail: AlexandrNewton@yandex.ru

² Candidate of Physical and Mathematical Sciences,

Senior Lecturer of the Department of Physics and Nanotechnology

e-mail: budartem@mail.ru

Kursk State University

This article reviews the electrophysical properties of conducting polymers, characterizing the main representatives of this class of substances, such as polyacetylene (PA), polypyrrole (PPy), polythiophene (PTh), polyaniline (PANI), polyphenylenevinylene (PPV), poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT), polyphenylene and polyparaphenylene (PPP), and an overview of the applications of these compounds in electronics and other fields based on the studies of Russian and international authors is presented.

Keywords: electroactive polymers, conducting polymers, field-effect transistors, LEDs, electrochromic devices, supercapacitors, batteries, solar cells, sensors.

Полимерами являются вещества, у которых молекулы состоят из множества повторяющихся структурных звеньев, называемых мономерами, связанных химическими связями. Данные соединения имеют сложную классификацию по разным признакам: состав основной цепи полимера, форма его макромолекулы. С точки зрения применения в электронике и связанных с ней науках полимеры рассматриваются как

диэлектрики, проводники и полупроводники. До второй половины XX в. полимеры ценились за их изолирующие свойства, а наличие в них электропроводности считалось нежелательным свойством. Однако открытие в 1977 г. проводящих свойств полиацетилена [1], которые возникли вследствие легирования полимера различными примесями (галогены хлора, брома и йода, а также пентафторидом мышьяка), сформировало новое направление технической и научной деятельности по исследованию и разработке подобных органических полимеров. Электроактивными полимерами следует называть органические полимеры, обладающие высокой электрической проводимостью, как у металлов или полупроводников.

Электроактивные полимеры можно разделить на 2 категории: полимеры, проводящие электрический заряд (электроны и «дырки»), и полимеры с ионной проводимостью. Полимеры первой категории также разделяются на 2 группы в зависимости от механизма переноса электронов: электронопроводящие полимеры (или проводящие), проводимость которых близка к проводимости металлов, и редокс-полимеры, у которых перенос заряда осуществляется в процессе окислительно-восстановительных реакций [2]. Также следует отметить, что полимеры с переносом отрицательного заряда получили большее распространение.

Проводящие полимеры представляют собой органические полимеры с системой π -связей. Проводимость данного типа электроактивных полимеров вызвана наличием чередующих двойных связей в органической молекуле. Это приводит к делокализации электронов из π -связей [3]. Увеличение делокализации электронов по всей молекуле уменьшает ширину запрещённой зоны с 10 эВ до 1÷4 эВ, что, в свою очередь, повышает проводимость вещества от диапазона в 10^{-12} ÷ 10^{-7} См/см до значений в 10^3 См/см. Проводимость и другие свойства данных полимеров значительно зависят от подбора легирующей примеси. Примером таких соединений могут быть полимеры на основе анилина и их производные.

Редокс-полимеры – это полимеры, содержащие неподвижные окислительно-восстановительные активные центры, которые могут быть в составе полимерной цепи или быть связанными с функциональными группами полимера. Представителями являются различные полиядерные комплексы (комплексные соединения, содержащие несколько центральных ионов в цепи) на основе гексацианоферратов металлов и другие. Более подробная характеристика механизмов переноса заряда в электронопроводящих полимерах и редокс-полимерах представлена в работе [3].

Безусловно, наиболее значимой характеристикой проводящих полимеров является их удельная электрическая проводимость. В таблице 1 приведены основные представители проводящих органических полимеров, используемые легирующие примеси и значения проводимости.

Таблица 1

**Проводимость основных проводящих органических полимеров
с различными типами легирующих примесей [4, 5]**

Проводящий полимер	Легирующие примеси	Проводимость (См/см)
Полиацетелен (РА)	AsF ₅ , I ₂ , Na	10 ⁴
Полипиррол (PPy)	BF ₄ ⁻ , ClO ₄ ⁻	500-7,5×10 ³
Политиофен (PTh)	BF ₄ ⁻ , ClO ₄ ⁻ , FeCl ₄ ⁻	10 ³
Полипарафенилен (PPP)	AsF ₅ , Li, K	10 ³
Полианилин (PANI)	HCl	200
Полифениленвинилен (PPV)	AsF ₅	10 ⁴
Поли (3,4-этилендиокситиофен) (PEDOT)	ClO ₄ , Tos ⁻ , PSS ⁻ , BF ₄ ⁻ , PF ₆ ⁻	36-650

На основе таблицы можно сделать вывод, что основным фактором, влияющим на проводимость проводящего полимера, является легирование правильно выбранной примесью. Влияние легирующей примеси также обусловлено тем, что степень легирования связана с концентрацией носителей заряда основной цепи полимера. Кроме того, в зависимости от размеров молекул примеси могут изменяться и другие свойства структуры, такие как морфология поверхности, плотность получаемой структуры [8]. Следует также отметить, что проводящие полимеры помимо своего главного свойства могут иметь дополнительные преимущества, такие как хорошие магнитные, оптические и механические свойства, смачиваемость и поглощающую способность (абсорбция).

Далее будут описаны наиболее активно изучаемые представители органических проводящих полимеров и различные возможности их применения.

Полиацетилен (РА) представляет собой органический полимер с повторяющимся звеном $(C_2H_2)_n$ [6]. Полиацетилен может быть получен в цис- и транс-формах в виде гибких плёнок, порошка, пены и композитов (рис. 1).

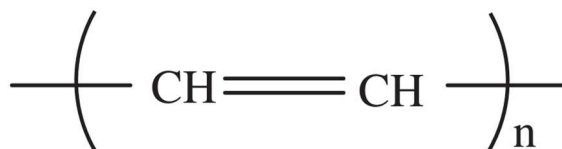


Рис. 1. Молекула РА [4]

Известны следующие методы синтеза РА: межфазная полимеризация молекулы РА на поверхности концентрированного однородного раствора катализатора Циглера-Натта, метатезисная полимеризация, электрохимическая полимеризация, полимеризация под высоким давлением. Высокая проводимость молекулы достигается за счёт добавления примесей доноров электронов (примеси n-типа) и примесей акцепторов электронов (примесей p-типа) [3]. Также РА обладает оптическими и магнитными свойствами. Следует отметить полимеры на основе диацетилена, которые имеют ограниченную электропроводность, но могут быть синтезированы в виде крупных монокристаллов [7].

В одном из недавних обзоров, посвящённых РА, докладывается о применении РА в таких областях электроники, как разработка электрических схем, разработка датчиков [8]. Однако известны работы по использованию РА в создании полевых транзисторов, электрохромных устройств и суперконденсаторов.

В работе [9] был изготовлен полевой транзистор с использованием полиацетилена в качестве активного полупроводника. Прибор ведет себя как p-канальный усиливающий (нормально выключенный) полевой транзистор. В разработке электрохромных устройств на основе РА синтезирован поли(1, 2-метилendioксибензол) на платиновом листе в ацетонитриле, обладающий хорошими электрохромными и флуоресцентными свойствами излучения [10]. В статье [11] представлен новый метод легкого синтеза РА и углеродных материалов для электродов суперконденсаторов с превосходными электрохимическими характеристиками и практическим применением.

Полипиррол (РРy) – полимер $(H(C_4H_2NH)_nH)$, образующийся в ходе полимеризации пиррола (рис. 2).

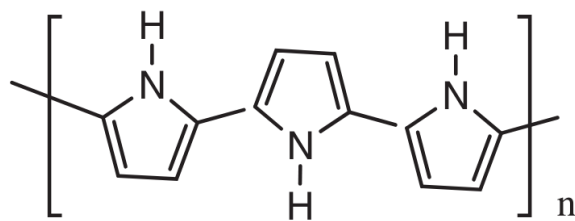


Рис. 2. Молекула PPy [4]

PPy синтезируется методами электрохимической и окислительной химической полимеризации. Значения электропроводности получаемых продуктов зависят от реакционной среды, параметров, добавок и окислителя, используемого для реакции полимеризации, который одновременно действует как легирующая добавка [4]. Кроме того, он привлекает интерес производителей благодаря своим хорошим механическим, оптическим свойствам, высокой проводимости, окислительно-восстановительным свойствам, стабилизированной окисленной форме и коммерческой доступности [6].

Рассмотрим применение PPy в различных областях электроники. PPy использовался в качестве полупроводникового слоя в составе полностью полимерного полевого транзистора [12]. В другой работе [13] в структуре полевого транзистора использовались нанопроволоки на основе PPy, который продемонстрировал высокий коэффициент тока включения/выключения при наличии положительного смещения. В работе [14] сообщается о создании суперконденсаторов на основе PPy и PANI, которые выращены электрохимически из неводного раствора с органической трифторуксусной кислотой (CF_3COOH) в качестве источника протонов. Полученные структуры являются ассиметричными, так как электроды созданы на основе разных полимеров, обладают улучшенными характеристиками по сравнению с симметричным конденсатором, использующим одни и те же p-легируемые полимеры для обоих электродов. Исследование синтезированных сверхдлинных нанопроволок из PPy показали, что полученная структура обладает отличной фоточувствительностью и фотооткликом, что позволяет использовать полученные структуры в качестве газовых датчиков [15]. Композит PPy/ $\text{Co}_{0.2}\text{CrO}_x$ исследовался в качестве материала для катода литий-ионных батарей [16].

Таким образом, в электронике PPy применяется в качестве материала для полевых транзисторов, суперконденсаторов, газовых датчиков, а также аккумуляторов.

Политиофен (PTh) представляет собой органический полимеризованный тиофен ($\text{C}_4\text{H}_2\text{S}$)_n (рис. 3).

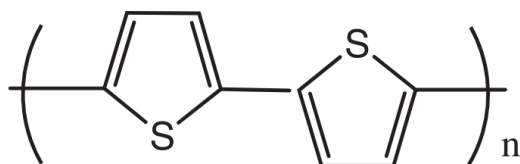


Рис. 3. Молекула PTh [4]

Интерес к производству проводящих полимеров на основе тиофена возник благодаря его термической стабильности, экологичности производства [17], простой технологии обработки. Легирование сильным окислителем или восстановителем может увеличить его проводимость в несколько раз. PTh может быть синтезирован и в виде наночастиц. Также он обладает электрохромными свойствами, то есть способен изменять цвет при приложении напряжения. Синтезируется методами окислительной химической и электрохимической полимеризации [4].

PTh применяется во многих областях электроники, к которым относятся суперконденсаторы, электромагнитное экранирование, электрооптические устройства, материалы для отображения, устройства памяти, аккумуляторы, солнечные элементы и светодиоды.

Так, полученные нановолокна PTh и углеродные нановолокна на основе PTh могут быть использованы в качестве материалов для электродов асимметричного суперконденсатора [18]. В работе измеряли эффективность электромагнитного экранирования и относительную эффективность экранирования за счет поглощения и отражения композитных волокон PTh/полиэтилентерефталата (PET) в радио- и микроволновом диапазоне частот [19]. Результаты показывают, что подготовленное композитное волокно PTh/PET может использоваться в приложениях осаждения статического заряда. Производные PTh, такие как поли(3-метилтиофен) (P3MT) и поли(3-октилтиофен) (P3OT), были синтезированы и использованы в полностью полимерном электрооптическом устройстве, показавшем хороший оптический контраст на длине волны в 500 нм, в работе [20]. Структура на основе PTh (PTh-ADA-PPR) может быть использована в качестве превосходного двухцветного флуоресцентного и специфического для лизосом материала для визуализации [21]. В статье [22] представлен обзор последних исследований применения политиофена для запоминающих устройств. Они в основном посвящены роли данных материалов в функциональности памяти, оптимизации химической структуры политиофена и компонентов каждого слоя в запоминающих устройствах. В работе [23] спроектированы тиофенсодержащие сопряженные микропористые полимеры с отличными электрохимическими характеристиками для анодных материалов в литий-ионных батареях. В статьях [24] и [25] приведены последние исследования, подтверждающие прорыв в области применения PTh и его производных в разработке органических солнечных батарей и электролюминисцентных материалах соответственно.

Полианилин (PANI) – вещество, получаемый из мономера анилина, структура которого представлена на рисунке 4. Полимер имеет в своей структуре гетероатомы и характеризуется контролируемой электропроводностью с окислительно-восстановительными свойствами и устойчивостью к воздействию окружающей среды.

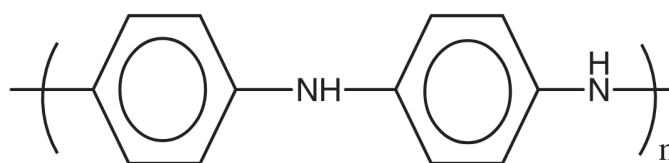


Рис. 4. Молекула PANI [4]

Данный полимер может быть синтезирован методами электрохимической полимеризации, окислительной химической полимеризации, химической полимеризации и плазменной полимеризации. Так, в ходе химической окислительной полимеризации образуется эмиральдиновая соль (проводящая форма). Уникальным свойством PANI является возможность варьирования электронных состояний как за счет изменения числа электронов, так и за счет изменения числа протонов в повторяющемся звене основной цепи. Проводимость полимера зависит от pH раствора [17].

Из обзоров [4] и [26] известно, что легированный PANI может быть использован в различных приложениях электроники.

PANI в комбинации с эфирными смолами показали высокие значения проводимости в исследовании [27], что актуально в разработке токопроводящих клеев.

В работе [28] было показано, что устройство для определения содержания амиака на основе РРу и сульфированного PANI имеют высокую чувствительность и низкий предел обнаружения. Электрод, полученный на основе композитной плёнки из Берлинской лазури, PANI и многостенных углеродных нанотрубок, демонстрирует улучшенные электрокаталитические свойства и хорошую стабильность для обнаружения H_2O_2 [29]. Композиты на основе PANI с одностенными нанотрубками (SWCNT) продемонстрировали потенциал в качестве превосходных электродных материалов для применения в высокоэффективных суперконденсаторах [30]. В работе [31] сообщается о энергонезависимом цифровом запоминающем устройстве на основе нановолокон сопряженного полимера PANI, с добавлением наночастиц золота. В статье [32] обсуждается прогресс в области защиты от электромагнитных помех с использованием наноразмерных частиц PANI и производных от них нанокомпозитов. В работе [33] был изготовлен светодиод (LED) на базе эмеральдин основания PANI в качестве излучающего слоя, стеклянной пластиной с покрытием из оксида индия-олова в качестве инжектора отверстий и нанесенной тонкой пленкой алюминия (или магния) в качестве электронного инжектора, который может излучать почти белый свет, охватывающий весь диапазон видимого света (380-750 нм). В исследовании [34] успешно получен композит PANI с гибкой нетканой текстильной прокладкой, который затем использовали в гибком четырехслойном электрохромном устройстве. Поведение диода было обнаружено в структуре на основе плёнок PANI и Pt в работе [35].

На основе рассмотренных приложений можно отметить, что PANI используется в разработке токопроводящего клея, различных сенсоров, в устройствах хранения и преобразования энергии, в различных устройствах памяти, в защите от электромагнитных помех, в светоизлучающих и электрохромных приборах и в различных полупроводниковых устройствах. Это свидетельствует о высокой универсальности полимера.

Полипарафенилен (PPP) – полимер, состоящий из мономерных звеньев – фенилена. Структура его молекулы представлена на рисунке 5.

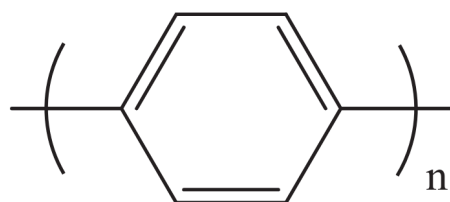


Рис. 5. Молекула PPP [4]

Эффективным методом для синтеза данного вещества является химическая полимеризация. Легирование примесями как n-типа, так и p-типа с различной концентрацией легирующей примеси позволяет достичь широкого диапазона значений электропроводности [4]. Из той же статьи известно, что благодаря таким свойствам, как экологическая стабильность и электролюминесцентное поведение, PPP может быть использован в качестве светоизлучающих устройств. Однако следует отметить, что PPP может быть использован и в других областях. Например, в качестве стабильного катода для двухионно-калиевых аккумуляторов, которые рассматриваются как перспективная альтернатива литий-ионных батарей [36]. Также на PPP был задействован в структуре термостойкого, механически прочного и высокоэффективного твёрдотельного суперконденсатора [37]. Кроме того, PPP был использован в эффективном и простом нанокомпозите для индивидуального и одновременного обнаружения аскорбиновой кислоты (AA), дофамина (DA) и мочевой кислоты (UA) [38].

Полифениленвинилен (PPV) – полимер, который является комбинацией полимеров ПА и полифенилена. Структура его молекулы представлена на рисунке 6.

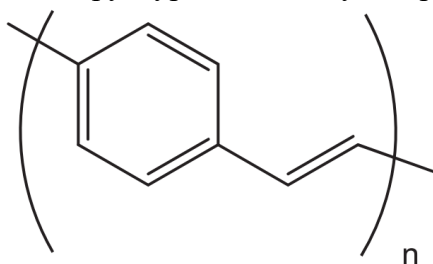


Рис. 6. Молекула PPV [4]

Вещество обладает диамагнитными свойствами, электролюминесцентными свойствами, низкой проводимостью, высокой кристалличностью, механической прочностью и устойчивостью к воздействию окружающей среды. Полимер синтезируется реакциями Виттига, Хека, Кнувенагеля, метатезисом и электрохимическим процессом [4]. Электропроводность повышается за счет легирования йодом, хлорным железом, щелочными металлами или кислотами, но с меньшей стабильностью [7]. Одно из первых применений данного полимера произошло в 1992 г., когда на его основе был разработан диод [5]. Тогда были обнаружены и исследованы фотодиодные и фотоэлектрические отклики, открывшие возможность применения полимера в области фотодетекторов и солнечных батарей.

Помимо применения в области фотодетекторов и солнечных батарей PPV также применяются в разработке полимерных светодиодов, суперконденсаторов и полевых транзисторов. В работе [39] сообщается об изготовлении на основе сополимеров PPV эффективного полимерного светодиодного устройства. Также в работе [40] были изготовлены полимерные светодиоды из поли(2-метокси-5-(20-этил-гексокси)-1,4-фенилен-винилена) (МЕН-PPV), а также исследованы электролюминесцентные свойства полученного устройства. Был предложен метод улучшения этих свойств по сравнению с ранее исследуемыми пленками. В статье [41] описывается получение с использованием технологий послойного осаждения полностью твердотельного гибкого плоского суперконденсатора на основе подложки из поли(этилентерефталата) (PET), ламинированного двумя слоями ультратонких многослойных пленок, состоящих из 30 двойных слоёв PANI/RGO (полианилина/восстановленного оксида графена) и 30 двойных слоёв PPV/RGO. В исследовании [42] демонстрируются органические полевые транзисторы из PPV, осажденного химическим способом из паровой фазы.

Поли(3,4-этилендиокситиофен) (PEDOT) представляет собой проводящий полимер на основе 3,4-этилендиокситиофенового мономера. Молекула данного вещества представлена на рисунке 7.

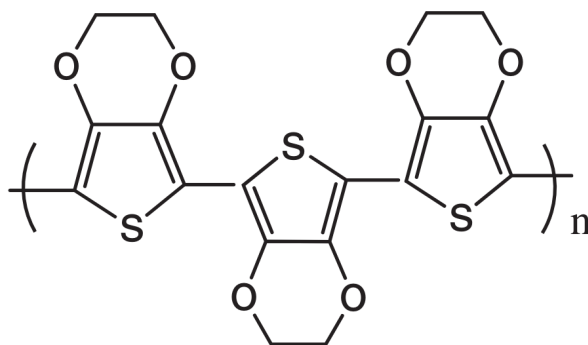


Рис. 7. Молекула PEDOT [4]

Наноструктуры PEDOT, такие как провода, волокна, трубки, могут быть получены методами химической окислительной и электрохимической полимеризации [4]. Все окисленные формы PEDOT имеют противоионы для уравнивания заряда. В зависимости от природы противоионов, присутствующих на молекуле PEDOT, электропроводность PEDOT может варьироваться [4]. К преимуществам полимера относят оптическую прозрачность в тонких окислированных пленках, высокую стабильность, величину запрещенной зоны (1.5÷2.0 эВ) и низкий окислительно-восстановительный потенциал [6].

На основе обзора [4] известно, что PEDOT применяется в разработке датчиков, электролюминесцентных ламп, устройств для накопления энергии. Однако известно, что PEDOT также может быть применён в разработке перовскитных солнечных элементов [43] и в биоэлектронной медицине (биосенсоры глюкозы, адресная доставка лекарств, биоразлагаемость и т.п.) [44].

Таким образом, простота синтеза, высокая технологичность, возможность достигнуть значений проводимости, как у полупроводников и металлов, а также дополнительные свойства перечисленных проводящих полимеров и их разнообразие свидетельствуют об универсальности и актуальности данного класса веществ. Следовательно, проводящие полимеры можно использовать во многих областях электроники и смежных дисциплинах. В таблице 2, которая составлена на основе изученной литературы, представлена основная информация об этих проводящих органических полимерах.

Таблица 2

Краткая информация о проводящих органических полимерах

Проводящий полимер	Способы получения	Свойства и особенности	Области применения
РА	Межфазная полимеризация, метатезисная полимеризация, электрохимическая полимеризация, полимеризация под высоким давлением	Проводимость, оптические свойства, магнитные свойства	Электрические схемы, датчики, полевые транзисторы, электрохромные устройства, суперконденсаторы
РРy	Электрохимическая полимеризация, окислительная химическая полимеризация	Проводимость, механические свойства, оптические свойства, окислительно-восстановительные свойства, стабильность окисленной формы	Полевые транзисторы, суперконденсаторы, газовые датчики, аккумуляторы
РTh	Электрохимическая полимеризация, окислительная химическая полимеризация	Проводимость, термическая стабильность, экологичность, простота обработки	Суперконденсаторы, электромагнитное экранирование, электрооптические устройства, материалы для визуализации в биомедицине, устройства памяти, аккумуляторы, солнечные элементы, светодиоды
PANI	Электрохимическая полимеризация, окислительная химическая полимеризация, химическая полимеризация и плазменная полимеризация.	Проводимость, окислительно-восстановительные свойства, стабильность к воздействию окружающей среды,	Токопроводящие клеи, Различные сенсоры, устройства хранения энергии, устройства преобразования энергии, устройства памяти, защита от электромагнитных

		оптические свойства, магнитные свойства	помех, светоизлучающие и электрохромные приборы, полупроводниковые устройства
PPP	Химическая полимеризация	Проводимость, экологическая стабильность, оптические свойства,	Светоизлучающие устройства, устройства хранения энергии, датчики
PPV	Реакция Виттига, реакция Хека, реакция Кнувенагеля, метатезисная полимеризация, электрохимическая полимеризация	Проводимость, диамагнитные свойства, оптические свойства, высокая кристалличность, механическая прочность, стабильность к воздействию окружающей среды	Полупроводниковые устройства, фотодетекторы, солнечные элементы, полимерные светодиоды, суперконденсаторы, полевые транзисторы
PEDOT	Электрохимическая полимеризация, окислительная химическая полимеризация	Проводимость, оптические свойства, стабильность	Датчики, электролюминесцентные лампы, устройства хранения энергии, солнечные элементы, устройства биоэлектронной медицины

Таким образом, в данной статье рассмотрены электрофизические свойства электроактивных органических полимеров, охарактеризованы основные представители проводящих полимеров и области их применения. Данный класс соединений активно применяется в разработке полевых транзисторов, датчиков, устройств для преобразования и хранения энергии, электролюминесцентных, электрохромных и светодиодных устройствах, в приборах для экранирования от электромагнитных помех и в устройствах памяти. Использование данных материалов обусловлено наличием у них высокой проводимости, большим количеством методов синтеза этих соединений с желаемыми характеристиками, высокой технологичностью и возможностью производства дешёвых устройств. Эти преимущества проводящих полимеров позволяют решить множество задач электроники и смежных областей, что свидетельствует об универсальности данного класса веществ. Несмотря на то что исследования ведутся со второй половины XX века, данная тема остаётся актуальной и на сегодняшний день.

Библиографический список

1. Chiang, C. K. *et al.* Electrical conductivity in doped polyacetylene // Physical review letters. – 1977. – Т. 39. – № 17. – С. 1098.
2. Inzelt, G. Conducting polymers: a new era in electrochemistry. – Springer Science & Business Media, 2012.
3. Малев, В. В., Кондратьев В. В. Процессы переноса заряда в пленках проводящих полимеров // Успехи химии. – 2006. – Т. 75. – № 2. – С. 166–182.
4. Poddar, A. K., Patel, S. S., Patel, H. D. Synthesis, characterization and applications of conductive polymers: A brief review // Polymers for Advanced Technologies. – 2021. – Т. 32. – № 12. – С. 4616–4641.
5. Kumar, D., Sharma, R. C. Advances in conductive polymers // European polymer journal. – 1998. – Т. 34. – № 8. – С. 1053–1060.

6. Awuzie, C. I. Conducting polymers // *Materials Today: Proceedings*. – 2017. – Т. 4. – № 4. – С. 5721–5726.
7. Naarmann, H. Polymers, electrically conducting // *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley – VCH, 2000.
8. Li W. *et al.* Particles of polyacetylene and its derivatives: preparation and applications // *Polymer Chemistry*. – 2014. – Т. 5. – № 4. – С. 1107–1118.
9. Burroughes, J. H., Friend, R. H., Allen, P. C. Field-enhanced conductivity in polyacetylene-construction of a field-effect transistor // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1989. № 22. P. 956–8.
10. Xu, J. *et al.* A novel electrochromic polyacetylene derivative with good fluorescence properties electrodeposited by direct anodic oxidation of 1, 2-methylenedioxybenzene // *Macromolecules*. – 2006. – Т. 39. – № 17. – С. 5611–5616.
11. Luo, T. *et al.* Polyacetylene carbon materials: Facile preparation using AlCl₃ catalyst and excellent electrochemical performance for supercapacitors // *RSC advances*. – 2019. – Т. 9. – № 21. – С. 11986–11995.
12. Liu, Y., Varahramyan, K., Cui, T. Low-voltage all-polymer field-effect transistor fabricated using an inkjet printing technique // *Macromolecular Rapid Communications*. – 2005. – Т. 26. – № 24. – С. 1955–1959.
13. Alam, M. M. *et al.* Electrolyte-gated transistors based on conducting polymer nanowire junction arrays // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2005. – Т. 109. – № 26. – С. 12777–12784.
14. Cho, S. I. *et al.* Electrochemical synthesis and fast electrochromics of poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) nanotubes in flexible substrate // *Chemistry of materials*. – 2005. – Т. 17. – № 18. – С. 4564–4566.
15. Wang, X. *et al.* Reversible and efficient photocurrent switching of ultra-long polypyrrole nanowires // *Synthetic metals*. – 2009. – Т. 159. – № 3-4. – С. 273–276.
16. Ramasamy, R. P. *et al.* Electrochemical characterization of a polypyrrole/CoO. 2CrOx composite as a cathode material for lithium ion batteries // *Journal of power sources*. – 2003. – Т. 124. – № 1. – С. 197–203.
17. Kar, K. K. Handbook of nanocomposite supercapacitor materials II. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – Т. 302.
18. Balakrishnan, K., Kumar, M., Angaiah, S. Synthesis of polythiophene and its carbonaceous nanofibers as electrode materials for asymmetric supercapacitors // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Т. 938. – С. 151–157.
19. Erdoğan, M. K., Karakişla, M., Saçak, M. Preparation, characterization and electromagnetic shielding effectiveness of conductive polythiophene/poly (ethylene terephthalate) composite fibers // *Journal of Macromolecular Science, Part A*. – 2012. – Т. 49. – № 6. – С. 473–482.
20. Nicho, M. E. *et al.* Synthesis of derivatives of polythiophene and their application in an electrochromic device // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2004. – Т. 82. – № 1-2. – С. 105–118.
21. Wang, F. *et al.* Synthesis and characterization of water-soluble polythiophene derivatives for cell imaging // *Scientific reports*. – 2015. – Т. 5. – № 1. – С. 7617.
22. Li, Y., Shen, Y. Polythiophene-based materials for nonvolatile polymeric memory devices // *Polymer Engineering & Science*. – 2014. – Т. 54. – № 11. – С. 2470–2488.
23. Zhang, C. *et al.* Toward high performance thiophene-containing conjugated microporous polymer anodes for lithium-ion batteries through structure design // *Advanced Functional Materials*. – 2018. – Т. 28. – № 4 [Электронный ресурс]. – URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201705432>

24. Yang, C., Zhang, S., Hou, J. Low-cost and efficient organic solar cells based on polythiophene-and poly (thiophene vinylene)-related donors: Photovoltaics: Special Issue Dedicated to Professor Yongfang Li // Aggregate. – 2022. – Т. 3. – № 3. – С. e111.
25. Perepichka, I. F. et al. Light-emitting polythiophenes // Advanced Materials. – 2005. – Т. 17. – № 19. – С. 2281–2305.
26. Bhadra, S. et al. Progress in preparation, processing and applications of polyaniline //Progress in polymer science. – 2009. – Т. 34. – № 8. – С. 783–810.
27. Hino, T., Taniguchi, S., Kuramoto, N. Syntheses of conductive adhesives based on epoxy resin and polyanilines by using N-tert-butyl-5-methylisoxazolium perchlorate as a thermally latent curing reagent // Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry. – 2006. – Т. 44. – № 2. – С. 718–726.
28. Bai, H. et al. Electrosynthesis of polypyrrole/sulfonated polyaniline composite films and their applications for ammonia gas sensing // Polymer. – 2007. – Т. 48. – № 14. – С. 4015–4020.
29. Zou, Y., Sun, L., Xu, F. Prussian blue electrodeposited on MWNTs–PANI hybrid composites for H₂O₂ detection // Talanta. – 2007. – Т. 72. – № 2. – С. 437–442.
30. Gupta, V., Miura, N. Polyaniline/single-wall carbon nanotube (PANI/SWCNT) composites for high performance supercapacitors //Electrochimica acta. – 2006. – Т. 52. – № 4. – С. 1721–1726.
31. Tseng, R. J. et al. Polyaniline nanofiber/gold nanoparticle nonvolatile memory //Nano letters. – 2005. – Т. 5. – № 6. – С. 1077–1080.
32. Zahid, M. et al. Polyaniline-based nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications: A review //Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2023. – Т. 36. – № 4. – С. 1717–1761.
33. Chen S. A. et al. White-light emission from electroluminescence diode with polyaniline as the emitting layer //Synthetic Metals. – 1996. – Т. 82. – № 3. – С. 207–210.
34. Kelly, F. M. et al. Polyaniline: Application as solid state electrochromic in a flexible textile display // Displays. – 2013. – Т. 34. – № 1. – С. 1–7.
35. Xing, S. et al. Diode-like behavior based on polyaniline and Pt //Solid-state electronics. – 2006. – Т. 50. – № 9-10. – С. 1629–1633.
36. Zhang, M. et al. Polyparaphenylene as a high-voltage organic cathode for potassium dual-ion batteries //Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2022. – Т. 909. – С. 116155.
37. Liu, T. et al. Heat-resistant and high-performance solid-state supercapacitors based on poly (para-phenylene terephthalamide) fibers via polymer-assisted metal deposition //ACS applied materials & interfaces. – 2021. – Т. 13. – № 15. – С. 18100–18109.
38. Hsine, Z. et al. Nanocomposite based on poly (para-phenylene)/chemical reduced graphene oxide as a platform for simultaneous detection of ascorbic acid, dopamine and uric acid // Sensors. – 2020. – Т. 20. – № 5. – С. 1256.
39. Kuo, C. H. et al. High-efficiency poly (phenylenevinylene)-co-fluorene copolymers incorporating a triphenylamine as the end group for white-light-emitting diode applications //Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry. – 2007. – Т. 45. – № 19. – С. 4504–4513.
40. Lo, S. Y. et al. Optoelectronic characteristics of MEH-PPV polymer LEDs with thin, doped composition-graded a-SiC: H carrier injection layers // Solid-state electronics. – 2006. – Т. 50. – № 9-10. – С. 1501–1505.
41. Wee, B. H., Hong, J. D. Multilayered poly (p-phenylenevinylene)/reduced graphene oxide film: an efficient organic current collector in an all-plastic supercapacitor //Langmuir. – 2014. – Т. 30. – № 18. – С. 5267–5275.

42. *Bhat, D. et al.* Organic field effect transistors (OFETs) of poly (p-phenylenevinylene) fabricated by chemical vapor deposition (CVD) with improved hole mobility //Synthetic Metals. – 2019. – Т. 255. – С. 116108.\

43. *Xia, Y., Dai, S.* Review on applications of PEDOTs and PEDOT: PSS in perovskite solar cells //Journal of materials science: materials in electronics. – 2021. – Т. 32. – №. 10. – С. 12746–12757.

44. *Boehler, C., Aqrave, Z., Asplund, M.* Applications of PEDOT in bioelectronic medicine // Bioelectronics in Medicine. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 89–99.