



Стратегическое
общественное
движение

www.2045.ru

РЕФЕРАТ

ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ ИСКУССТВЕННЫХ МУСКУЛОВ

Автор: М.Ю. Яблоков,
кандидат физико-математических наук

Москва, 2012

Аннотация

Представлен перечень эффектов, связанных с трансформацией различных видов энергии в полимерных материалах. Этот перечень предполагается использовать для разработки искусственных мускулов на базе электро-механически активных полимеров с помощью методологии ТРИЗ.

Введение

Создание искусственных мускулов на основе электро-активных, или более точно, электро-механически активных полимеров (ЭАП) является в настоящее время быстрорастущей и многообещающей областью исследований и разработок. Устройства и системы на основе ЭАП воплощают принцип «умных материалов», т.е. таких материалов, которые способны изменять свои размеры и/или форму под воздействием электрического сигнала, а также преобразовывать электрическую энергию в механическую работу. Они также могут выполнять и обратную функцию – преобразовывать механическую энергию в электрическую.

Эти материалы могут быть использованы как приводы, механо-электрические сенсоры, а также как сборщики энергии. Для решения этих задач ЭАП обладают уникальными преимуществами, такими как гибкость, низкая плотность, простота строения, простота обработки, отсутствие акустического шума и, в большинстве случаев, низкая цена.

Область науки и техники, направленная на создание электромеханических преобразователей на основе электро-активных полимеров, бурно развивается в последние годы. Этот рост начался с середины 90-х годов прошлого столетия с работ Бар-Козна из Лаборатории реактивного движения НАСА (США) [1]. Осознание необходимости широкой кооперации для решения научных и технических проблем в области электро-активных полимеров привело к созданию в конце 2010 года «Европейской научной сети по искусственным мускулам» (ESNAM), основное назначение которой – консолидация усилий по созданию искусственных мускулов различного типа на основе электро-активных полимеров.

ЭАП в настоящее время изучаются для применения в тех областях, которые ранее были недостижимы для традиционных электромеханических преобразователей, с использованием от микро- до макромасштабов, включая робототехнику, автоматизацию, протезирование, искусственные органы, оптику и даже аэрокосмическую технику.

ЭАП обычно подразделяют на два основных класса: ионные ЭАП и электронные ЭАП. Ионные ЭАП активируются электротранспортом ионов или молекул растворителя, тогда как электронные ЭАП активируются электростатическими силами.

Ионные ЭАП включают полимерные гели, металл-полимерные композиты, проводящие полимеры, углеродные нанотрубки. Электронные ЭАП включают пьезоэлектрические, электрострикционные полимеры, диэлектрические эластомеры, жидкокристаллические эластомеры и аэрогели на основе углеродных нанотрубок [2].

Упрощенно говоря, для активации электронных ЭАП нужны высокое напряжение и малый ток, а для ионных ЭАП требуются низкое напряжение и относительно большой ток.

К настоящему времени создан рынок устройств, использующих как электронные, так и ионные ЭАП. Эти устройства имеют малый размер и вес и являются разного рода сенсорами и актюаторами [3–6]. Однако пока никакие из существующих ЭАП не пригодны для изготовления «силовых мускулов», сравнимых по силе с человеческими,

для использования в робототехнике. По оценкам ведущих специалистов в области ЭАП, потребуется от 5 до 20 лет, чтобы сделать такие силовые мускулы. При этом предполагается, что темп развития исследований в данной области не уменьшится.

В то же время, как представляется, ЭАП является наиболее перспективным направлением для создания приводов биороботов. Однако на данный момент оптимального подхода к созданию таких приводов пока нет.

Еще в 1999 году доктор Йозеф Бар-Коэн (Yoseph Bar-Cohen) из Лаборатории реактивного движения НАСА поставил перед исследователями всего мира задачу по созданию роботизированной руки, приводимой в действие искусственными мускулами (все теми же электро-активными полимерами), которая смогла бы победить человека в чемпионате по армрестлингу, и 7 марта 2005 года в Сан-Диего, США, прошел первый подобный чемпионат, который выиграла 17-летняя студентка Панна Фелсен (Panna Felsen), соревновавшаяся с тремя участвовавшими роботизированными руками. Эти руки были собраны командами следующих организаций:

1. Environmental Robots Incorporated (ERI), Альбукерке, Нью-Мексико, США.
2. Швейцарская Федеральная лаборатория по исследованию и тестированию материалов (EMPA), Дубендорф, Швейцария.
3. Политехнический государственный университет Вирджинии, студенты старших курсов отделения машиностроения и механики.

Дольше всего в состязании со студенткой продержалась рука, сконструированная командой из ERI: 24 секунды. Изначально задание было сформулировано следующим образом: победить человека (любого человека) с помощью простой роботизированной руки, и в прошедшем соревновании на стороне человечества выступала молодая представительница прекрасного пола.

Основной целью организаторов соревнований было привлечь внимание к разработкам в сфере электро-активных полимеров. По их мнению, приводные механизмы на основе этих полимеров являются наилучшим приближением к тому, как работают человеческие мускулы. Кроме того, исследователи Лаборатории надеялись, что их разработкам найдется применение во многих областях индустрии, медицины (протезирование различных мышечных органов) и т.д.

Обобщенный подход

Представляется целесообразным несколько иной подход к созданию искусственных мускулов на основе полимерных материалов. Предлагается не ограничиваться прямолинейным подходом, который заключается в совершенствовании путей трансформации энергии в полимерах непосредственно из электрической формы в механическую. Важно рассмотреть все возможные пути трансформации энергии а полимерах. Необходимо выйти за пределы конкретных используемых принципов и эффектов, и попытаться «сверху» взглянуть на проблему. Для этого обобщенного подхода нужно привлечь весь доступный арсенал воздействий, известных на сегодняшний день.

Перечень воздействий и откликов приведен в Таблице. С использованием приведенной Таблицы появляется возможность моделирования разнообразных типов искусственных мускулов путем комбинирования в различных сочетаниях известных воздействий для получения соответствующих необходимых откликов.

Комментарии к таблице

1. В основном тексте координаты ячеек таблицы «Воздействие – отклик» обозначены соответствующей нумерацией вида «i/j», где i – воздействие, j – отклик. Например: воздействие электрическое, отклик механический – Раздел 2/1.

2. В таблице не рассматривались те виды энергии, которые заведомо не могут быть использованы для функционирования искусственных мускулов, а именно: ядерная энергия, энергия взрыва, темная энергия.
3. Из раздела механического воздействия выделено акустическое, как динамическое механическое.
4. Из раздела электромагнитных воздействий выделены в отдельные разделы статические воздействия (электрические и магнитные) в силу их особой важности.
5. Под электромагнитными воздействиями понимаются воздействия электромагнитным излучением различной частоты. Воздействия рентгеновского, гамма-, СВЧ диапазонов исключены в силу их несовместимости с биообъектами.
6. В химическое воздействие входит воздействие на полимеры газов и жидкостей.
7. В акустическое воздействие входит также ультразвуковое.
8. В акустический отклик включены динамические отклики, в частности эффект вращения Квинке (Quincke rotation).

Перечень эффектов, связанных с трансформацией энергии в полимерах

Раздел 1/1 (воздействие – механическое, отклик – механический)

При воздействии внешних механических сил полимеры способны развивать большие, достигающие десятков и сотен процентов, обратимые деформации. Для полимеров характерен релаксационный характер реакции на внешние воздействия, т.е. зависимость деформаций и напряжений от длительности (частоты) воздействия. Физический процесс разрушения полимеров, в отличие от хрупких тел, является процессом, развивающимся во времени, и представляет собой процесс постепенного разрыва химических связей в основной цепи полимера. Роль механического напряжения сводится к снижению энергетического барьера, препятствующему разрыву химических связей [7].

При соответствующих условиях аморфные полимерные материалы могут находиться в высокоэластическом состоянии, когда основным видом деформации являются упругие. Наиболее отчетливо высокоэластическое состояние проявляется у сшитых каучуков (резин).

Раздел 1/2 (воздействие – механическое, отклик – электрический)

Пьезоэффект в полимерах [8, 9]. Наблюдается преимущественно в ориентированных пленках поливинилиденфторида и сополимеров винилиденфторида.

Трибоэлектрический эффект [10]. Электризация возникает при всех видах трения на всех полимерных диэлектриках.

Получение механоэлектретов. Механоэлектретирование осуществляется в процессе деформирования полимеров с целью получения поляризованного состояния материала, сохраняющегося длительное время [11–13].

Раздел 1/3 (воздействие – механическое, отклик – тепловой)

В высокоэластическом состоянии полимеров доминирующим видом деформации являются упругие деформации. Для сшитых каучуков (резин) напряжение при заданной кратности напряжения прямо пропорционально температуре. При растяжении эластомеры нагреваются [14].

Раздел 1/4 (воздействие – механическое, отклик – химический)

Механохимия полимеров [15]. Механохимические реакции протекают при переработке высоковязких полимерных материалов в экструдерах, на вальцах, при измельчении полимеров, при эксплуатации полимеров в условиях статических и динамических нагрузок.

Раздел 1/5 (воздействие – механическое, отклик – электромагнитный)

Для широкого круга полимеров наблюдается люминесценция, вызванная напряжением (Stress-induced luminescence, SIL) [16].

При разматывании скотча как в вакууме, так и на воздухе наблюдается эмиссия электромагнитного излучения различной частоты, включая видимый свет, радиоизлучение, рентгеновское излучение, гамма-излучение. Интенсивности рентгеновского излучения достаточно, чтобы получать изображения костей человека [17].

Фотоупругость полимеров. Фотоупругостью, или пьезооптическим эффектом, называется способность полимеров проявлять двойное лучепреломление под действием механического поля. Фотоупругость – следствие зависимости диэлектрической проницаемости вещества от деформации; проявляется в виде двойного лучепреломления и дихроизма, возникающих под действием механических нагрузок. При одноосном растяжении или сжатии изотропное тело приобретает свойства оптически одноосного кристалла с оптической осью, параллельной оси растяжения или сжатия. При более сложных деформациях, например при двухстороннем растяжении, образец становится оптически двухосным [18, 19].

Раздел 1/6 (воздействие – механическое, отклик – магнитный)

Изменение магнитных свойств полимеров, наполненных ферромагнитными частицами, – магнитопластов. Полимерные постоянные магниты или магнитопласты изготавливаются из смеси магнитного порошка и связующей полимерной компоненты. Этот вид магнитных материалов имеет ряд ценных качеств, выгодно отличающих их от металлических или керамических магнитов, получаемых спеканием. В первую очередь это высокая воспроизводимость и стабильность магнитных свойств, большой срок службы, хорошая механическая прочность и пластичность, возможность с малыми затратами получать изделия сложной формы и при этом соблюдать с высокой точностью заданные размеры.

Раздел 1/7 (воздействие – механическое, отклик – акустический)

Возникновение колебаний при деформации полимеров [20, 21].

Раздел 2/1 (воздействие – электрическое, отклик – механический)

К данному разделу формально относятся диэлектрические эластомеры – наиболее распространенный на данное время тип электро-активных полимеров. Хотя по сути электрическое воздействие в данном случае неспецифично: используется упругость полимеров, являющихся диэлектрической средой в плоском конденсаторе. При подаче напряжения пластины этого конденсатора притягиваются и сжимают полимерный диэлектрик. В силу несжимаемости полимера сжатие сопровождается увеличением площади плоского конденсатора. Деформация полимерной пленки в плоскости, перпендикулярной направлению сжатия, пропорциональна диэлектрической проницаемости полимера, квадрату напряжения и обратно пропорциональна модулю

Юнга и квадрату начальной толщины полимерной пленки. Собственно электрические свойства полимеров в данном случае не используются, поскольку диэлектрическая проницаемость полимеров мала. Типичными является толщина полимерной пленки в десятки микрон, прикладываемое напряжение составляет несколько киловольт.

Существенные усилия прикладываются к увеличению диэлектрической проницаемости полимерного материала. Для этого в него вводят, например, частицы сегнетоэлектриков. При этом, однако, увеличивается жесткость пленки и снижается пробойное напряжение. Для снижения напряжения пленку желательно изготавливать наименьшей толщины, однако при этом ухудшаются ее механические свойства. Решением задачи изготовления наилучшего диэлектрического эластомера является многопараметрическая оптимизация, которую в ряде случаев проводить весьма затруднительно в силу отсутствия необходимых данных о свойствах материалов [22–27].

Электрострикция – деформация диэлектриков в электрическом поле, обусловленная их поляризацией и пропорциональная квадрату напряженности электрического поля. Квадратичная зависимость деформации от напряженности поля означает, в частности, что знак электрострикции (т.е. расширяется или сжимается вещество в электрическом поле) не зависит от направления поля. В переменном поле в результате электрострикции механические колебания происходят с частотой вдвое большей, чем частота поля. Электрострикция обусловлена поляризацией диэлектриков в электрическом поле, т.е. смещением под действием поля атомов, несущих на себе электрические заряды (ионы, электрические диполи), или изменением ориентации диполей. Электрострикцией обладают все твердые диэлектрики независимо от их структуры и симметрии, в отличие от пьезоэффекта, который наблюдается только у сред, не имеющих центра симметрии. С другой стороны, создание механических напряжений в веществах, обладающих электрострикцией, но не являющихся пьезоэлектриками, не сопровождается возникновением электрической поляризации и соответственно электрического поля: в средах, обладающих центром симметрии, однородная деформация, возникающая под действием механических напряжений, вызывает однородное изменение расстояний между зарядами атомов и, следовательно, не приводит к появлению электрического момента, т.е. поляризации. Поэтому, в принципе, электрострикцию можно использовать для возбуждения звука (с удвоенной по отношению к электрическому полю частотой), но не для преобразования звуковых колебаний в электрические [28, 29].

Раздел 2/2 (воздействие – электрическое, отклик – электрический)

Изготовление полимерных электретов – тел из полимерных диэлектриков, способных длительное время находиться в наэлектризованном состоянии. Электризация полимеров в коронном разряде [30–32].

Электропроводность полимеров [33, 34].

Электроэлектретирование полимеров путем их выдержки длительное время в электрических полях высокой напряженности [35].

Раздел 2/3 (воздействие – электрическое, отклик – тепловой)

Нагревание полимеров в результате выделения джоулева тепла при прохождении тока через наполненные полимерные материалы.

Раздел 2/4 (воздействие – электрическое, отклик – химический)

Электродеградация полимерных диэлектриков. Химическое воздействие на полимер активных продуктов электрического разряда в воздухе: озон и окислы азота,

образующиеся при разрядах вблизи поверхности или внутри диэлектрика (разряд в порах), окисляют и разрушают полимер [36].

Раздел 2/5 (воздействие – электрическое, отклик – электромагнитный)

Эффект Керра – вынужденное постоянным и однородным электрическим полем двойное лучепреломление. Действие поля на молекулу обусловлено тем, что она обладает постоянным дипольным моментом и способна к статической поляризации. Электрооптический эффект используется в оптоволоконных технологиях для электрической модуляции оптических сигналов. Для этой цели в составе электрооптических модуляторов света используются полимеры с нелинейно-оптическими свойствами (NLO-polymers) [37].

Раздел 2/6 (воздействие – электрическое, отклик – магнитный)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено.

Раздел 2/7 (воздействие – электрическое, отклик – акустический)

Вращение Квинке. Эффект вращения диэлектриков в постоянном электрическом поле [38].

Раздел 3/1 (воздействие – тепловое, отклик – механический)

Тепловое расширение полимеров.

Раздел 3/2 (воздействие – тепловое, отклик – электрический)

Теплоэлектрогенераторы на основе проводящих полимеров [39].

Пироэлектрический эффект в полимерах. Пироэлектрики – кристаллические диэлектрики, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, т.е. поляризацией в отсутствие внешних воздействий. Изменение спонтанной поляризации и появление электрического поля в пироэлектриках может происходить не только при изменении температуры, но и при деформировании. Таким образом, все пироэлектрики являются пьезоэлектриками, но не все пьезоэлектрики обладают пироэлектрическим эффектом. Ниже точки Кюри пироэлектрики являются сегнетоэлектриками. Типичные представители пироэлектриков – сополимеры винилиденфторида (PVDF) [40, 41].

Раздел 3/3 (воздействие – тепловое, отклик – тепловой)

Использование полимеров в качестве теплоизоляторов.

Раздел 3/4 (воздействие – тепловое, отклик – химический)

Термохимия полимеров. Термодеструкция полимеров.

Раздел 3/5 (воздействие – тепловое, отклик – электромагнитный)

Термолюминесценция полимеров [42]. В большинстве случаев для появления термолюминесценции полимеры необходимо предварительно стимулировать: ионизирующими излучениями, УФ-светом, механическим воздействием.

Термолюминесценцию наблюдали в полиолефинах, во всех каучуках, в полиэтилентерефталате, полиамидах, полистироле, фтор- и хлорсодержащих полимерах.

Раздел 3/6 (воздействие – тепловое, отклик – магнитный)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено.

Раздел 3/7 (воздействие – тепловое, отклик – акустический)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено.

Раздел 4/1 (воздействие – химическое, отклик – механический)

Хемомеханика [43]. Наиболее известным проявлением хемомеханических эффектов является полиэлектролитное набухание полимеров при изменении химических характеристик среды. Ионизация приводит к увеличению размеров макромолекулярного клубка, деионизация – к сокращению [44].

Известны эластомерные химические резисторы – полимерные пленки, увеличивающиеся в размерах при поглощении определенных химических веществ. Хотя никаких химических реакций в таких материалах не происходит, их относят к классу химических датчиков [45]. Рост размеров этих материалов приводит к увеличению сопротивления, что и является признаком присутствия искомых газов. Как правило, эти материалы являются полимерными композитами.

Раздел 4/2 (воздействие – химическое, отклик – электрический)

Полимерные хемосенсоры. Изменение сопротивления полимерных композитов под воздействием газов и паров различных веществ [46, 47].

Раздел 4/3 (воздействие – химическое, отклик – тепловой)

Экзотермические реакции с участием полимеров.

Раздел 4/4 (воздействие – химическое, отклик – химический)

Окислительная деструкция полимеров.

Раздел 4/5 (воздействие – химическое, отклик – электромагнитный)

Хемилюминесценция полимеров [48]. Эффект состоит в испускании света, вызванного протеканием экзотермических химических реакций.

Раздел 4/6 (воздействие – химическое, отклик – магнитный)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено

Раздел 4/7 (воздействие – химическое, отклик – акустический)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено

Раздел 5/1 (воздействие – электромагнитное, отклик – механический)

Фотодеструкция полимеров.

Раздел 5/2 (воздействие – электромагнитное, отклик – электрический)

Фотоэлектретирование полимеров.

Раздел 5/3 (воздействие – электромагнитное, отклик – тепловой)

Лазерная сварка полимеров.

Раздел 5/4 (воздействие – электромагнитное, отклик – химический)

Фотохимические реакции в полимерах.

Раздел 5/5 (воздействие – электромагнитное, отклик – электромагнитный)

Фотолюминесценция полимеров.

Раздел 5/6 (воздействие – электромагнитное, отклик – магнитный)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено.

Раздел 5/7 (воздействие – электромагнитное, отклик – акустический)

Лазерная оптоакустика (фотоакустика) – генерация звука в веществе под действием света [49]. Используется, например, для диагностики полимерных композитов [50].

Раздел 6/1 (воздействие – магнитное, отклик – механический)

Пример проявления: синтезирован органический полимерный ферромагнетик на основе полидиацетилена, заметно реагирующий на поле постоянного магнита [51].

Раздел 6/2 (воздействие – магнитное, отклик – электрический)

Проявления: магнетоэлектреты [52, 53].

Раздел 6/3 (воздействие – магнитное, отклик – тепловой)

Проявление: перемагничивание полимерных композиционных материалов, содержащих ферромагнитные частицы в переменном магнитном поле происходит с выделением тепла.

Раздел 6/4 (воздействие – магнитное, отклик – химический)

Проявления изучаются магнетохимией – разделом физической химии, который изучает зависимость между магнитными свойствами и химическим строением веществ, а также влияние магнитного поля на химические свойства веществ (как то: растворимость и проч.) и на их реакционную способность. Разделом магнетохимии является спиновая химия: она вводит в химию магнитные взаимодействия. Будучи пренебрежимо малыми по энергии, магнитные взаимодействия контролируют химическую реакционную способность и пишут новый, магнитный «сценарий» реакции. Дизайн молекулярных магнетиков – одно из новых научных направлений современной химии, связанное с

синтезом систем высокой размерности. Сегодня достижения современной химии таковы, что химики могут ставить перед собой сверхзадачу – синтезировать в мягких условиях готовое изделие, как цельный макрообъект, из исходных молекулярных компонентов. При этом становятся равноправно значимыми как внутримолекулярные, так и межмолекулярные взаимодействия и связи [54, 55]. Среди применений – дискуссионное применение омагниченной воды (воду можно также рассматривать как своеобразный полимер).

Раздел 6/5 (воздействие – магнитное, отклик – электромагнитный)

Проявления: магнитооптические явления, включающие эффект Коттона-Мутона – ориентационное двойное лучепреломление в магнитном поле [56].

Раздел 6/6 (воздействие – магнитное, отклик – магнитный)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено.

Раздел 6/7 (воздействие – магнитное, отклик – акустический)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено.

Раздел 7/1 (воздействие – акустическое, отклик – механический)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено.

Раздел 7/2 (воздействие – акустическое, отклик – электрический)

Применяется в акустоэлектрических преобразователях, и в частности в полимерных пленках, используемых как чувствительные гидрофоны [57].

Раздел 7/3 (воздействие – акустическое, отклик – тепловой)

Используется при ультразвуковой сварке полимерных материалов.

Раздел 7/4 (воздействие – акустическое, отклик – химический)

Проявление – звукохимические реакции в полимерах. Деструкция и полимеризация под действием ультразвука [58].

Раздел 7/5 (воздействие – акустическое, отклик – электромагнитный)

Проявление: сонолюминесценция – явление возникновения вспышки света при схлопывании кавитационных пузырьков, рожденных в жидкости мощной ультразвуковой волной [59, 60].

Раздел 7/6 (воздействие – акустическое, отклик – магнитный)

Для полимеров использование данного сочетания не найдено.

Раздел 7/7 (воздействие – акустическое, отклик – акустический)

Данный способ трансформации энергии используется в ультразвуковой микроскопии. Облучая полимер сфокусированным ультразвуковым излучением и регистрируя отклик, можно исследовать различные включения в полимеры, скорость звука в которых отличается от скорости звука в полимерной матрице [61, 62].

Литература

1. Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges / Y. Bar-Cohen (ed.) // SPIE Press Monograph. Vol. PM136. SPIE Publications, 2004.
2. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology / F. Carpi, D. De Rossi, R. Kornbluh, R.E. Pelrine, P. Sommer-Larsen (ed.). Elsevier, 2008.
3. Madden J. Mobile Robots: Motor Challenges and Materials Solutions // Science. 2007. Vol. 318. P. 1094.
4. Shahinpoor M., Kim K.J., Mojarrad M. Artificial Muscles: Applications of Advanced Polymeric Nanocomposites. Taylor & Francis, 2007.
5. Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators / F. Carpi, E. Smela (ed.). Wiley, 2009.
6. Mirfakhrai T., Madden J., Vaughan R. Polymer Artificial Muscles // Materials Today. 2007. Vol. 10. No. 4. P. 30–38.
7. Механические свойства // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1974. Т. 2. С. 230–242.
8. Лушейкин Г.А. Полимерные пьезоэлектрики. М.: Химия, 1990. 176 с.
9. Лушейкин Г.А. Новые полимерсодержащие пьезоэлектрические материалы // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. № 6. С. 963–964.
10. Климович А.Ф., Свириденко А.И. Электрические явления при трении полимеров. Минск: Наука и техника, 1994.
11. Гуль В.Е., Лушейкин Г.А., Догадкин Б.А. Исследование электрических зарядов, возникающих при деформациях полимеров // Доклады АН СССР. 1963. Т. 149. № 2. С. 303–304.
12. Яблоков М.Ю., Кечежян А.С., Гильман А.Б., Озерин А.Н. Электретные свойства нанокпозиционных материалов на основе полипропилена // Нанотехника. 2011. № 2 (26). С. 86–88.
13. Электреты // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. С. 939.
14. Высокоэластическое состояние // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1972. Т. 1. С. 559–568.
15. Механохимия // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1974. Т. 2. С. 241–247.
16. Jacobson K., Eriksson P., Reitberger T., Stenberg B. Chemiluminescence as a tool for polyolefin oxidation studies // Long-term properties of polyolefins. Book Series: Advances in polymer science. 2004. Vol. 169. P. 151–176.
17. Camara C., Escobar J., Hird J., Putterman S. Correlation between nanosecond X-ray flashes and stick-slip friction in peeling tape // Nature. Vol. 455. No. 7216. P. 1089–U7.
18. Фотоупругость полимеров // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. С. 766–770.
19. Wolna M. Polymer materials in practical uses of photoelasticity // Optical engineering. 1995. Vol. 34. No. 12. P. 3427–3432.

20. Баженов С.Л., Кечекьян А.С. Критерии появления механических автоколебаний при росте шейки в растягиваемой полимерной пленке // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2001. Т. 43. № 1. С. 63-72.
21. Песчанская Н.Н., Якушев П.Н., Шпейзман В.В., Смолянский А.С., Шведов А.С., Черемисов В.Г. Неоднородность скорости деформации полимерных материалов с разной надмолекулярной структурой // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 9. С. 1837–1840.
22. Electroactive Polymers for Robotic Applications / K.J. Kim, S. Tadokoro (eds.). L.: Springer-Verlag, 2007. 281 p.
23. Carpi F., Chiarelli P., Mazzoldi A., De Rossi D. Electromechanical characterisation of dielectric elastomer planar actuators: Comparative evaluation of different electrode materials and different counterloads // Sensors and Actuators A. 2003. Vol. 107. Is. 1. P. 85–95.
24. Cheng H., Zhang Q., Antal J. Nematic anisotropic liquid-crystal gels self-assembled nanocomposites with high electromechanical response // Advanced Functional Materials. 2003. Vol. 13. No. 7. P. 525–529.
25. Kaneto K., Kaneko M., Min Y., MacDiarmid A.G. Artificial muscle (electromechanical actuators using polyaniline films) // Synthetic Metals. 1995. Vol. 71. P. 2211–2212.
26. Xia F., Tadigadapa S., Zhang Q.M. Electroactive polymer based microfluidic pump // Sensors and Actuators. 2006. Vol. A125/2. P. 346–352.
27. Ashley S. Artificial muscles // Scientific American. 2003. Oct. P. 52–59.
28. Pelrine R.E., Kornbluh R.D., Joseph J.P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation // Sensors and Actuators. 1998. Vol. A64. P. 77–85.
29. Zhang Q.M., Bharti V., Zhao X. Giant electrostriction and relaxor ferroelectric behavior in electron-irradiated poly(vinylidene fluoridetrifluoroethylene) copolymer // Science. 1998. Vol. 280. P. 2101–2104.
30. Губкин А.Н. Электреты. М.: Наука, 1978. 192 с.
31. Электреты / Под ред. Г. Сесслера. М.: Мир, 1983. 487 с.
32. Лущейкин Г.А. Полимерные электреты. М.: Химия, 1984. 184 с.
33. Лущейкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров. М.: Химия, 1988. 160 с.
34. Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров. М.: Физматлит, 2008. 378 стр.
35. Электреты // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. С. 939.
36. Робежко А.П., Бажов В.Ф., Ефремова Г.В. Кинетика разрушения твердых полимеров при длительном нагружении электрическим полем // Физика твердого тела. 1981. Т. 23. Вып. 11. С. 3360–3365.
37. Cho M., Choi D., Sullivan P., Akelaitis A., Dalton L. Recent progress in second-order nonlinear optical polymers and dendrimers // Progress in polymer science. 2008. Vol. 33. Iss. 11. P. 1013–1058.
38. Antal M., Filipcsei G., Zrinyi M. Direct observation of Quincke rotation of disk shaped polymer composites in a uniform DC electric field // Composites science and technology. 2007. Vol. 67. Iss. 13. P. 2884–2885.
39. Bubnova O., Khan Z.U., Malti A., Braun S., Fahlman M., Berggren M., Crispin X. Optimization of the thermoelectric figure of merit in the conducting polymer poly(3,4-ethylenedioxythiophene) // Nature Materials. 2011. Vol. 10. P. 429–433.
40. Солнышкин А.В., Морсаков И.М., Канарейкин А.Г., Богомолов А.А. Пироэлектрический эффект в композитах на основе сополимера P(VDF-TrFE) и

- сегнетоэлектрической керамики ЦТБС // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 9. С. 1343–1346.
41. Керимов М.К., Курбанов М.А., Агаев Ф.Г., Мусаева С.Н., Керимов Э.А. Пироэлектрический эффект в композитах, кристаллизованных в условиях действия плазмы электрического разряда // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. № 4. С. 686–690.
 42. Термолюминесценция // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. С. 618–619.
 43. Хемомеханика // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. С. 820–821.
 44. Nemat-Nasser S., Wu Y. Electromechanical response of ionic polymer metal composites // Journal of Applied Physics. 2000. V. 87. Iss.7. P. 3321–3331.
 45. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник. М.: Техносфера, 2006. 592 с.
 46. Толпыгин И.Е., Цуканов А.В., Дубонос А.Д., Ревинский Ю.В., Федянина А.Ю., Брень В.А. Хемосенсорные полимерные материалы для детектирования анионов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3.
 47. Брень В.А. Реакции образования комплексов краунсодержащих хемосенсоров с катионами, анионами и молекулами / В.А. Брень, А.Д. Дубонос, А.В. Цуканов, В.И. Минкин // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2009. Т. 53. № 1. С. 42–53.
 48. Хемилюминесценция // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. С. 819–820.
 49. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991.
 50. Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б. Неразрушающий контроль дефектов структуры графитопоксидных композитов лазерным ультразвуковым методом // Механика композитных материалов. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–838.
 51. Коршак Ю.В., Овчинников Ю.А., Шапиро А.М., Медведева Т.М., Спектор В.Н. Органический полимерный ферромагнетик // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 43. № 6. С. 309–311.
 52. Лачинов А.Н., Воробьева Н.В. Электроника тонких слоев широкозонных полимеров // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1249–1266.
 53. Tewari A., Qureshi M., Dubey R., Malik M. Study of Relaxations in Poly(methyl methacrylate)-Magneto Electrets by Thermally Stimulated Depolarization Current and Surface-Charge-Decay Mechanisms // Journal of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 122. Iss. 1. P. 29–34.
 54. Вульфсон С.Г. Молекулярная магнетохимия. М.: Наука, 1991. 262 с.
 55. Talham D.R., Meisel M.W. Thin films of coordination polymer magnets // Chemical Society Reviews. 2011. Vol. 40. Iss. 6. P. 3356–3365.
 56. Магнитооптические явления // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1974. Т. 2. С. 504.
 57. Lang S., Muensit S. Review of some lesser-known applications of piezoelectric and pyroelectric polymers // Applied physics A: Materials Science & Processing. 2006. Vol. 85. Iss. 2. P. 125–134.
 58. Маргулис М.А. Основы звукохимии. Химические реакции в акустических полях. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.
 59. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция. М.: Химия, 1986.
 60. Маргулис М.А. Сонолюминесценция // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 3. С. 263–287.

61. Ениколопов Н.С., Колосов ОБ., Лагутенкова (Маева) Е.Ю., Маев Р.Г., Новиков Д.Д. Изучение гетерогенности полимерных смесей методом сканирующей акустической микроскопии // Доклады АН СССР. 1987. Т. 292. № 6. С. 1418–1422.
62. Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука, 1977. 377 с.