

Х.А. АБДУЛЛИН¹, Б.Н. МУКАШЕВ²

(¹Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа КазНУ им. аль-Фараби
МОН РК, г. Алматы, Казахстан; ²Физико-технический институт, г. Алматы, Казахстан)

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Проведен обзор исследований последних лет по развитию технологий в области материаловедения и получения новых материалов. Акцент сделан на технологии создания углеродных наноматериалов - углеродные нанотрубки (УНТ) и графен, и на технологии создания оксидных наноструктурированных полупроводников, имеющих большие перспективы для применения в солнечной энергетике, сенсорике, катализе. Рассмотрены работы по способам синтеза УНТ, таким, как химическое осаждение из пара, с дополнительным воздействием плазмой, с применением реакторов псевдокипящего слоя, которые являются наиболее перспективными для крупномасштабного применения.

Рассмотрены вопросы применения УНТ, графена, композитов на их основе, уже получившим широкое применение. Сделан краткий обзор технологий создания широкого класса материалов на основе ZnO и их применения в светодиодах, в газовых, химических, биосенсорах и других устройствах.

Ключевые слова: полупроводниковая электроника, фотоника, плазмоника.

Тірек сөздер: жартылай өткізгішті электроника, фотоника, плазмоника.

Keywords: semiconductor electronics, photonics, plasmonics, solar cells.

1 Введение

Наноструктурированные материалы, благодаря размерным эффектам и большому вкладу поверхности, обладают свойствами, значительно отличающимися их от объемного материала. Свойствами наноструктурированных материалов можно управлять в широких пределах путем изменения характерных размеров морфологии и состояния поверхности.

Благодаря уникальному набору характеристик, наноструктурированные материалы находят многочисленные применения для создания приборных структур, новых материалов, различных композитов. Научно-практический интерес к наноматериалам

обуславливает большое число работ и публикаций. Здесь мы дадим краткий обзор исследований последних лет, в основном за период 2010-2012, по применению нанотехнологий в области материаловедения и получения новых материалов. Поскольку эта область исследований весьма обширна и интенсивные исследования проводятся по всем направлениям, акцент будет сделан на технологии создания углеродных материалов (углеродные нанотрубки, графен, углеродные композиты) и оксидных наноструктурированных полупроводников.

2 Углеродные материалы

Углеродные нанотрубки (УНТ), одностенные (ОУНТ) и многостенные (МУНТ), обладают рядом уникальных свойств. У них высокая механическая прочность на разрыв, модуль Юнга ОУНТ может достигать величин порядка $(1\div 5)\times 10^{12}$ Па, что на порядок больше, чем у стали. УНТ имеют высокую электро- и теплопроводность, термо- и химическую стойкость. В зависимости от строения УНТ имеют полупроводниковый либо металлический характер электрической проводимости, поэтому могут использоваться как в полевых транзисторах, так и для межсоединений. УНТ исследуются с 1990-х годов, разработаны различные способы синтеза УНТ, исследованы их свойства и предложены применения в различных областях, таких как создание приборных полупроводниковых структур на полевых транзисторах, полевые эмиттеры, газовые датчики, солнечные элементы, различные композитные материалы, суперконденсаторы, катализаторы и пр. [1-9]. В связи с расширением области применения УНТ актуальность исследований по разработке простых, эффективных и низкоч затратных способов их синтеза не понижается.

Традиционными способами получения УНТ являются лазерная абляция, дуговой разряд, химическое осаждение из пара (CVD). Метод CVD, а также его модификации: с дополнительным воздействием плазмой (PECVD) и с применением реакторов псевдокипящего слоя, являются наиболее перспективными для крупномасштабного применения [10-12]. В методе CVD происходит пиролиз углеродсодержащего газа и растворение углерода в наночастицах катализатора, которыми часто выступают материалы с высокой растворимостью углерода (Fe, Co, Ni). При насыщении каталитических частиц углеродом происходит распад твердого раствора с выделением углерода в виде УНТ. Метод CVD используется для промышленного получения УНТ и непрерывно совершенствуется. Для синтеза УНТ методом CVD требуется надежный контроль ряда параметров. Размер частиц катализатора играет определяющую роль в получении одностенных УНТ. Поэтому много работ посвящено различным способам получения катализатора с необходимыми для роста УНТ свойствами.

Перспективным методом является синтез частиц катализаторов из газовой фазы с использованием летучих соединений металлов, например, пентакарбонил железа или ферроцен. Введение газообразных прекурсоров и их пиролиз с образованием наночастиц катализаторов можно проводить в восстановительной атмосфере непосредственно в процессе CVD. При этом легко добиться синтеза МУНТ. Для получения ОУНТ необходим более точный подбор параметров процесса синтеза. В работе [13] проведено сравнение применения пентакарбонила железа и ферроцена для синтеза ОУНТ. Ферроцен оказался

более эффективным для формирования частиц катализатора, так как пентакарбонил железа разлагается при более низких температурах, что приводит к чрезмерному росту частиц катализатора. При разложении железосодержащих молекул-предшественников электронным пучком обнаружено [14], что наночастицы Fe, изготовленные из $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$, были более активны по сравнению с $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$, к тому же в последнем случае соосажденный углерод не может быть удален путем нагрева в водороде.

Как известно, катализатор постепенно теряет свою активность в течение CVD синтеза УНТ. В [15] показано, что присутствие водорода не влияет на начальную скорость реакции, однако замедляет скорость образования аморфного углерода. Это приводит к более высокой относительной удельной производительности УНТ в водородной атмосфере.

В [16] для создания наночастиц катализатора Ni предложен метод электрохимического осаждения на постоянном токе. Получены частицы никеля размером ~35 нм с преимущественной ориентацией (111) на поверхности графита. В [17] осаждение каталитического слоя кобальта проведено методом электрофореза на нержавеющей стали, средний размер частиц кобальта был 10-20 нм. Нано-катализаторы Fe можно получать методом пульверизации хлоридом железа на подложку [18]. В [19] предлагается синтезировать катализаторы из металлокластеров Мюллера на основе молибдена и молибдена-железа. В работе получены ОУНТ диаметром от 0.95 до 2.1 нм, но невысокая селективность по диаметру полученных ОУНТ может быть следствием испарения или агломерации каталитических кластеров. Для создания наночастиц катализаторов для ОУНТ используются цеолиты, имеющие одинаковые нанометровые отверстия в кристаллической структуре [20].

Исследован синтез УНТ в нанопористом оксиде алюминия как матрице [21]. Метод позволяет получать переплетенные УНТ с контролируемым диаметром (так как поры в Al_2O_3 расположены параллельно и имеют одинаковый размер, определяемый напряжением анодирования) и с открытыми концами.

Массовое низкочатратное производство УНТ является важной задачей, и в течение последних лет достигнут значительный прогресс в разработке новых CVD методов для коммерческого производства. Весьма перспективным является использование реакторов с псевдооживленным или кипящим слоем (FBCVD). Метод основан на пропускании углерод-содержащего газа и газа-носителя через вертикальный реактор, заполненный частицами катализатора на каком-либо подходящем носителе. В этом случае катализатор находится в подвешенном состоянии и омывается со всех сторон газом, что многократно увеличивает выход реакции синтеза. Проблемы FBCVD синтеза - повышение выхода, чистоты и селективности роста УНТ, обсуждаются в [22-25], достигнут выход ОУНТ более 90 масс. %.

Пламенные методы синтеза также пригодны для массового производства УНТ и рассматриваются в качестве жизнеспособного альтернативного метода. Объемное пламя является средой, богатой химически активным углеродом, способной генерировать наноструктуры в течение короткого времени в непрерывном процессе. В попытках добиться контролируемого роста были протестированы различные конфигурации

пламени, виды топлива и каталитические материалы, широкий диапазон технологических условий [26- 30], синтезированы вертикально упорядоченные слои МУНТ.

В [31] методом лазерной абляции при атмосферном давлении в инертной атмосфере были синтезированы одностенные УНТ, а методом синтеза в дуговом разряде [32] получен селективный рост ОУНТ с заданным диаметром, что является важным для различных применений. Низкозатратным методом пульверизации и пиролиза растворов металлоорганических соединений в растворителях (н-пентан, н-гексан, н-гептан и н-октана) были синтезированы упорядоченные УНТ [33].

В настоящее время в мире ежегодно образуется большой объем пластиковых отходов, поэтому разрабатываются различные способы их утилизации. Привлекательным является получение продуктов с высокой удельной себестоимостью и энергоемкостью, например, УНТ и нановолокна. В работах [34-39] приведен обзор методов производства УНТ с использованием пластиковых полимеров в качестве углеродного сырья.

УНТ, состоящие из двух концентрических цилиндрических слоев графена с расстоянием между слоями около 0.41 нм, то есть нанотрубки с двойными стенками (ДУНТ), имеют свойства, промежуточные между ОУНТ и МУНТ. Внешнюю стенку ДУНТ можно модифицировать и функционализировать, в то время как внутренняя сохраняет свою целостность и свойства. В последние годы ДУНТ привлекают повышенное внимание [40], поскольку их электрические и механические свойства имеют преимущества по сравнению с другими типами углеродных нанотрубок. Были разработаны разнообразные методы для селективного получения ДУНТ, в том числе коалесценция фуллеренов [41], каталитическое разложение углеводородов [42-45] и метод дугового разряда [46].

Область использования УНТ постоянно расширяется. Одной из областей, товары которой созданы с применением УНТ, уже дошли до широкого потребителя, являются композитные пластики. УНТ являются наиболее прочными из существующих искусственных материалов, и уже небольшие добавки УНТ значительно изменяют свойства полимеров: увеличивается прочность, теплопроводность, появляется электропроводность. Качество композитов определяется способом диспергирования УНТ в матрице полимера и функционализацией поверхности стенок УНТ [47-49]. Высокая прочность и жесткость при низкой плотности позволяет использовать композиты на основе УНТ во многих практических применениях (аэрокосмическая отрасль, спортивные товары, автомобили, медицинское оборудование, и т.д.) [50-52].

Распространенным методом химического связывания УНТ и полимерных цепочек является создание полимеров с реакционными группами или радикалами (на основе азидо-, силоксан-, карбоксильных и др. функциональных групп), способными создавать связь с УНТ [53-54]. Дефекты на поверхности УНТ повышают их химическую активность.

Распространенными методами получения композитов УНТ-полимер с высокой дисперсией является растворение обоих компонентов в подходящем растворителе, ультразвуковая обработка и перемешивание, механический размол, перемешивание в расплаве, *in situ* полимеризация [53, 55], создание водорастворимых дисперсий с УНТ [56]. В [57] сообщается о композите на основе УНТ/поливиниловый спирт со свойствами, не уступающим одному из самых прочных природных материалов – паутине. В [58]

рассмотрено упрочнение волокон и композитов на различных иерархических структурных уровнях (1-D, 2-D и 3-D), в [59] изучены методы трехмерного укрепления композитов с использованием упорядоченно распределенных УНТ, выращенных *in situ* на поверхности волокон углеродной ткани и полимера, что обеспечило значительное трехмерное армирование.

Методы химической функционализации значительно эффективней для улучшения структурных свойств композитов на основе УНТ, а методы физической функционализации – для электрических свойств [55]. Перколяционный порог, при котором происходит резкий рост электропроводимости композита, при добавлении УНТ весьма мал – менее 0.1% вес. При таких концентрациях УНТ все остальные свойства полимера остаются неизменными либо меняются весьма незначительно, и открывается возможность создания прозрачных и проводящих покрытий, электростатической защиты, электростатических красок, покрытий для экранирования электрических помех и поглощения СВЧ мощности. Введение УНТ в полимеры понижает электрическое сопротивление с $\sim 10^{16} \Omega \times \text{см}$ до $100 \Omega \times \text{см}$ при введении 1-1.5 весовых %, при этом теплопроводность растет в 6-8 раз [54]. Композиты на основе оргстекла (полиметилметакрилат (PMMA)), с различным содержанием УНТ, могут быть использованы для электромагнитного экранирования [60]. Композиты УНТ/целлюлоза имеют проводимость на постоянном токе до 671 См/м и экранирование в диапазоне частот 5-10 ГГц до 50 дБ [61]. Композиты на основе УНТ/поликарбонат обладают тензочувствительностью электрического сопротивления под нагрузкой [62] из-за туннельного эффекта между УНТ. Введение УНТ в другой практически важный полимер фторопласт-2 [63] при плазменной обработке с фторированием повышает прочность полимера. Эффект одностенных УНТ на улучшение механических свойств композитов более выражен, чем многостенных УНТ [64], что обусловлено более высоким аспектным отношением, более низким уровнем примесей, лучшими механическими свойствами ОУНТ и более эффективным взаимодействием с полимером. Разрабатываются композитные керамики на основе УНТ [65-66].

Перспективны УНТ и для применения в катализе как материал-носитель [67]. Для создания центров закрепления металлических нанокластеров на поверхности необходима функционализация УНТ [68]. Эффективно взаимодействие УНТ с полимерами и полиэлектролитами [69], закрепление наночастиц путем создания слоев молекул на поверхности УНТ, скрепленных электростатическим притяжением, путем легирования УНТ [70-71], электрохимическое осаждение [72-73]. Обычно химическое осаждение ограничено металлами с потенциалом выше, чем у УНТ. Однако ограничение на осаждение Cu, Ag и других металлов может быть снято, если УНТ находятся на подложке из металла с низким потенциалом.

Графен является 2D кристаллом - графеновой плоскостью, представляющей собой одноатомный слой углеродных атомов, из которого составлена структура графита. Известно, что 2D кристаллы термодинамически неустойчивы, тепловые флуктуации приводят к сдвигу атомов в поперечном направлении, и большие 2D кристаллы должны сворачиваться в трубочку. Однако структура реальных 2D кристаллов может стабилизироваться локальными искажениями [74] либо путем взаимодействия с подложкой. Интенсивно изучаемый в последнее время 2D-материал графен [75-78]

обладает уникальными свойствами. Это самый тонкий и самый прочный материал (в 200 раз прочнее стали, теоретически 1 кв. метр при собственном весе 0.77 мг может выдержать 4 кг веса), с самой большой удельной поверхностью, самый гибкий, с самой большой теплопроводностью и проводимостью, с самой высокой подвижностью электронов (электроны в графене - это безмассовые релятивистские частицы). Двухслойный графен является полупроводником с управляемой шириной запрещенной зоны. Графен растягивается на 20-30 процентов и обладает высокой прозрачностью. Интересно, что коэффициент поглощения видимого света слоем графена определяется постоянной толщиной структуры и не зависит от длины волны, составляя примерно 2% [75].

Естественно, что уникальные свойства графена определяют его широкое потенциальное использование в самых различных областях. Поэтому идет интенсивное исследование свойств графена, а также развитие методов его синтеза. Уже сейчас графен используется в различных устройствах. В [79] получены 30-дюймовые пленки графена с сопротивлением $125 \text{ Ом}/\square$ и прозрачностью 97.4%. Четырехслойные графеновые пленки имели сопротивление $30 \text{ Ом}/\square$ и прозрачность 90%, что сопоставимо с параметрами ITO слоев. Из-за высокой прочности слои графена перспективны для сенсорных панелей дисплеев. Электрические свойства графена чрезвычайно чувствительны к количеству слоев, структуре края слоя, неровности слоя, дефектами, легированию и пр. [80]

Графен обладает огромной удельной площадью (площадь единицы массы материала). Теоретическая удельная площадь одной стороны графена равна $1315 \text{ м}^2/\text{г}$, такая же, как у ОУНТ, реальные слои графена имеют меньшую удельную площадь из-за агломерации и наложения слоев. Высокая удельная площадь графена позволяет создавать суперконденсаторы [81-83] с высокой удельной емкостью, плотностью энергии (сопоставимой с Ni металл-гидридными батареями) и стабильностью, топливные ячейки [84], катализаторы реакций восстановления [85], аноды для литий-ионных аккумуляторов [86]. Обзоры по топливным ячейкам, анодам для электрических аккумуляторов и суперконденсаторам на основе графена представлены в работах [87-89], а обзор работ до 2010 г. по транзисторам на графене представлен в [90].

В последнее время предложены новые конструкции полевых транзисторов на графене [91]. В работе [92] представлен монолитный транзистор на основе системы эпитаксиального графена на SiC (0001). Показано, что отношение сопротивления в выключенном и включенном состоянии превышает 10^4 . В процессе изготовления транзистора, диода, резистора – то есть всех компонентов интегральной схемы требуется только один этап литографии. При этом внутри схемы отсутствуют металлические соединения. Таким образом, электроника вплотную приблизилась к переходу с кремния на графен.

3 Материалы на основе ZnO и родственных соединений

Полупроводниковые материалы, такие как кремний, германий, AIIIIV, соединения AIIIIV, оксиды TiO₂, SnO₂, In₂O₃ и другие полупроводники, чаще всего используются в виде объемных материалов и тонких пленок. Однако диапазон практических использований и потенциальных применений полупроводников резко расширился, когда

их стали синтезировать в форме наноматериалов. На сегодня наноматериалы нашли применение в оптоэлектронике, солнечных элементах, газовых датчиках, различных сенсорах и пр. Для широкого практического применения актуальна разработка эффективных методов синтеза. В настоящем разделе рассматриваются недавние разработки в области синтеза и применения наноструктурированных материалов на примере оксида цинка и родственных ему соединений.

Наноструктурированные полупроводники АПВIV могут синтезироваться различными методами, простейшим из которых является синтез из растворов. Образование кристаллов в растворе можно разделить на два этапа: образование зародышей (нуклеация) кристаллов и последующий рост кристалла из зародыша. Поэтому нуклеация кристаллитов и темп роста кристаллов ответственны за формирование частиц ZnO с различной морфологией. Детали реакции зависят от применяемых прекурсоров, концентрации, pH и температуры. Очевидно, что такой метод синтеза имеет высокую экономическую эффективность. Гидротермальный метод позволяет получать материал различной морфологии, например, стержни ZnO [93-94] или полые микросферы ZnO [95-96]. В этом методе возможна стимуляция роста ультразвуком без применения специального нагрева [97] либо микроволновым излучением [98-99].

Газофазный синтез методом CVD также является перспективным, поскольку имеется возможность организации поточного производства. В ряде недавних работ [100-102] продолжено развитие этого метода для синтеза наноструктурированного ZnO. В [103] методом CVD синтезированы композиты, состоящие из гребенчатых лент CdS, на которых выращены наностержни ZnO. Полученные гетероструктуры являются монокристаллическими и при комнатной температуре демонстрировали яркую зеленую полосу фотолюминесценции. Метод пиролиза аэрозоля [104] позволяет получать однофазные композиты даже за границами растворимости при комнатной температуре. Для синтеза ZnO и других соединений АПВVI используется метод электроосаждения [105], спекания керамики [106], электроспиннинг [107].

Материалы АПВIV обладают хорошими люминесцентными свойствами, что позволяет использовать их в люминофорах, квантовых точках, светодиодах и лазерах. Спектры ФЛ пленок ZnO обычно состоят из суперпозиции двух основных линий фотолюминесценции: линии ФЛ вблизи края зоны при ~ 378 нм при комнатной температуре, вызванной рекомбинацией экситонов [108], и широкой полосы в видимом диапазоне излучения при $\sim 500-700$ нм, возникающей благодаря рекомбинации на дефектах (междоузельный кислород, вакансии Zn, вакансии кислорода и др.). Различными методами можно управляемо контролировать сдвиг ФЛ в красную или синюю сторону [109-111]. Эффективная электролюминесценция в ZnO остается трудной задачей, так как синтез ZnO p-типа проводимости трудно реализовать. Поэтому имеется сравнительно небольшое число публикаций по электролюминесценции в ZnO [112-116]. В связи с трудностью достижения эффективной ФЛ в ZnO предложены приборные композитные структуры на основе ZnO [117-119].

Структуры из наностержней, нанонитей и др. имеют большие перспективы для создания приборных структур, оптоэлектронных и пьезоэлектрических устройств и датчиков [120]. Предлагаются методы интеграции транзисторов и датчиков на наноструктурах [121],

конструкции наноразмерных газовых датчиков на основе отдельного наностержня ZnO (100 нм в диаметре) [122]. Развиваются методы выстраивания структур из нанонитей для подводки к ним металлических электродов [123].

Большое внимание привлекают сенсоры на ZnO, которые имеют большую удельную площадь поверхности, хорошую биосовместимость, высокую подвижность электронов и пьезоэлектрические свойства, поэтому могут быть основой для создания газовых, химических, био- сенсоров, УФ-приемников, основанных на различных механизмах работы [124].

Газочувствительность наноструктур из ZnO к восстановительным газам основана на адсорбции молекул газов (H_2 , CO, CO_2 , H_2S , NH_3 и CH_4) на поверхности, их реакции с адсорбированными ионами O_2^- , O^- и O_2^- с высвобождением электронов с поверхности наноструктур ZnO в объем и увеличении проводимости датчика. Окислительные газы, такие как NO_2 , NO, O_3 и O_2 , также могут быть обнаружены с помощью наноструктур ZnO, но механизм в этом случае противоположный, с блокированием электрона из объема и увеличением сопротивления датчика. С помощью сенсоров на основе наноструктур ZnO могут быть обнаружены такие химические газы, как метанол, этанол, ацетон, бутан, диметиламин, триэтиламин, хлорбензол, и сжиженный нефтяной газ [125-126]. Благодаря своей биосовместимости, стабильности и высокой изоэлектрической точке, ZnO наноструктуры широко используется для обнаружения таких биообъектов, как мочевины, ДНК, холестерин, углеводный антиген [127], глюкоза [128-129], газообразный метан [130], CO [131], водород [132-133], NO_2 [134], этанол, NO_2 , CO и H_2S [135], диметиламин [136] и др. Изменение потенциала поверхности на границе раздела наностержня ZnO/жидкость при воздействии полярных жидкостей может быть использовано для создания внутриклеточного pH датчика [125] и ультрафиолетового детектора [125].

Практический интерес представляют оксидные полупроводниковые керамики на основе ZnO для варисторов, УФ-источников, акустических устройств, сенсоров и др. При синтезе керамики достаточно легко можно добиться контроля свойств над структурными, электрическими и оптическими свойствами [106]. Варисторы из ZnO широко используются для защиты цепей благодаря нелинейным электрическим характеристикам, обусловленным эффектами на границах зерен. Существует высокий спрос на варисторы с напряжением пробоя 100 тысяч вольт, изготовление которых по обычной технологии приведет к неприемлемо большой толщине. В [137] был получен варистор из ZnO с добавками Al_2O_3 с напряжением пробоя до 1160 В/см. Простой и чувствительный к формальдегиду датчик был изготовлен спеканием керамики из порошка ZnO с органическим наполнителем [138]. Близкий метод создания датчиков для обнаружения этанола применен в [139] путем спекания мелкодисперсных порошков SnO_2 , ZnO, полученных гидротермальным методом.

Разрабатываются микро-электро- механические системы, в частности, пьезоэлектрические генераторы [140]. Композиты на основе оксида цинка и карбонила железа предлагается использовать в качестве материала для поглощения микроволнового излучения на частотах 7-17 ГГц [141].

Биосенсоры на основе ZnO с прямым переносом электронов имеют высокую селективность и демонстрируют огромный потенциал для применения в здравоохранении и мониторинге окружающей среды [142], а эксплуатационные возможности биосенсоров из ZnO позволяют достичь чувствительности обнаружения вплоть одной молекулы [143].

Наноструктурированный ZnO может действовать как подложка для усиления флуоресценции биомолекул и рамановского отклика. Биосенсор на основе нанокompозита ZnO-Au с использованием поверхностного плазменного резонанса позволил улучшить в 16 раз предел обнаружения иммуноглобулина методом рамановского рассеяния [142]. Квантовые точки из ZnO [144] являются отличными количественными метками для биологических исследований благодаря их высокому аспектному отношению и существенному оптическому и электронному усилению сигнала. В силу своей биосовместимости, ZnO наноструктуры были использованы для доставки лекарств, очистке ДНК, реакции репликации ДНК и доставки генов. Наноструктуры ZnO могут вызывать прямую электрохимию ферментов [142]. Высокая изоэлектрическая точка ZnO способствует физической иммобилизации на поверхности биомолекул (глюкоза-оксидаза, холестерин-оксидаза, тирозиназы и др.). При иммобилизации нуклеиновых кислот на ZnO достигнута высокая плотность точек связывания, что делает ZnO перспективным кандидатом для изготовления ДНК-микрочипов [145].

Пьезоэлектрические биосенсоры на системе наностержней ZnO могут быть созданы на основе объемного резонанса и поверхностных акустических волн для обнаружения аналитов, которые не могут быть обнаружены традиционными датчиками [142]. В [146] описан датчик влажности на поверхностных акустических волнах с использованием наностержней ZnO, выращенных гидротермальным методом.

Наночастицы и композиты на их основе благодаря уникальным поверхностным свойствам обладают сильными антибактериальными свойствами. ZnO является бактерицидным и ингибирует как грамположительные, так и грамотрицательные бактерии, что можно использовать для подавления или устранения активности микроорганизмов, например, в текстильной продукции [147], в целлюлозе [148]. В [149] подтверждается антибактериальная активность наночастиц ZnO даже при нанесении на их поверхность различных стабилизирующих агентов для предотвращения коагуляции. Гели для инженерии костной ткани, доставки лекарств, иммобилизации белка и др. с наночастицами ZnO демонстрируют значительную антибактериальную активность [150]. Хорошие фотокаталитические свойства и антибактериальную активность против бактерий кишечной палочки демонстрируют тонкие прозрачные пленки ZnO на стекле [151]. Композиты Ag/TiO₂/ZnO имеют высокие каталитические и антибактериальные свойства [152]. При внедрении наночастиц ZnO в полимеры достигается улучшение водоотталкивающих характеристик и эффект самоочистки поверхности [153].

Высокая фотокаталитическая активность необходима для водородной энергетике, поэтому многофункциональные материалы, способные выступать в качестве основы для генерации водорода, являются весьма востребованными. В [154] сообщается о разработанной системе на основе наночастиц серебра и ZnO, в которой происходит генерация водорода из воды при освещении естественным светом. Аналогичные способности фотоактивированного расщепления воды были обнаружены в тонких пленках массива наностержней ZnO, легированных Al и обработанных водородом [155]. В [156] созданы

наноструктуры ядро/оболочка ZnO/CuInS₂ на основе тонких пленок массива наностержней, в созданной системе возможно фотоэлектрохимическое расщепление воды.

Фотокаталитическая способность весьма важна в борьбе с загрязнением окружающей среды. Как правило, процессы фотокаталитической деградации, приводящие к разложению органики, эффективны при высокой подвижности фотогенерированных носителей (дырок и электронов) и глубокой валентной зоне полупроводника [157].

Оксиды титана [158] и цинка являются сильным и широко применяемыми фотокаталитическими материалами. В [159] рассмотрено удаление фенола с использованием нанокомпозитов на основе ZnO и бентонитовой глины. В работе [160] показано, что композитные ZnO/SnO₂ фотокатализаторы более эффективны, чем чистые ZnO или SnO₂ фотокатализаторы. В [161] композитные пластины ZnO/TiO₂ были эффективными катализаторами в процессе обесцвечивания красителя (Remazol Brilliant Red F3B) и его распада на более мелкие фрагменты. Фотокаталитическая активность ZnO может быть увеличена при добавлении меди [162], лития [163], при легировании серой [164], в композитах Ag/ZnO [165], ZnO/CuO [166], ZnO-SnO₂ [167].

При разработке технологий мембранной фильтрации очистки воды основной проблемой является зарастание отверстий и выход мембраны из строя. Использование наноматериалов с наночастицами ZnO для создания мембран [168] демонстрирует их широкие возможности для очистки воды, ее дегазации и дезинфекции [169], для противообрастающих добавок [170]. В [171] разработаны многофункциональные мембраны с высокой способностью удаления загрязняющих веществ, их фотодegradацией, а также с высокими антибактериальными свойствами.

Большое число работ посвящено изготовлению солнечных элементов (СЭ) на ориентированных структурах из наностержней ZnO [172], нанотрубок ZnO и TiO₂ [173], наноструктур TiO₂/ZnO типа ядро/оболочка [174]. Пока эффективность преобразования СЭ остается на уровне ~1% [175]. В СЭ на красителях с матрицей на основе ZnO достигнут к.п.д. более 5% [176-177], что ниже, чем у аналогичных СЭ из TiO₂.

Полимерные СЭ [178] привлекают большое внимание благодаря низкой стоимости, гибкости конструкции. В работе [179] созданы гибридные СЭ на кремниевых нанонитях, в свою очередь покрытых наностержнями ZnO в качестве антиотражающего покрытия. Такие СЭ имели эффективность преобразования на 25% выше, чем без антиотражающего слоя из ZnO. ZnO перспективен в качестве проводящего и прозрачного анода с низкой стоимостью [180-186].

Таким образом, практическое применение наноматериалов затрагивает все более широкие области, что обуславливает возрастающий интерес к исследованиям свойств наноматериалов и разработке эффективных методов их синтеза.

литература

- 2 Saito, R., G. Dresselhaus, et al. (1998). *Physical Properties of Carbon Nanotubes*. Singapore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- 3 Дьячков П. Н. Углеродные нанотрубки. Структура, свойства, применения. БИНОМ. Лаборатория знаний (2006) 296 стр.
- 4 Hui Qian, Emile S. Greenhalgh, Milo S. P. Shaffer and Alexander Bismarck. Carbon nanotube-based hierarchical composites: a review. *J. Mater. Chem.*, 2010, 20, 4751-4762
- 5 Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. – М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
- 6 Yun Wang and John T. W. Yeow A Review of Carbon Nanotubes-Based Gas Sensors. *Journal of Sensors* 2009 (2009) 1-24, doi:10.1155/2009/493904
- 7 Mukul Kumar and Yoshinori Ando. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* Vol. 10, 3739–3758, 2010
- 8 Tsuneya Ando. The electronic properties of graphene and carbon nanotubes. *PG Asia Materials* (2009) 1, 17–21; doi:10.1038/asiamat.2009.1
- 9 Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Charlier J. C. and Hernandez E. Electronic, thermal and mechanical properties of carbon nanotubes. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* (2004) 362, 2065–2098
10. HUANG JiaQi, ZHANG Qiang, ZHAO MengQiang & WEI Fei. A review of the large-scale production of carbon nanotubes: The practice of nanoscale process engineering. *Chinese Science Bulletin* 57 (2012) No.2-3, pp. 157-166.
- 11 Keun Su Kim, German Cota-Sanchez, Christopher T Kingston, Matej Imris, Benoit Simard and Gervais Soucy. Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by induction thermal plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 (2007) 2375 [doi:10.1088/0022-3727/40/8/S17](https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/8/S17).
- 12 Morinobu Endo, Takuya Hayashi, and Yoong-Ahm Kim. Large-scale production of carbon nanotubes and their applications *Pure Appl. Chem.*, Vol. 78, No. 9, pp. 1703–1713, 2006
- 13 Anna Moisala, Albert G. Nasibulin, David P. Brown, Hua Jiang, Leonid Khriachtchev, Esko I. Kauppinen. Single-walled carbon nanotube synthesis using ferrocene and iron pentacarbonyl in a laminar flow reactor. *Chemical Engineering Science* 61 (2006) 4393 – 4402.
- 14 See Wee Chee, Renu Sharma. Controlling the size and the activity of Fe particles for synthesis of carbon nanotubes. *Micron* 43 (2012) 1181–1187.
- 15 Sophie L. Pirard, Georges Heyen, Jean-Paul Pirard. Quantitative study of catalytic activity and catalytic deactivation of Fe–Co/Al₂O₃ catalysts for multi-walled carbon nanotube synthesis by the CCVD process. *Applied Catalysis A: General* 382 (2010) 1–9.
- 16 Qi Jianga, RongYang, Zhengwen He, Zhao Liu, Deyu Xie, Yong Zhao. Preparation and characterization of a graphite electrode containing carbon nanotubes grown in situ by flame synthesis. *Electrochimica Acta* 56 (2011) 5205–5209.

- 17 S. ChandraKishore, A. Pandurangan. Electrophoretic deposition of cobalt catalyst layer over stainless steel for the high yield synthesis of carbon nanotubes. *Applied Surface Science* 258 (2012) 7936– 7942.
- 18 Gohier, K.-H. Kim, E.D. Norman, L. Gorintin, P. Bondavalli, C.S. Cojocar. Spray-gun deposition of catalyst for large area and versatile synthesis of carbon nanotubes. *Applied Surface Science* 258 (2012) 6024– 6028.
- 19 Kirsten Edgar, John L. Spencer. The synthesis of carbon nanotubes from Müller clusters. *Current Applied Physics* 6 (2006) 419–421.
- 20 Qian Zhao, Tingshun Jiang, Changsheng Li, Hengbo Yin. Synthesis of multi-wall carbon nanotubes by Ni-substituted (loading) MCM-41 mesoporous molecular sieve catalyzed pyrolysis of ethanol. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 17 (2011) 218–222.
- 21 Sigurdson S., Sundaramurthy V., Dalai A.K., Adjaye J. Effect of anodic alumina pore diameter variation on template-initiated synthesis of carbon nanotube catalyst supports. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 306 (2009) 23–32.
- 22 Fluidized bed catalytic chemical vapor deposition synthesis of carbon nanotubes-A review. F. Danafar, A. Fakhru'l-Razi, M.A.M. Salleh, D.R.A. Biak. *Chemical Engineering Journal* 155 (2009) 37–48.
- 23 Chee Howe See, Kieran J. MacKenzie, Oscar M. Dunens, Andrew T. Harris. Multi-parameter optimization of carbon nanotube synthesis in fluidized-beds. *Chemical Engineering Science* 64 (2009) 3614 – 3621.
- 24 Production of single-walled carbon nanotubes from methane over Co-Mo/MgO nanocatalyst: A comparative study of fixed and fluidized bed reactors. Alimorad Rashidi, Roghayeh Lotfi, Ehsaneh Fakhrmosavi, Masoud Zare. *Journal of Natural Gas Chemistry* 20(2011)372–376.
- 25 Sarah Maghsoodi, Abasali Khodadadi, Yadollah Mortazavi. A novel continuous process for synthesis of carbon nanotubes using iron floating catalyst and MgO particles for CVD of methane in a fluidized bed reactor. *Applied Surface Science* 256 (2010) 2769–2774.
- 26 Wilson Merchan-Merchan, Alexei V. Saveliev, Lawrence Kennedy, Walmy Cuello Jimenez. Combustion synthesis of carbon nanotubes and related nanostructures. *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2010) 696-727.
- 27 Xu F, Liu X, Tse SD. Synthesis of carbon nanotubes on metal alloy substrates with voltage bias in methane inverse diffusion flames. *Carbon* 2006;44:570-7.
- 28 Bao Q, Pan C. Electric field induced growth of well aligned carbon nanotubes from ethanol flames. *Nanotechnology* 2006;17:1016-21.
- 29 Zhang L, Tan Y, Resasco DE. Controlling the growth of vertically oriented single-walled carbon nanotubes by varying the density of Co-Mo catalyst particles. *Chem. Phys. Lett.* 2006;422:198-203.
- 30 Hu W, Gong D, Chen Z, Yuan L, Saito K, Grimes CA, et al. *Appl Phys Lett* 2001; 79:3083-5.

- 31 Klanwan J, Seto T, Furukawa T, Otani Y, Charinpanitkul T, Kohno M, Hirasawa M (2010) Generation and Size Classification of Single-Walled Carbon Nanotube Aerosol Using Atmospheric Pressure Pulsed Laser Ablation (AP-PLA). *Journal of Nanoparticle Research* 12:2747–2755.
- 32 Yanjie Su, Zhi Yang, Hao Wei, Eric Siu-Wai Kong, Yafei Zhang. Synthesis of single-walled carbon nanotubes with selective diameter distributions using DC arc discharge under CO mixed atmosphere. *Applied Surface Science* 257 (2011) 3123–3127.
- 33 Liu Yun-quan, Chen Xiao-hua, Yang Zhi, Pu Yu-xing, Yi Bin. Synthesis of aligned carbon nanotube with straight-chained alkanes by nebulization method. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 20 (2010) 1012-1016.
- 34 Bazargan A., McKay G. A review – Synthesis of carbon nanotubes from plastic wastes. *Chemical Engineering Journal* 195–196 (2012) 377–391.
- 35 Zhuo C., Hall B., Richter H., Levendis Y. Synthesis of carbon nanotubes by sequential pyrolysis and combustion of polyethylene, *Carbon* 48 (2010) 4024–4034.
- 36 Yang Z., Zhang Q., Luo G., Huang J.Q., Zhao M.Q., Wei F. Coupled process of plastics pyrolysis and chemical vapor deposition for controllable synthesis of vertically aligned carbon nanotube arrays, *Appl. Phys. A – Mater.* 100 (2010) 533–540.
- 37 Hong N., Wang B., Song L., Hu S., Tang G., Wu Y., Hu Y. Low-cost, facile synthesis of carbon nanosheets by thermal pyrolysis of polystyrene composite, *Mater. Lett.* 66 (2012) 60–63.
- 38 Song R., Ji Q. Synthesis of carbon nanotubes from polypropylene in the presence of Ni/Mo/MgO catalysts via combustion, *Chem. Lett.* 40 (2011) 1110–1112.
- 39 Somanathan T., Pandurangan A. Helical multiwalled carbon nanotubes (h-MWCNTs) synthesized by catalytic chemical vapor deposition, *New Carbon Mater.* 25 (2010) 175–180.
- 40 Green A.A., Hersam M.C. *ACS Nano*, 2011, 5, pp 1459–1467.
- 41 Bandow S, Takizawa M, Hirahara K, Yudasaka M, Iijima S. Raman scattering study of double-wall carbon nanotubes derived from the chains of fullerenes in single-wall carbon nanotubes. *Chem Phys Lett* 2001;337:48–54.
42. Lyu SC, Lee TJ, Yang CW, Lee JC. Synthesis and characterization of high-quality double-walled carbon nanotubes by catalytic decomposition of alcohol. *Chem Comm* 2003:1404–5.
43. Lyu SC, Liu CB, Lee JC, Kang HK, Yang CW, Park CY. High quality double-walled carbon nanotubes produced by catalytic decomposition of benzene. *Chem Mater* 2003;15:3951–4.
44. Wei JQ, Jiang B, Wu DH, Wei BQ. Large-scale synthesis of long double-walled carbon nanotubes. *J Phys Chem* 2004;108(B):8844–7.
- 45 Endo M, Muramastu H, Hayashi T, Kim YA, Terrones M, Dresselhaus MS. ‘Buckypaper’ from coaxial nanotubes. *Nature* 2005;433:476.

- 46 Jieshan Qiu, Zhiyu Wang, Zongbin Zhao, Tonghua Wang. Synthesis of double-walled carbon nanotubes from coal in hydrogen-free atmosphere. *Fuel* 86 (2007) 282–286.
- 47 A. Godara, L. Gorbatikh, G. Kalinka, A. Warriar, O. Rochez, L. Mezzo, F. Luizi, A.W. van Vuure, S.V. Lomov, I. Verpoest. Interfacial shear strength of a glass fiber/epoxy bonding in composites modified with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology* 70 (2010) 1346–1352.
- 48 Huanzhen Shao, Zixing Shi, Jianhua Fang, Jie Yin. One pot synthesis of multiwalled carbon nanotubes reinforced polybenzimidazole hybrids: Preparation, characterization and properties. *Polymer* 50 (2009) 5987–5995.
- 49 Ashish Warriar, Ajay Godara, Olivier Rochez, Luca Mezzo, Frederic Luizi, Larissa Gorbatikh, Stepan V. Lomov, Aart Willem VanVuure, Ignaas Verpoest. The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix. *Composites: Part A* 41 (2010) 532–538.
- 50 Sohel Rana, Ramasamy Alagirusamy, Mangala Joshi. Development of carbon nanofibre incorporated three phase carbon/epoxy composites with enhanced mechanical, electrical and thermal properties. *Composites: Part A* 42 (2011) 439–445.
- 51 Daniel R. Bortz, Căsar Merino, Ignacio Martin-Gullon. Mechanical characterization of hierarchical carbon fiber/nanofiber composite laminates. *Composites: Part A* 42 (2011) 1584–1591.
52. Niels De Greef, Larissa Gorbatikh, Stepan V. Lomov, Ignaas Verpoest. Damage development in woven carbon fiber/epoxy composites modified with carbon nanotubes under tension in the bias direction. *Composites: Part A* 42 (2011) 1635–1644.
- 53 Zdenko Spitalsky, Dimitrios Tasis, Konstantinos Papagelis, Costas Galiotis. Carbon nanotube–polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties. *Progress in Polymer Science* 35 (2010) 357–401.
- 54 Meysam Rahmat, Pascal Hubert. Carbon nanotube–polymer interactions in nanocomposites: A review. *Composites Science and Technology* 72 (2011) 72–84.
- 55 Suryasarathi Bose, Rupesh A. Khare, Paula Moldenaers. Assessing the strengths and weaknesses of various types of pre-treatments of carbon nanotubes on the properties of polymer/carbon nanotubes composites: A critical review. *Polymer* 51 (2010) 975–993.
- 56 ChandraKishore S., Pandurangan A. Electrophoretic deposition of cobalt catalyst layer over stainless steel for the high yield synthesis of carbon nanotubes. *Applied Surface Science* 258 (2012) 7936–7942.
- 57 Vigolo B, Poulin P, Lucas M, Launois P, Bernier P. Improved structure and properties of SWCNT spun fibers. *Appl Phys Lett* 2002;81:1210–2.
- 58 Tsu-Wei Chou, Limin Gao, Erik T. Thostenson, Zuoguang Zhang, Joon-Hyung Byun. An assessment of the science and technology of carbon nanotube-based fibers and composites. *Composites Science and Technology* 70 (2010) 1–19.

- 59 Sunny S. Wicks, Roberto Guzman de Villoria, Brian L. Wardle. Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes. *Composites Science and Technology* 70 (2010) 20–28.
- 60 Logakis E., Pandis Ch., Pissis P., Pionteck J., Potschke P. Highly conducting poly(methyl methacrylate)/carbon nanotubes composites: Investigation on their thermal, dynamic-mechanical, electrical and dielectric properties. *Composites Science and Technology* 71 (2011) 854–862.
- 61 Masanori Imai, Kousuke Akiyama, Tomo Tanaka, Eiichi Sano. Highly strong and conductive carbon nanotube/cellulose composite paper. *Composites Science and Technology* 70 (2010) 1564–1570.
- 62 Kuronuma, Y., Takeda, T., Shindo, Y., Narita, F., Wei, Z., Electrical Resistance-based Strain Sensing in Carbon Nanotube/Polymer Composites under Tension: Analytical Modeling and Experiments, *Composites Science and Technology* (2012), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.07.001>.
- 63 Kingsley K.C. Ho, Siti-Ros Shamsuddin, Matthew Laffan, Alexander Bismarck. Unidirectional carbon fibre reinforced poly (vinylidene fluoride): Impact of atmospheric plasma on composite performance. *Composites: Part A* 42 (2011) 453–461.
- 64 Behnam Ashrafi, Jingwen Guan, Vahid Mirjalili, Yunfa Zhang, Li Chun, Pascal Hubert, Benoit Simard, Christopher T. Kingston, Orson Bourne, Andrew Johnston. Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology* 71 (2011) 1569–1578.
- 65 Ali Can Zaman, Cem B. Üstündag, Ali Celik, Alpagut Kara, Figen Kaya, Cengiz Kaya. Carbon nanotube/boehmite-derived alumina ceramics obtained by hydrothermal synthesis and spark plasma sintering (SPS). *Journal of the European Ceramic Society* 30 (2010) 3351–3356.
- 66 Groven L.J., Puszynski J.A. Combustion synthesis and characterization of nickel aluminide–carbon nanotube composites. *Chemical Engineering Journal* 183 (2012) 515– 525.
- 67 Bohua Wu, Yinjie Kuang, Xiaohua Zhang, Jinhua Chen. Noble metal nanoparticles/carbon nanotubes nanohybrids: Synthesis and applications. *Nano Today* (2011) 6, 75-90.
68. Peng X.H., Chen J.Y., Misewich J.A., Wong S.S. Carbon nanotube-nanocrystal heterostructures. *Chem. Soc. Rev.* 38 (2009) 1076.
- 69 Zhang S., Shao Y.Y., Yin G.P., Lin Y.H. Carbon nanotubes decorated with Pt nanoparticles via electrostatic self-assembly: a highly active oxygen reduction electrocatalyst. *J. Mater. Chem.* 20 (2010) 2826.
- 70 Rebollo-Plata B., Muñoz-Sandoval E., López-Urias F., Hernández-Cortina E.L., Terrones H., Terrones M. Efficient vapor sensors using foils of dispersed nitrogen-doped and pure carbon multiwalled nanotubes. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 10 (2010) 3965-3972.

- 71 Jiang S.J., Zhu L., Ma Y.W., Wang X.Z., Liu J.G., Zhu J.M., Fan Y.N., Zou Z.G., Hu Z. Direct immobilization of Pt-Ru alloy nanoparticles on nitrogendoped carbon nanotubes with superior electrocatalytic performance. *J. Power Sources* 195 (2010) 7578.
- 72 Kiriaki Kardimi, Theodoros Tsoufis, Aphrodite Tomou, Bart J. Kooi, Mamas I. Prodromidis, Dimitrios Gournis. Synthesis and characterization of carbon nanotubes decorated with Pt and PtRu nanoparticles and assessment of their electrocatalytic performance. *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (2012) 1243-1253.
- 73 Lee D.H., Lee W.J., Kim S.O., Kim Y.H. Theory, Synthesis, and Oxygen Reduction Catalysis of Fe-Porphyrin-Like Carbon Nanotube. *Physical Review Letters* 106 (2011) 175502–175505.
- 74 O’Hare, F. V. Kusmartsev, K. I. Kugel. A Stable “Flat” Form of Two-Dimensional Crystals: Could Graphene, Silicene, Germanene Be Minigap Semiconductors? *Nano Lett.*, 2012, 12 (2), pp 1045–1052.
- 75 A.K. Geim, K.S. Novoselov. The rise of grapheme. *Nature Materials* 6, 183 - 191 (2007) doi:10.1038/nmat1849.
- 76 D. A. Abanin, R.V. Gorbachev, K. S. Novoselov, A. K. Geim & L. S. Levitov. Giant Spin-Hall Effect Induced by the Zeeman Interaction in Graphene. *Phys Rev Lett* 107, 096601 (2011).
- 77 Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.M., Katsnelson M.I., Grigorieva I.V., Dubonos S.V., Firsov A.A. Two Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene. *Nature* 438, 197-200 (2005).
- 78 E.W. Hill, A.K. Geim, K. Novoselov, F. Schedin, P. Blake. Graphene spin valve devices. *IEEE Trans. Mag.* 42, 2694-2696 (2006).
- 79 S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X.F. Xu, J.S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H.R. Kim, Y.I. Song, Y.J. Kim, K.S. Kim, B. Ozyilmaz, J.H. Ahn, B.H. Hong, S. Iijima, Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology* 5 (2010) 574–578.
- 80 D. Chen, L.H. Tang, J.H. Li, Graphene-based materials in electrochemistry. *Chemical Society Reviews* 39 (2010) 3157–3180.
- 81 Z.S. Wu, D.W. Wang, W. Ren, J. Zhao, G. Zhou, F. Li, H.M. Cheng, Anchoring Hydrous RuO₂ on Graphene Sheets for High-Performance Electrochemical Capacitors. *Advanced Functional Materials* 20 (2010) 3595–3602.
- 82 J.J. Yoo, K. Balakrishnan, J. Huang, V. Meunier, B.G. Sumpter, A. Srivastava, M. Conway, A.L. Mohana Reddy, J. Yu, R. Vajtai, Ultrathin Planar Graphene Supercapacitors. *Nano Letters* 11 (2011) 1423–1427.
- 83 C. Liu, Z. Yu, D. Neff, A. Zhamu, B.Z. Jang, Graphene-Based Supercapacitor with an Ultrahigh Energy Density. *Nano Lett.*, 2010, 10 (12), pp 4863–4868.

- 84 L. Dong, R.R.S. Gari, Z. Li, M.M. Craig, S. Hou, Graphene-supported platinum and platinum–ruthenium nanoparticles with high electrocatalytic activity for methanol and ethanol oxidation. *Carbon* 48 (2010) 781–787.
- 85 Yongye Liang, Yanguang Li, Hailiang Wang, Jigang Zhou, Jian Wang, Tom Regier & Hongjie Dai. Co₃O₄ nanocrystals on graphene as a synergistic catalyst for oxygen reduction reaction *Nature Materials* 10, 780–786 (2011).
- 86 P.C. Lian, X.F. Zhu, S.Z. Liang, Z. Li, W.S. Yang, H.H. Wang, Large reversible capacity of high quality graphene sheets as an anode material for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta* 55 (2010) 3909–3914.
- 87 Hyun-Jung Choi, Sun-Min Jung, Jeong-Min Seo, Dong Wook Chang, Liming Daic Jong-Beom Baek. Graphene for energy conversion and storage in fuel cells and supercapacitors. *Nano Energy* (2012) 1, 534–551.
- 88 H. Bai, C. Li, G.Q. Shi, Functional Composite Materials Based on Chemically Converted Graphene. *Advanced Materials* 23 (2011) 1089–1115.
- 89 Li-ChangYin, WencaiRen, FengLi, Hui-MingCheng. Graphene/metaloxide composite electrode materials for energy storage. *Zhong-Shuai Wu, GuangminZhou, Nano Energy* (2012) 1, 107–131.
- 90 Frank Schwierz. Graphene transistors. *Nature Nanotechnology* 5 (2010) 487–496.
- 91 L. Britnell, R. V. Gorbachev, R. Jalil, B. D. Belle, F. Schedin, A. Mishchenko, T. Georgiou, M. I. Katsnelson, L. Eaves, S. V. Morozov, N. M. R. Peres, J. Leist, A. K. Geim, K. S. Novoselov, L. A. Ponomarenko. Field-Effect Tunneling Transistor Based on Vertical Graphene Heterostructures. *Science* 335 (2012) 947–950 DOI: 10.1126/science.1218461.
- 92 S. Hertel, D. Waldmann, J. Jobst, A. Albert, M. Albrecht, S. Reshanov, A. Schöner, M. Krieger, [H.B. Weber](#). Tailoring the graphene/silicon carbide interface for monolithic wafer-scale electronics. *Nature Communications* 3, Article number: 957 doi:10.1038/ncomms1955.
- 93 Juan Xie, Yanting Li, Wei Zhao, Li Bian, Yu Wei. Simple fabrication and photocatalytic activity of ZnO particles with different morphologies. *Powder Technology* 207 (2011) 140–144.
- 94 Z. Szabó, J. Volk, E. Fülöp, A. Deák, I. Bársony. Regular ZnO nanopillar arrays by nanosphere photolithography, *Photon Nanostruct: Fundam Appl* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.photonics.2012.06.009>.
- 95 Yanxia Yan, Lanyang Ji, Jun Wang, Qi Liu, Xiaoyan Jing, Rumin Li, Lianhe Liu, Synthesis of ZnO Hollow Microspheres via an In-situ Gas Growth. *Method, Powder Technology* (2012), doi: 10.1016/j.powtec.2012.08.010.
- 96 Lanqin Tang, Shaofeng Yang, Yupeng Guo, Bing Zhou. Building block-tunable synthesis of self-assembled ZnO quasi-microspheres via a facile liquid process. *Chemical Engineering Journal* 165 (2010) 370–377.

- 97 Khorsand Zak, W.H.abd. Majid, H.Z. Wang, Ramin Yousefi, A. Moradi Golsheikh, Z.F. Ren. Sonochemical synthesis of hierarchical ZnO nanostructures, *Ultrason. Sonochem.* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.001>.
- 98 Zhenfeng Zhu, Dong Yang, Hui Liu. Microwave-assisted hydrothermal synthesis of ZnO rod-assembled microspheres and their photocatalytic performances. *Advanced Powder Technology* 22 (2011) 493–497.
- 99 Naghmeh Faal Hamedani, Ali Reza Mahjoub, Abbas Ali Khodadadi, Yadollah Mortazavi. Microwave assisted fast synthesis of various ZnO morphologies for selective detection of CO, CH₄ and ethanol. *Sensors and Actuators B* 156 (2011) 737– 742.
- 100 Jai Singh, M.S.L. Hudson, S.K. Pandey, R.S. Tiwari, O.N. Srivastava. Structural and hydrogenation studies of ZnO and Mg doped ZnO nanowires. *International journal of hydrogen energy* 37 (2012) 3748-3754.
- 101 Jun Huang, Liang Hu, Honghai Zhang, Jie Zhang, Xiaopeng Yang, Dehui Li, Liping Zhu, ZhizhenYe. A facile method for the synthesis of tapered ZnO:Cu nanorod arrays and its secondary growth. *Journal of Crystal Growth* 351 (2012) 93–100.
- 102 Chunye Li, Hongwei Liang, Jianze Zhao, Qiuju Feng, Jiming Bian, Yang liu, Rensheng Shen, Wangcheng Li, Guoguang Wu, G.T. Du. Influence of high-pressure hydrogen treatment on structural and electrical properties of ZnO thin films. *Applied Surface Science* 256 (2010) 6770–6774.
- 103 Changyong Lana, Jiangfeng Gong, Chunming Liu. Synthesis and photoluminescence properties of comb-like CdS nanobelt/ZnO nanorod heterostructures. *Appl. Surf. Sci.* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.08.019>.
- 104 Durgajanani Sivalingam, Jeyaprakash Beri Gopalakrishnan, John Bosco Balaguru Rayappan. Structural, morphological, electrical and vapour sensing properties of Mn doped nanostructured ZnO thin films. *Sensors and Actuators B* 166– 167 (2012) 624– 631.
- 105 Mohammad Reza Khajavi, Daniel John Blackwood, German Cabanero, Ramon Tena-Zaera. New insight into growth mechanism of ZnO nanowires electrodeposited from nitrate-based solutions. *Electrochimica Acta* 69 (2012) 181–189.
- 106 R.K. Sendi, S. Mahmud, Impact of sintering temperature on the structural, electrical, and optical properties of doped ZnO nanoparticle-based discs, *Appl. Surf. Sci.* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.07.115>.
- 107 Yinhu Li, Jian Gong, Yulin Deng. Hierarchical structured ZnO nanorods on ZnO nanofibers and their photoresponse to UV and visible lights. *Sensors and Actuators A* 158 (2010) 176–182.
- 108 X.L. Wu, G.G. Siu, C.L. Fu, H.C. Ong, Photoluminescence and cathodoluminescence studies of stoichiometric and oxygen-deficient ZnO films, *Appl. Phys. Lett.* 78 (2001) 2285–2287.

- 109 M. Ghosh, A.K Raychaudhuri, Shape transition in ZnO nanostructures and its effect on blue-green photoluminescence, *Nanotechnology* 19 (2008) 445704.
- 110 M.E. Koleva, A.Og. Dikovska, N.N. Nedyalkov, P.A. Atanasov, I.A. Bliznakova. Enhancement of ZnO photoluminescence by laser nanostructuring of Ag underlayer. *Applied Surface Science* 258 (2012) 9181– 9185.
- 111 Lanlan Sun, Dongxu Zhao, Meng Ding, Haifeng Zhao, Zhenzhong Zhang, Binghui Li, Dezhen Shen. A white-emitting ZnO–Au nanocomposite and its SERS applications. *Applied Surface Science* 258 (2012) 7813– 7819.
- 112 By Jae-Hong Lim, Chang-Ku Kang, Kyoung-Kook Kim, Il-Kyu Park, Dae-Kue Hwang, and Seong-Ju Park. UV Electroluminescence Emission from ZnO Light-Emitting Diodes Grown by High-Temperature Radiofrequency Sputtering. *Adv. Mater.* 2006, 18, 2720–2724.
- 113 Jiun-Ting Chen, Wei-Chih Lai, Chi-Heng Chen, Ya-Yu Yang, Jinn-Kong Sheu, and Li-Wen Lai. Electroluminescence of ZnO nanocrystal in sputtered ZnO-SiO₂ nanocomposite light-emitting devices. *Optics Express*, Vol. 19, Issue 12, pp. 11873-11879 (2011).
- 114 Xiang Yang Ma, Pei Liang Chen, Dong Sheng Li, De Ren Yang. Electroluminescence from ZnO/n⁺-Si Heterojunction. *Solid State Phenomena* 131-133 (2008) 625-628.
- 115 H. Sun, Q. Zhang, J. Zhang, T. Deng and J. Wu. Electroluminescence from ZnO nanowires with a p-ZnO film/n-ZnO nanowire homojunction. *Applied Physics B: Lasers and Optics* Volume 90, Numbers 3-4 (2008), 543-546.
- 116 L. Li, Z. Yang, J. Y. Kong, and J. L. Liu. Blue electroluminescence from ZnO based heterojunction diodes with CdZnO active layers. *Applied Physics Letters* 95, 232117 (2009).
- 117 Chih-Yang Chang, Fu-Chun Tsao, Ching-Jen Pan, and Gou-Chung Chi. Electroluminescence from ZnO nanowire/polymer composite p-n junction. *Applied Physics Letters* 88, 173503 (2006).
- 118 Su-Ling Zhao, Peng-Zhi Kan, Zheng Xu, Chao Kong, Da-Wei Wang, Yue Yan, Yong-Sheng Wang. Electroluminescence of ZnO nanorods/MEH-PPV heterostructure devices. *Organic Electronics* 11 (2010) 789–793.
- 119 Da-Wei Wang, Su-Ling Zhao, Zheng Xu, Chao Kong, Wei Gong. The improvement of near-ultraviolet electroluminescence of ZnO nanorods/MEH-PPV heterostructure by using a ZnS buffer layer. *Organic Electronics* 12 (2011) 92–97.
- 120 B.D. Pelatt, C.C. Huang, J.F. Conley Jr. ZnO nanobridge devices fabricated using carbonized photoresist. *Solid-State Electronics* 54 (2010) 1143–1149.
- 121 Huang CC, Pelatt BD, Conley Jr JF. Directed integration of ZnO nanobridge sensors using photolithographically patterned carbonized photoresist. *Nanotechnology* 2010;21:195307.
- 122 O. Lupan, V.V. Ursaki, G. Chai, L. Chow, G.A. Emelchenko, I.M. Tiginyanu, A.N. Gruzintsev, A.N. Redkin. Selective hydrogen gas nanosensor using individual ZnO nanowire with fast response at room temperature. *Sensors and Actuators B* 144 (2010) 56–66.

- 123 Fan DL, Zhu FQ, Cammarata RC, Chien CL. Efficiency of assembling of nanowires in suspension by ac electric fields. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89:223115.
- 124 Lukas Schmidt-Mende and Judith L. MacManus-Driscoll. ZnO – nanostructures, defects, and devices. *Materials Today* 10 (2007) 40-48.
- 125 Ang Wei, Lihua Pan, Wei Huang. Recent progress in the ZnO nanostructure-based sensors. *Materials Science and Engineering B* 176 (2011) 1409– 1421.
- 126 J.Y. Park, S.W. Choi, S.S. Kim, *Nanoscale Res. Lett.* 5 (2010) 353.
- 127 C.C. Chang, N.F. Chiu, D.S. Lin, Y. Chu-Su, Y.H. Liang, C.W. Lin, *Anal. Chem.* 82 (2010) 1207.
- 128 A. Wei, X.W. Sun, J.X. Wang, Y. Lei, X.P. Cai, C.M. Li, Z.L. Dong, W. Huang, *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 123902.
- 129 J.X. Wang, X.W. Sun, A. Wei, Y. Lei, X.P. Cai, C.M. Li, Z.L. Dong, *Appl. Phys. Lett.* 88 (2006) 233106.
- 130 P. Bhattacharyya, G.P. Mishra, S.K. Sarkar. The effect of surface modification and catalytic metal contact on methane sensing performance of nano-ZnO–Si heterojunction sensor. *Microelectronics Reliability* 51 (2011) 2185–2194.
- 131 Prabhakar Rai, Yeon-Tae Yu. Synthesis of floral assembly with single crystalline ZnO nanorods and its CO sensing property. *Sensors and Actuators B* 161 (2012) 748– 754.
- 132 Y.T. Lim, J.Y. Son, J.-S. Rhee. Vertical ZnO nanorod array as an effective hydrogen gas sensor, *Ceramics International* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.06.035>.
- 133 M. Shafiei, J. Yu, R. Arsat, K. Kalantar-zadeh, E. Comini, M. Ferroni, G. Sberveglieri, W. Wlodarski. Reversed bias Pt/nanostructured ZnO Schottky diode with enhanced electric field for hydrogen sensing. *Sensors and Actuators B* 146 (2010) 507–512.
- 134 Shan-Wei Fan, Arvind K. Srivastava, Vinayak P. Dravid. Nanopatterned polycrystalline ZnO for room temperature gas sensing. *Sensors and Actuators B* 144 (2010) 159–163.
- 135 D. Calestani, M. Zha, R. Mosca, A. Zappettini, M.C. Carotta, V. Di Natale, L. Zanotti. Growth of ZnO tetrapods for nanostructure-based gas sensors. *Sensors and Actuators B* 144 (2010) 472–478.
- 136 Lexi Zhang, Jianghong Zhao, Haiqiang Lu, Li Li, Jianfeng Zheng, Jing Zhang, Hui Li, Zhenping Zhu. Highly sensitive and selective dimethylamine sensors based on hierarchical ZnO architectures composed of nanorods and nanosheet-assembled microspheres. *Sensors and Actuators B* 171– 172 (2012) 1101– 1109.
- 137 Li-Hong Cheng, Liao-Ying Zheng, Lei Meng, Guo-Rong Li, Yan Gu, Fu-Ping Zhang, Rui-Qing Chu, Zhi-Jun Xu. Electrical properties of Al₂O₃-doped ZnO varistors prepared by sol–gel process for device miniaturization. *Ceramics International* 38S (2012) S457–S461.

138 Changsheng Xie, Liqi Xiao, Mulin Hu, Zikui Bai, Xianping Xia, Dawen Zeng. Fabrication and formaldehyde gas-sensing property of ZnO–MnO₂ coplanar gas sensor arrays. *Sensors and Actuators B* 145 (2010) 457–463.

139 Sahar Hemmati, Azam Anaraki Firooz, Abbas Ali Khodadadi, Yadollah Mortazavi. Nanostructured SnO₂–ZnO sensors: Highly sensitive and selective to ethanol. *Sensors and Actuators B* 160 (2011) 1298– 1303.

140 Zhong-xia Duan, Guo-qin Yu, Jun-biao Liu, Jun Liu, Xiao-wen Dong, Li Han, Peng-yun Jin. Preparation and characterization of PZT thick film enhanced by ZnO nanowhiskers for MEMS piezoelectric generators. *Progress in Natural Science: Materials International* 21(2011) 159–163.

141 Chang Zhou, Qingqing Fang, Fangliang Yan, Weina Wang, Keyue Wu, Yanmei Liu, Qingrong Lv, Hanming Zhang, Qiping Zhang, Jinguang Li, Qiongqiong Ding. Enhanced microwave absorption in ZnO/carbonyl iron nano-composites by coating dielectric material. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 324 (2012) 1720–1725.

142 Sunil K. Arya, Shibu Saha, Jaime E. Ramirez-Vick, Vinay Gupta, Shekhar Bhansali, Surinder P. Singh. Recent advances in ZnO nanostructures and thin films for biosensor applications: Review. *Analytica Chimica Acta* 737 (2012) 1– 21.

143 M. Ahmad, C. Pan, Z. Luo, J. Zhu, A Single ZnO Nanofiber-Based Highly Sensitive Amperometric Glucose Biosensor. *J. Phys. Chem. C* 114 (2010) 9308.

144 B. Gu, C. Xu, C. Yang, S. Liu, M. Wang, ZnO quantum dot labeled immunosensor for carbohydrate antigen 19-9. *Biosens. Bioelectron.* 26 (2011) 2720.

145 A. Fulati, S.M.U. Ali, M.H. Asif, N.u.H. Alvi, M. Willander, C. Brannmark, P. Stralfors, S.I. Borjesson, F. Elinder, B. Danielsson, An intracellular glucose biosensor based on nanoflake ZnO. *Sens. Actuat. B: Chem.* 150 (2010) 673.

146 Hoang-Si Hong, Duy-Thach Phan, Gwi-Sang Chung. High-sensitivity humidity sensors with ZnO nanorods based two-port surface acoustic wave delay line. *Sensors and Actuators B* 171– 172 (2012) 1283– 1287.

147 Roya Dastjerdi, Majid Montazer. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 79 (2010) 5–18.

148 S. Anitha, B. Brabu, D. John Thiruvadigal, C. Gopalakrishnan, T.S. Natarajan. Optical, bactericidal and water repellent properties of electrospun nano-composite membranes of cellulose acetate and ZnO. *Carbohydrate Polymers* 87 (2012) 1065–1072.

149 A. Stanković, S. Dimitrijević, D. Uskoković, Influence of size scale and morphology on antibacterial properties of ZnO powders hydrothermally synthesized using different surface stabilizing agents, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* (2010),
doi:10.1016/j.colsurfb.2012.07.033.

- 150 L.V. Trandafilović, D.K. Božanić, S. Dimitrijević-Branković, A.S. Luyt, V. Djoković. Fabrication and antibacterial properties of ZnO–alginate nanocomposites. *Carbohydrate Polymers* 88 (2012) 263–269.
- 151 K. Thongsuriwong, P. Amornpitoksuk, S. Suwanboon. Structure, morphology, photocatalytic and antibacterial activities of ZnO thin films prepared by sol–gel dip-coating method, *Advanced Powder Technology* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.appt.2012.07.002>.
- 152 Hem Raj Pant, Bishweshwar Pant, Ram Kumar Sharma, Altangerel Amarjargal, Han Joo Kim, Chan Hee Park, Leonard D. Tijing, Cheol Sang Kim. Antibacterial and photocatalytic properties of Ag/TiO₂/ZnO nano-flowers prepared by facile one-pot hydrothermal process. *Ceramics International* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.07.097>.
- 153 Tarwal, N. L., Patil, P. S. (2010). Superhydrophobic and transparent ZnO thin films synthesized by spray pyrolysis technique. *Applied surface science*, 256, 7451–7456.
- 154 Quentin Simon, Davide Barreca, Daniela Bekermann, Alberto Gasparotto, Chiara Maccato, Elisabetta Comini, Valentina Gombac, Paolo Fornasiero, Oleg I. Lebedev, Stuart Turner, Anjana Devi, Roland A. Fischer, Gustaaf Van Tendeloo. Plasma-assisted synthesis of Ag/ZnO nanocomposites: First example of photo-induced H₂ production and sensing. *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011) 15527-15537.
- 155 Chih-Hsiung Hsu, Dong-Hwang Chen. Photoresponse and stability improvement of ZnO nanorod array thin film as a single layer of photoelectrode for photoelectrochemical water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011) 15538-15547.
- 156 Yabin Li, Zhifeng Liu, Yun Wang, Zhichao Liu, Jianhua Han, Jing Ya. ZnO/CuInS₂ core/shell heterojunction nanoarray for photoelectrochemical water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.117>.
- 157 Gabriele Centi, Siglinda Perathoner. Creating and mastering nano-objects to design advanced catalytic materials. *Coordination Chemistry Reviews* 255 (2011) 1480–1498.
- 158 Rowan Leary, Aidan Westwood. Carbonaceous nanomaterials for the enhancement of TiO₂ photocatalysis. *Carbon* 49 (2011) 741–772.
- 159 Satish Meshram, Rohan Limaye, Shailesh Ghodke, Shachi Nigam, Shirish Sonawane, Rajeev Chikate. Continuous flow photocatalytic reactor using ZnO–bentonite nanocomposite for degradation of phenol. *Chemical Engineering Journal* 172 (2011) 1008– 1015.
- 160 Chia-Chang Lin, Yu-Ju Chiang. Preparation of coupled ZnO/SnO₂ photocatalysts using a rotating packed bed. *Chemical Engineering Journal* 181– 182 (2012) 196– 205.
- 161 Mehmet Konyar, H. Cengiz Yatmaz, Koray Öztürk. Sintering temperature effect on photocatalytic efficiencies of ZnO/TiO₂ composite plates. *Applied Surface Science* 258 (2012) 7440–7447.
- 162 P. Jongnavakit, P. Amornpitoksuk, S. Suwanboon, N. Ndiege. Preparation and photocatalytic activity of Cu-doped ZnO thin films prepared by the sol–gel method *Applied Surface Science* 258 (2012) 8192– 8198.

- 163 Ibram Ganesh, P.S. Chandra Sekhar, G. Padmanabham, G. Sundararajan. Influence of Li-doping on structural characteristics and photocatalytic activity of ZnO nano-powder formed in a novel solution pyro-hydrolysis route. *Appl. Surf. Sci.* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.07.077>.
- 164 Ashokrao B. Patil, Kashinath R. Patil, Satish K. Pardeshi. Ecofriendly synthesis and solar photocatalytic activity of S-doped ZnO. *Journal of Hazardous Materials* 183 (2010) 315–323.
- 165 Chungui Tian, Qi Zhang, Baojiang Jiang, Guohui Tian, Honggang Fu. Glucose-mediated solution–solid route for easy synthesis of Ag/ZnO particles with superior photocatalytic activity and photostability. *Journal of Alloys and Compounds* 509 (2011) 6935–6941.
- 166 R. Saravanan, S. Karthikeyan, V.K. Gupta, G. Sekaran, V. Narayanan, A. Stephen, Enhanced photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposite for the degradation of textile dye on visible light illumination, *Materials Science & Engineering C* (2012), doi: 10.1016/j.msec.2012.08.011.
- 167 D.Y. Torres Martinez, R. Castanedo Perez, G. Torres Delgado, O. Zelaya Angel. Structural, morphological, optical and photocatalytic characterization of ZnO–SnO₂ thin films prepared by the sol–gel technique. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 235 (2012) 49–55.
- 168 T. Zhao, Z. Liu, K. Nakata, S. Nishimoto, T. Murakami, Y. Zhao, L. Jiang, A. Fujishima, Multichannel TiO₂ hollow fibers with enhanced photocatalytic activity, *J. Mater. Chem.* 20 (24) (2010) 5095–5099.
- 169 J. Kim, B. Van der Bruggen, The use of nanoparticles in polymeric and ceramic membrane structures: review of manufacturing procedures and performance improvement for water treatment, *Environ. Pollut.* 158 (2010) 2335–2349.
- 170 Stefan Balta, Arcadio Sotto, Patricia Luis, Lidia Benea, Bart Van der Bruggen, Jeonghwan Kim. A new outlook on membrane enhancement with nanoparticles: The alternative of ZnO. *Journal of Membrane Science* 389 (2012) 155– 161.
- 171 Hongwei Bai, Zhaoyang liu, Darren Delai Sun. Hierarchical ZnO nanostructured membrane for multifunctional environmental applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 410 (2012) 11– 17.
- 172 Sadia Ameen, M. Shaheer Akhtar, Hyung-Kee Seo, Young Soon Kim, Hyung Shik Shin. Influence of Sn doping on ZnO nanostructures from nanoparticles to spindle shape and their photoelectrochemical properties for dye sensitized solar cells. *Chemical Engineering Journal* 187 (2012) 351– 356.
- 173 Zhifeng Liu, Chengcheng Liu, Jing Ya, E. Lei. Controlled synthesis of ZnO and TiO₂ nanotubes by chemical method and their application in dye-sensitized solar cells. *Renewable Energy* 36 (2011) 1177-1181.
- 174 S.S. Kanmani, K. Ramachandran. Synthesis and characterization of TiO₂/ZnO core/shell nanomaterials for solar cell applications. *Renewable Energy* 43 (2012) 149-156.

- 175 R.C. Pawar, J.S. Shaikh, A.A. Babar, P.M. Dhere, P.S. Patil. Aqueous chemical growth of ZnO disks, rods, spindles and flowers: pH dependency and photoelectrochemical properties. *Solar Energy* 85 (2011) 1119–1127.
- 176 Swapnil B. Ambade, Rajaram S. Mane, Sung-Hwan Han, Soo-Hyoung Lee, Myung-Mo Sung, Oh-Shim Joo. Indoline-dye immobilized ZnO nanoparticles for whopping 5.44% light conversion efficiency. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 222 (2011) 366–369.
- 177 C.-Y. Chen, M.-W. Chen, J.-J. Ke, C.-A. Lin, J.R.D. Retamal, J.-H. He, Surface effects on optical and electrical properties of ZnO nanostructures, *Pure Appl. Chem.* 82 (2010) 2072–2255.
- 178 Chao-Shuo Chen, Po-Ching Yang, Yu-Min Shen, Shou-Yuan Ma, Shu-Chia Shiu, Shih-Che Hung, Shang-Hong Lin, Ching-Fuh Lin. The influence of wrinkled ZnO on inverted low bandgap thin film solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 101 (2012) 180–185.
- 179 Seong-Ho Baek, Seong-Been Kim, Jang-Kyoo Shin, JaeHyun Kim. Preparation of hybrid silicon wire and planar solar cell shaving ZnO antireflection coating by all-solution processes. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 96 (2012) 251–256.
- 180 P. de Bruyn, D.J.D. Moet, P.W.M. Blom, A facile route to inverted polymer solar cells using precursor based zinc oxide electron transport layer, *Org. Electron.* 11 (2010) 1419–1422.
- 181 J.P. Liu, S.S. Wang, Z.Q. Bian, M. Shan, C.H. Huang, Organic/inorganic hybrid solar cells with vertically oriented ZnO nanowires, *Appl. Phys. Lett.* 94 (2009) 173107-1–173107-3.
- 182 A.L. Briseno, T.W. Holcombe, A.I. Boukai, E.C. Garnett, S.W. Shelton, J.J.M. Frechet, P.D. Yang, Oligo- and polythiophene/ZnO hybrid nanowire solar cells, *Nano Lett.* 10 (2010) 334–340.
- 183 F. Xu, M. Dai, Y.N. Lu, L.T. Sun, Hierarchical ZnO nanowire-nanosheet architectures for high power conversion efficiency in dye-sensitized solar cells, *J. Phys. Chem. C* 114 (2010) 2776–2782.
- 184 J.-C. Wang, W.-T. Weng, M.-Y. Tsai, M.-K. Lee, S.-F. Horng, T.-P. Perng, C.-C. Kei, C.-C. Yu, H.-F. Meng, Highly efficient flexible inverted organic solar cells using atomic layer deposited ZnO as electron selective layer, *J. Mater. Chem.* 20 (2010) 862–866.]
- 185 Dong Chan Lim, Won Hyun Shim, Kwang-Dae Kim, Hyun Ook Seo, Jae-Hong Lim, Yongsoo Jeong, Young Dok Kim, Kyu Hwan Lee. Spontaneous formation of nanoripples on the surface of ZnO thin films as hole-blocking layer of inverted organic solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 (2011) 3036–3040.
- 186 Nauman Malik Muhammad, Navaneethan Duraisamy, Hyun-Woo Dang, Jeongdai Jo, Kyung-Hyun Choi. Solution processed Al doped ZnO film fabrication through electrohydrodynamic atomization. *Thin Solid Films* 520 (2012) 6398–6403.

References

- Eleckij A.V. UFN, 1997, 167, 945-972 (in Russ.).
- Saito R., Dresselhaus G. et al. Physical Properties of Carbon Nanotubes. Singapore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1998. 274 p.
- D'jachkov P. N. Uglerodnye nanotrubki. Stroenie, svojstva, primenenija. Binom. Laboratorija znaniy, 2006. 296 s (in Russ.).
- Hui Qian, Emile S. Greenhalgh, Milo S. P. Shaffer and Alexander Bismarck. J. Mater. Chem., 2010, 20, 4751-4762.
- Mishhenko S.V., Tkachev A.G. Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svojstva, primenenie. M.: Mashinostroenie, 2008. 320 s (in Russ.).
- Yun Wang and John T. W. Yeow. Journal of Sensors, 2009, 2009, 1-24.
- Mukul Kumar and Yoshinori Ando. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2010, 10, 3739-3758.
- Tsuneya Ando. PG Asia Materials, 2009, 1, 17-21.
- Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Charlier J. C., and Hernandez E. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 2004, 362, 2065-2098.
- Huang JiaQi, Zhang Qiang, Zhao MengQiang & WEI Fei. Chinese Science Bulletin, 2012, 57, 157-166.
- Keun Su Kim, German Cota-Sanchez, Christopher T Kingston, Matej Imris, Benoit Simard and Gervais Soucy. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, 40, 2375-2387.
- Morinobu Endo, Takuya Hayashi and Yoong-Ahm Kim. Pure Appl. Chem., 2006, 78, 1703-1713.
- Anna Moisala, Albert G. Nasibulin, David P. Brown, Hua Jiang, Leonid Khriachtchev, Esko I. Kauppinen. Chemical Engineering Science, 2006, 61, 4393-4402.
- See Wee Chee, Renu Sharma. Micron, 2012, 43, 1181-1187.
- Sophie L. Pirard., Georges Heyen., Jean-Paul Pirard. Applied Catalysis A: General, 2010, 382, 1-9.
- Qi Jianga, RongYang, Zhengwen He, Zhao Liu, Deyu Xie, Yong Zhao. Electrochimica Acta, 2011, 56, 5205-5209.
- Chandra Kishore S., Pandurangan A. Applied Surface Science, 2012, 258, 7936-7942.
- Gohier A., Kim K.H., Norman E.D., Gorintin L., Bondavalli P., Cojocaru C.S. Applied Surface Science, 2012, 258, 6024-6028.

- Kirsten Edgar, John L. Spencer. *Current Applied Physics*, 2006, 6, 419-421.
- Qian Zhao, Tingshun Jiang, Changsheng Li, Hengbo Yin. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2011, 17, 218-222.
- Sigurdson S., Sundaramurthy V., Dalai A.K., Adjaye J. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2009, 306, 23-32.
- Danafar F., Fakhru'l-Razi A., Mohd Salleh A.M., Awang Biak D.R. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 155, 37-48.
- Chee Howe See, Kieran J. MacKenzie, Oscar M. Dunens, Andrew T. Harris. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64, 3614 -3621.
- Alimorad Rashidi, Roghayeh Lotfi, Ehsaneh Fakhrmosavi, Masoud Zare. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 2011, 20, 372-376.
- Sarah Maghsoodi, Abasali Khodadadi, Yadollah Mortazavi. *Applied Surface Science*, 2010, 256, 2769-2774.
- Wilson Merchan-Merchan, Alexei V. Saveliev, Lawrence Kennedy, Walmy Cuello Jimenez. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36, 696-727.
- [Fusheng Xu](#), [Xiaofei Liu](#), [Stephen D. Tse](#). *Carbon*, 2006, 44, 570-577.
- Bao Q., Pan C. *Nanotechnology*, 2006, 17, 1016-1021.
- Zhang L., Tan Y., Resasco D.E. *Chem. Phys. Lett.*, 2006, 422, 198-203.
- Hu W., Gong D., Chen Z., Yuan L., Saito K., Grimes C.A. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79, 3083-3085.
- Klanwan J., Seto T., Furukawa T., Otani Y., Charinpanitkul T., Kohno M., Hirasawa M. *Journal of Nanoparticle Research*, 2010, 12, 2747-2755.
- Yanjie Su., Zhi Yang., Hao Wei., Eric Siu-Wai Kong., Yafei Zhang. *Applied Surface Science*, 2011, 257, 3123-3127.
- Liu Yun-quan, Chen Xiao-hua, Yang Zhi, Pu Yu-xing, Yi Bin. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2010, 20, 1012-1016.
- Bazargan A., McKay G. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 195-196, 377-391.
- Zhuo C., Hall B., Richter H., Levendis Y. *Carbon*, 2010, 48, 4024-4034.
- Yang Z., Zhang Q., Luo G., Huang J.Q., Zhao M.Q., Wei F. *Appl. Phys. A: Mater.*, 2010, 100, 533-540.
- Hong N., Wang B., Song L., Hu S., Tang G., Wu Y., Hu Y. *Mater. Lett.*, 2012, 66, 60-63.
- Song R., Ji Q. *Chem. Lett.*, 2011, 40, 1110–1112.
- Somanathan T., Pandurangan A. *New Carbon Mater.*, 2010, 25, 175-180.

- Green A.A., Hersam M.C. ACS Nano, 2011, 5, 1459-1467.
- Bandow S., Takizawa M., Hirahara K., Yudasaka M., Iijima S. Chem. Phys. Lett., 2001, 337, 48-54.
- Lyu S.C., Lee T.J., Yang C.W., Lee J.C. Chem. Comm., 2003, 1404-1405.
- Lyu S.C., Liu C.B., Lee J.C., Kang H.K., Yang C.W. Chem. Mater. 2003, 15, 3951-3954.
- Wei J.Q., Jiang B., Wu D.H., Wei B.Q. J Phys. Chem. 2004, 108, 8844-8847.
- Endo M., Muramastu H., Hayashi T., Kim Y.A., Terrones M., Dresselhaus M.S. Nature, 2005, 433-476.
- Jieshan Qiu, Zhiyu Wang, Zongbin Zhao, Tonghua Wang. Fuel, 2007, 86, 282-286.
- Godara A., Gorbatikh L., Kalinka G., Warriar A., Rochez O., Mezzo L., Luizi F., van Vuure A.W., Lomov S.V., Verpoest I. Composites Science and Technology, 2010, 70, 1346-1352.
- Huanzhen Shao, Zixing Shi, Jianhua Fang, Jie Yin. Polymer, 2009, 50, 5987-5995.
- Ashish Warriar, Ajay Godara, Olivier Rochez, Luca Mezzo, Frederic Luizi, Larissa Gorbatikh, Stepan V. Lomov, Aart Willem VanVuure, Ignaas Verpoest. Composites: Part A, 2010, 41, 532-538.
- Sohel Rana, Ramasamy Alagirusamy, Mangala Joshi. Composites: Part A, 2011, 42, 439-445.
- Daniel R. Bortz, Căsar Merino, Ignacio Martin-Gullon. Composites: Part A, 2011, 42, 1584-1591.
- Niels De Greef, Larissa Gorbatikh, Stepan V. Lomov, Ignaas Verpoest. Composites: Part A, 2011, 42, 1635-1644.
- Zdenko Spitalsky, Dimitrios Tasis, Konstantinos Papagelis, Costas Galiotis. Progress in Polymer Science, 2010, 35, 357-401.
- Meysam Rahmat, Pascal Hubert. Composites Science and Technology, 2011, 72, 72-84.
- Suryasarathi Bose, Rupesh A. Khare, Paula Moldenaers. Polymer, 2010, 51, 975-993.
- ChandraKishore S., Pandurangan A. Applied Surface Science, 2012, 258, 7936- 7942.
- Vigolo B., Poulin P., Lucas M., Launois P., Bernier P. Appl. Phys. Lett., 2002, 81, 1210-1212.
- Tsu-Wei Chou, Limin Gao, Erik T. Thostenson, Zuoguang Zhang, Joon-Hyung Byun. Composites Science and Technology, 2010, 70, 1-19.
- Sunny S. Wicks, Roberto Guzman de Villoria, Brian L. Wardle. Composites Science and Technology, 2010, 70, 20-28.
- Logakis E., Pandis Ch., Pissis P., Pionteck J., Potschke P. Composites Science and Technology, 2011, 71, 854-862.

- Masanori Imai, Kousuke Akiyama, Tomo Tanaka, Eiichi Sano. *Composites Science and Technology*, 2010, 70, 1564-1570.
- Kuronuma Y., Takeda T., Shindo Y., Narita F., Wei Z. *Composites Science and Technology*, 2012, 72, 1678-1682.
- Kingsley K.C. Ho, Siti-Ros Shamsuddin, Matthew Laffan, Alexander Bismarck. *Composites: Part A*, 2011, 42, 453-461.
- Behnam Ashrafi, Jingwen Guan, Vahid Mirjalili, Yunfa Zhang, Li Chun, Pascal Hubert, Benoit Simard, Christopher T. Kingston, Orson Bourne, Andrew Johnston. *Composites Science and Technology*, 2011, 71, 1569-1578.
- Ali Can Zaman, Cem B. Üstündag, Ali Celik, Alpogut Kara, Figen Kaya, Cengiz Kaya. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, 30, 3351-3356.
- Groven L.J., Puszynski J.A. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 183, 515-525.
- Bohua Wu, Yinjie Kuang, Xiaohua Zhang, Jinhua Chen. *Nano Today*, 2011, 6, 75-90.
- Peng X.H., Chen J.Y., Misewich J.A., Wong S.S. *Chem. Soc. Rev.*, 2009, 38, 1076-1098.
- Zhang S., Shao Y.Y., Yin G.P., Lin Y.H. *J. Mater. Chem.*, 2010, 20, 2826-2830.
- Rebollo-Plata B., Muñoz-Sandoval E., López-Urias F., Hernández-Cortina E.L., Terrones H., Terrones M. J. *Nanosci. Nanotechnol.*, 2010, 10, 3965-3972.
- Jiang S.J., Zhu L., Ma Y.W., Wang X.Z., Liu J.G., Zhu J.M., Fan Y.N., Zou Z.G., Hu Z. J. *Power Sources*, 2010, 195, 7578-7582.
- Kiriaki Kardimi, Theodoros Tsoufis, Aphrodite Tomou, Bart J. Kooi, Mamas I. Prodromidis, Dimitrios Gournis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37, 1243-1253.
- Lee D.H., Lee W.J., Kim S.O., Kim Y.H. *Physical Review Letters*, 2011, 106, 175502-175505.
- O'Hare A., Kusmartsev F. V., Kugel K. I. *Nano Lett.*, 2012, 12, 1045-1052.
- Geim A.K., Novoselov K.S. *Nature Materials*, 2007, 6, 183-191.
- Abanin D. A., Gorbachev R.V., Novoselov K. S., Geim A. K. & Levitov L. S. *Phys. Rev. Lett.* 2011, 107, 096601.
- Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.M., Katsnelson M.I., Grigorieva I.V., Dubonos S.V., Firsov A.A. *Nature*, 2005, 438, 197-200.
- Hill E.W., Geim A.K., Novoselov K., Schedin F., Blake P. *IEEE Trans. Mag.*, 2006, 42, 2694-2696.
- Bae S., Kim H., Lee Y., Xu X.F., Park J.S., Zheng Y., Balakrishnan J., Lei T., Kim H.R., Song Y.I., Kim Y.J., Kim K.S., Ozyilmaz B., Ahn J.H., Hong B.H., Iijima S. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5, 574-578.
- Chen D., Tang L.H., Li J.H. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39, 3157-3180.

- Wu Z.S., Wang D.W., Ren W., Zhao J., Zhou G., Li F., Cheng H.M. *Advanced Functional Materials*, 2010, 20, 3595-3602.
- Yoo J.J., Balakrishnan K., Huang J., Meunier V., Sumpter B.G., Srivastava A., Conway M., Mohana Reddy A.L., Yu J., Vajtai R. *Nano Letters*, 2011, 11, 1423-1427.
- Liu C., Yu Z., Neff D., Zhamu A., Jang B.Z. *Nano Letters*, 2010, 10, 4863-4868.
- Dong L., Gari R.R.S., Li Z., Craig M.M., Hou S. *Carbon*, 2010, 48, 781-787.
- Yongye Liang, Yanguang Li, Hailiang Wang, Jigang Zhou, Jian Wang, Tom Regier & Hongjie Dai. *Nature Materials*, 2011, 10, 780-786.
- Lian P.C., Zhu X.F., Liang S.Z., Li Z., Yang W.S., Wang H.H. *Electrochimica Acta*, 2010, 55, 3909-3914.
- Hyun-Jung Choi, Sun-Min Jung, Jeong-Min Seo, Dong Wook Chang, Liming Daic Jong-Beom Baek. *Nano Energy*, 2012, 1, 534-551.
- Bai H., Li C., Shi G.Q. *Advanced Materials*, 2011, 23, 1089-1115.
- Zhong-Shuai Wu, Guangmin Zhou, Li-Chang Yin, Wencai Ren, Feng Li, Hui-Ming Cheng. *Nano Energy*, 2012, 1, 107-131.
- Frank Schwierz. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5, 487-496.
- Britnell L., Gorbachev R. V., Jalil R., Belle B. D., Schedin F., Mishchenko A., Georgiou T., Katsnelson M. I., Eaves L., Morozov S. V., Peres N. M. R., Leist J., Geim A. K., Novoselov K. S., Ponomarenko L. A. *Science*, 2012, 335, 947-950.
- Hertel S., Waldmann D., Jobst J., Albert A., Albrecht M., Reshanov S., Schöner A., Krieger M., [Weber](#) H.B. *Nature Communications* 3, 2012, 17, 957, doi:10.1038/ncomms1955.
- Juan Xie, Yanting Li, Wei Zhao, Li Bian, Yu Wei. *Powder Technology*, 2011, 207, 140-144.
- Szabó Z., Volk J., Fülöp E., Deák A., Bársony I. [Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications](#), 2012, 11, 1-7.
- Yanxia Yan, Lanyang Ji, Jun Wang, Qi Liu, Xiaoyan Jing, Rumin Li, Lianhe Liu. *Powder Technology*, 2012, 232, 134-140.
- Lanqin Tang, Shaofeng Yang, Yupeng Guo, Bing Zhou. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 165, 370-377.
- Khorsand Zak A., abd. Majid W.H., Wang H.Z., Ramin Yousefi, A. Moradi Golsheikh, Ren Z. F. *Ultrason. Sonochem.*, 2012, 20, 395-400.
- Zhenfeng Zhu, Dong Yang, Hui Liu. *Advanced Powder Technology*, 2011, 22, 493-497.
- NaghmeH Faal Hamedani, Ali Reza Mahjoub, Abbas Ali Khodadadi, Yadollah Mortazavi. *Sensors and Actuators B*, 2011, 156, 737-742.

- Jai Singh, Hudson M.S.L., Pandey S.K., Tiwari R.S., Srivastava O.N. International journal of hydrogen energy, 2012, 37, 3748-3754.
- Jun Huang, Liang Hu, Honghai Zhang, Jie Zhang, Xiaopeng Yang, Dehui Li, Liping Zhu, ZhizhenYe. Journal of Crystal Growth, 2012, 351, 93-100.
- Chunye Li, Hongwei Liang, Jianze Zhao, Qiuju Feng, Jiming Bian, Yang liu, Rensheng Shen, Wangcheng Li, Guoguang Wu., Du G.T. Applied Surface Science, 2010, 256, 6770-6774.
- Changyong Lan, Jiangfeng Gong, Chunming Liu. Applied Surface Science, 2012, 261, 385-389.
- Durgajanani Sivalingam, Jeyaprakash Beri Gopalakrishnan, John Bosco Balaguru Rayappan. Sensors and Actuators B: [Chemical](#), 2012, 166-167, 624-631.
- Mohammad Reza Khajavi, Daniel John Blackwood, German Cabanero, Ramon Tena-Zaera. Electrochimica Acta, 2012, 69, 181-189.
- Sendi R.K., Mahmud S. [Applied Surface Science](#), 2012, 261, 128-136.
- Yinhua Li, Jian Gong, Yulin Deng. Sensors and Actuators A, 2010, 158, 176-182.
- Wu X.L., Siu G.G., Fu C.L., Ong H.C. Appl. Phys. Lett., 2001, 78, 2285-2287.
- Ghosh M., Raychaudhuri A.K. Nanotechnology, 2008, 19, 445704.
- Koleva M.E., Dikovska A. Og., Nedyalkov N.N., Atanasov P.A., Bliznakova I.A. Applied Surface Science, 2012, 258, 9181-9185.
- Lanlan Sun, Dongxu Zhao, Meng Ding, Haifeng Zhao, Zhenzhong Zhang, Binghui Li, Dezhen Shen. Applied Surface Science, 2012, 258, 7813-7819.
- By Jae-Hong Lim, Chang-Ku Kang, Kyoung-Kook Kim, Il-Kyu Park, Dae-Kue Hwang, and Seong-Ju Park. Adv. Mater., 2006, 18, 2720-2724.
- Jiun-Ting Chen, Wei-Chih Lai, Chi-Heng Chen, Ya-Yu Yang, Jinn-Kong Sheu, and Li-Wen Lai. Optics Express, 2011, 19, 11873-11879.
- Xiang Yang Ma, Pei Liang Chen, Dong Sheng Li, De Ren Yang. Solid State Phenomena, 2008, 131-133, 625-628.
- Sun H., Zhang Q., Zhang J., Deng T. and Wu J. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2008, 90, 543-546.
- Li L., Yang Z., Kong J. Y. and Liu J. L. Applied Physics Letters, 2009, 95, 232117-232117-3.
- Chih-Yang Chang, Fu-Chun Tsao, Ching-Jen Pan, and Gou-Chung Chi. Applied Physics Letters, 2006, 88, 173503-173503-3.
- Su-Ling Zhao, Peng-Zhi Kan, Zheng Xu, Chao Kong, Da-Wei Wang, Yue Yan. Organic Electronics, 2010, 11, 789-793.
- Da-Wei Wang, Su-Ling Zhao, Zheng Xu, Chao Kong, Wei Gong. Organic Electronics, 2011, 12, 92-97.

- B. Pelatt D., Huang C.C., J. Conley F. Jr. *Solid-State Electronics*, 2010, 54, 1143-1149.
- Chien-Chih Huang, Brian D Pelatt and John F Conley Jr. *Nanotechnology*, 2010, 21, 195307.
- Lupan O., Ursaki V.V., Chai G., Chow L., Emelchenko G.A., Tiginyanu I.M., Gruzintsev A.N., Redkin A.N. *Sensors and Actuators B*, 2010, 144, 56-66.
- Fan D.L., Zhu F.Q., Cammarata R.C., Chien C.L. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89, 223115.
- Lukas Schmidt-Mende and Judith L. MacManus-Driscoll. *Materials Today*, 2007, 10, 40-48.
- Ang Wei, Liuhua Pan, Wei Huang. *Materials Science and Engineering B*, 2011, 176, 1409-1421.
- Park J.Y., Choi S.W., Kim S.S. *Nanoscale Res. Lett.*, 2010, 5, 353-359.
- Chang C.C., Chiu N.F., Lin D.S., Chu-Su Y., Liang Y.H., Lin C.W. *Anal. Chem.*, 2010, 82, 1207-1212.
- Wei A., Sun X.W., Wang J.X., Lei Y., Cai X.P., Li C.M., Dong Z.L., Huang W. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89, 123902-1-123902-3.
- Wang J.X., Sun X.W., Wei A., Lei Y., Cai X.P., Li C.M., Dong Z.L. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88, 233106-1-233106-3.
- Bhattacharyya P., Mishra G.P., Sarkar S.K. *Microelectronics Reliability*, 2011, 51, 2185-2194.
- Prabhakar Rai, Yeon-Tae Yu. *Sensors and Actuators B*, 2012, 161, 748-754.
- Lim Y.T., Son J.Y., Rhee J.-S. *Ceramics International*, 2013, 39, 887-890.
- Shafiei M., Yu J., Arsat R., Kalantar-zadeh K., Comini E., Ferroni M., Sberveglieri G., Wlodarski W. *Sensors and Actuators B*, 2010, 146, 507-512.
- Shan-Wei Fan, Arvind K. Srivastava, Vinayak P. Dravid. *Sensors and Actuators B*, 2010, 144, 159-163.
- Calestani D., Zha M., Mosca R., Zappettini A., Carotta M.C., Di Natale V., Zanotti L. *Sensors and Actuators B*, 2010, 144, 472-478.
- Lexi Zhang, Jianghong Zhao, Haiqiang Lu, Li Li, Jianfeng Zheng, Jing Zhang, Hui Li, Zhenping Zhu. *Sensors and Actuators B*, 2012, 171-172, 1101-1109.
- Li-Hong Cheng, Liao-Ying Zheng, Lei Meng, Guo-Rong Li, Yan Gu, Fu-Ping Zhang, Rui-Qing Chu, Zhi-Jun Xu. *Ceramics International*, 2012, 38, S457-S461.
- Changsheng Xie, Liqi Xiao, Mulin Hu, Zikui Bai, Xianping Xia, Dawen Zeng. *Sensors and Actuators B*, 2010, 145, 457-463.
- Sahar Hemmati, Azam Anaraki Firooz, Abbas Ali Khodadadi, Yadollah Mortazavi. *Sensors and Actuators B*, 2011, 160, 1298-1303.
- Zhong-xia Duan, Guo-qin Yu, Jun-biao Liu, Jun Liu, Xiao-wen Dong, Li Han, Peng-yun Jin. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2011, 21, 159-163.

Chang Zhou, Qingqing Fang, Fangliang Yan, Weina Wang, Keyue Wu, Yanmei Liu, Qingrong Lv, Hanming Zhang, Qiping Zhang, Jinguang Li, Qiongqiong Ding. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324, 1720-1725.

Sunil K. Arya, Shibu Saha, Jaime E. Ramirez-Vick, Vinay Gupta, Shekhar Bhansali, Surinder P. Singh. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 737, 1-21.

Ahmad M., Pan C., Luo Z., Zhu J. *J. Phys. Chem. C*, 2010, 114, 9308-9313.

Gu B., Xu C., Yang C., Liu S., Wang M. *Biosens. Bioelectron.*, 2011, 26, 2720-2723.

Fulati A., Ali S.M.U., Asif M.H., Alvi N.u.H., Willander M., Brannmark C., Stralfors P., Borjesson S.I., Elinder F., Danielsson B. *Sens. Actuat. B: Chem.*, 2010, 150, 673-680.

Hoang-Si Hong, Duy-Thach Phan, Gwi-Yang Chung. *Sensors and Actuators B*, 2012, 171-172, 1283-1287.

Roya Dastjerdi, Majid Montazer. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, 79, 5-18.

Anitha S., Brabu B., John Thiruvadigal D., Gopalakrishnan C., Natarajan T.S. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87, 1065-1072.

Stanković A., Dimitrijević S., Uskoković D. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, 102, 21-28.

Trandafilović L.V., Bozanić D.K., Dimitrijević-Branković S., Luyt A.S., Djoković V. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 88, 263-269.

Thongsuriwong K., Amornpitoksuk P., Suwanboon S. *Advanced Powder Technology*, 2013, 24, 275-280.

Hem Raj Pant, Bishweshwar Pant, Ram Kumar Sharma, Altangerel Amarjargal, Han Joo Kim, Chan Hee Park, Leonard D. Tijing, Cheol Sang Kim. *Ceramics International*, 2013, 39, 1503-1510.

Tarwal N. L., Patil P. S. *Applied surface science*, 2010, 256, 7451-7456.

Quentin Simon, Davide Barreca, Daniela Bekermann, Alberto Gasparotto, Chiara Maccato, Elisabetta Comini, Valentina Gombac, Paolo Fornasiero, Oleg I. Lebedev, Stuart Turner, Anjana Devi, Roland A. Fischer, Gustaaf Van Tendeloo. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36, 15527-15537.

Chih-Hsiung Hsu, Dong-Hwang Chen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36, 15538-15547.

Yabin Li, Zhifeng Liu, Yun Wang, Zhichao Liu, Jianhua Han, Jing Ya. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37, 15029-15037.

Gabriele Centi, Siglinda Perathoner. *Coordination Chemistry Reviews*, 2011, 255, 1480-1498.

Rowan Leary, Aidan Westwood. *Carbon*, 2011, 49, 741-772.

- Satish Meshram, Rohan Limaye, Shailesh Ghodke, Shachi Nigam, Shirish Sonawane, Rajeev Chikate. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 172, 1008-1015.
- Chia-Chang Lin, Yu-Ju Chiang. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 181-182, 196-205.
- Mehmet Konyar, Cengiz Yatmaz H., Koray Öztürk. *Applied Surface Science*, 2012, 258, 7440-7447.
- Jongnavakit P., Amornpitoksuk P., Suwanboon S., Ndiege N. *Applied Surface Science*, 2012, 258, 8192-8198.
- Ibram Ganesh, Chandra Sekhar P.S., Padmanabham G., Sundararajan G. *Appl. Surf. Sci.*, 2012, 259, 524-537.
- Ashokrao B. Patil, Kashinath R. Patil, Satish K. Pardeshi. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183, 315-323.
- Chungui Tian, Qi Zhang, Baojiang Jiang, Guohui Tian, Honggang Fu. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509, 6935-6941.
- Saravanan R., Karthikeyan S., Gupta V.K., Sekaran G., Narayanan V., Stephen A. *Materials Science & Engineering C*, 2013, 33, 91-98.
- Torres Martinez D.Y., Castanedo Perez R., Torres Delgado G., Zelaya Angel O. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2012, 235, 49-55.
- Zhao T., Liu Z., Nakata K., Nishimoto S., Murakami T., Zhao Y., Jiang L., Fujishima A. *J. Mater. Chem.*, 2010, 20, 5095-5099.
- Kim J., Van B. der Bruggen. *Environ. Pollut.*, 2010, 158, 2335-2349.
- Stefan Balta, Arcadio Sotto, Patricia Luis, Lidia Benea, Bart Van der Bruggen, Jeonghwan Kim. *Journal of Membrane Science*, 2012, 389, 155-161.
- Hongwei Bai, Zhaoyang liu, Darren Delai Sun. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2012, 410, 11-17.
- Sadia Ameen, Shaheer Akhtar M., Hyung-Kee Seo, Young Soon Kim, Hyung Shik Shin. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 187, 351-356.
- Zhifeng Liu, Chengcheng Liu, Jing Ya, Lei E. *Renewable Energy*, 2011, 36, 1177-1181.
- Kanmani S.S., Ramachandran K. *Renewable Energy*, 2012, 43, 149-156.
- Pawar R.C., Shaikh J.S., Babar A.A., Dhere P.M., Patil P.S. *Solar Energy*, 2011, 85, 1119-1127.
- Swapnil B. Ambade, Rajaram S. Mane, Sung-Hwan Han, Soo-Hyoung Lee, Myung-Mo Sung, Oh-Shim Joo. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2011, 222, 366-369.
- Chen C.-Y., Chen M.-W., Ke J.-J., Lin C.-A., Retamal J.R.D., He J.-H. *Pure Appl. Chem.*, 2010, 82, 2072-2255.

Chao-Shuo Chen, Po-ChingYang, Yu-MinShen, Shou-YuanMa, Shu-ChiaShiu, Shih-Che Hung, Shang-HongLin, Ching-FuhLin. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, 101, 180-185.

Seong-Ho Baek, Seong-Been Kim, Jang-Kyoo Shin, Jae Hyun Kim. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, 96, 251-256.

de Bruyn P., Moet D.J.D., Blom P.W.M. *Org. Electron.*, 2010, 11, 1419-1422.

Liu J.P., Wang S.S., Bian Z.Q., Shan M., Huang C.H. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94, 173107-1–173107-3.

Briseno A.L., Holcombe T.W., Boukai A.I., Garnett E.C., Shelton S.W., Frechet J.J.M., Yang P.D. *Nano Lett.*, 2010, 10, 334–340.

Xu F., Dai M., Lu Y.N., Sun L.T. *J. Phys. Chem. C*, 2010, 114, 2776-2782.

Wang J.-C., Weng W.-T., Tsai M.-Y., Lee M.-K., Horng S.-F., Perng T.-P., Kei C.-C., Yu C.-C., Meng H.-F. *J. Mater. Chem.*, 2010, 20, 862-866.

Dong Chan Lim, Won Hyun Shim, Kwang-Dae Kim, Hyun Ook Seo, Jae-Hong Lim, Yongsoo Jeong, Young Dok Kim, Kyu Hwan Lee. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2011, 95, 3036-3040.

Nauman Malik Muhammad, Navaneethan Duraisamy, Hyun-Woo Dang, Jeongdai Jo, Kyung-Hyun Choi. *Thin Solid Films*, 2012, 520, 6398-6403.

Х.А. Абдуллин¹, Б.Н. Мұқашев²

(¹Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертханасы, ҚР БҒМ, Алматы қ., Қазақстан; ²Физика-техникалық институты, Алматы қ., Қазақстан)

ЖАҢА МАТЕРИАЛДАРДЫ АЛУ ЖӘНЕ МАТЕРИАЛТАНУ саласындағы НАНОТЕХНОЛОГИЯ

Резюме

Жаңа материалдарды алу және материалтану саласында технологияның дамуындағы соңғы жылдардағы зерттеулеріне шолу жасалған. Көміртекті наноматериалдарды – көміртекті нанотүтікшелерді (КНТ) және графенді жасау технологиясына және күн энергетикасында, сенсорикада, катализде қолдануда үлкен болашаққа ие тотықты нанокұрылымды жартылай өткізгіштерді жасау технологиясына екпін қойылған. Кең масштабты қолдануда ең болашақты болып табылатын КНТ синтездеу тәсілдері бойынша

бұдан химиялық тұндыру, плазманың қосымша әсері, реакторда белсенді қайнаған қабатты қолдану арқылы жүргізілген жұмыстар қарастырылған. Кең қолданыс тапқан КНТ, графенді, олардың негізіндегі композиттерді қолдану мәселелері қарастырылған. ZnO негізіндегі материалдардың кең класын құру технологиясына және оларды жарық диодтарында, газдық, химиялық, биосенсорлық және басқа да құрылғыларда қолдануына қысқаша шолу жасалған.

Тірек сөздер: жартылай өткізгішті электроника, фотоника, плазмоника.

КН.А. Abdullin 1, В.Н. Mukashev 2

(1 National Nanotechnological Laboratory, Almaty, Kazakhstan;

2 Institute of Physics & Technology, Almaty, Kazakhstan)

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND NANOSTRUCTURES

Summaru

A brief overview of research in the field of development and applications of semiconductor device structures is given. Modification techniques and nanostructure synthesis methods, such as ion beams, laser lithography and engineering defects are considered. Widely used methods for the synthesis of nanostructures are discussed. Nanostructures grown by chemical vapor deposition and molecular beam epitaxy using template synthesis (e.g., nanoporous aluminum oxide), growth through catalytic mechanism involving catalysts laser sputtering, elektrospining, etching and others is briefly reviewed. A number of devices such as light detector and charged particle detector, resonant high frequency tunneling diodes, LED and TFTs for active matrix displays with LED and OLED, tunable semiconductor lasers for various applications is considered. Studies on development of molecular electronics and organic semiconductors, on thermoelectric and piezoelectric generators, photoelectrochemical cells for water splitting, semiconductor quantum dots are discussed. It is noted that in recent years, such direction in semiconductor electronics, photonics and plasmonics as the synthesis of photonic crystals and plasmonic structures, improving and creating solar cells are rapidly developing areas. A brief review of researches on the solar cells based on Si, AIII BV, CdTe, $\text{CuIn}_x\text{Ga}(1-x)\text{Se}_2$ is presented.

Keywords: semiconductor electronics, photonics, plasmonics, solar cells.

Поступила 07.10.2013 г.