

**НАНОТЕХНОЛОГИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ
РАЗЛИЧНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ (обзор).
II. ТЕХНОЛОГИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ
И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ И РАЗВИТИЯ В XXI ВЕКЕ**

© Е. А. Соснов, А. А. Малков, А. А. Малыгин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26
E-mail: sosnov@lti-gti.ru

Поступила в Редакцию 30 июля 2021 г.

После доработки 3 октября 2021 г.

Принята к публикации 3 октября 2021 г.

Вторая часть обзора посвящена анализу областей и результатов применения нанотехнологии на основе молекулярного наслаивания в различных отраслях промышленности в последние 20 лет, а также оценке перспектив дальнейшего развития и коммерциализации указанного процесса. Представлены достижения отечественных и зарубежных исследователей и промышленников по созданию метода молекулярного наслаивания и коммерциализации твердофазных материалов различного функционального назначения с улучшенными эксплуатационными характеристиками: подзатворные диэлектрики и другие виды покрытий в электронике и смежных областях; тонкопленочные структуры для элементов солнечных батарей, суперконденсаторов, мемристоров; сорбционно-каталитические, в том числе мембранные материалы; полимерные и гибридные материалы с регулируемым гидрофильными и электретыными свойствами, пониженной горючестью; «умные» материалы для сенсорного приборостроения; ядерные пигменты и наполнители; электролюминесцентные покрытия и модифицированные люминофоры, керамические композиции и др. Обоснованы наиболее перспективные направления практического применения нанотехнологии молекулярного наслаивания в ближайшее десятилетие.

Ключевые слова: молекулярное наслаивание; нанотехнология; твердое тело; поверхность; неорганические наноматериалы; гибридные наноматериалы; функциональные свойства; коммерциализация

DOI: 10.31857/S0044461821090024

Введение

Исследования в области молекулярного наслаивания (МН) — метода направленного синтеза твердых веществ с заданным составом и строением,

созданного более полувека назад советскими учеными С. И. Кольцовым под руководством В. Б. Алесковского (в настоящее время чаще используется наименование процесса как «атомно-слоевое осаждение», АСО), — в XXI веке получили международ-

ное признание, стали активно развиваться во многих странах. В последние 20 лет появилось беспрецедентное количество (более 120) обзоров, частично представленных в первой части данного обзора [1], описывающих организацию процесса синтеза МН-АСО с использованием различных реагентов и их сочетаний на разных по химической природе, геометрическим размерам и формам матрицах. В эти годы с применением МН-АСО был получен целый ряд новых материалов и изделий различного функционального назначения.

Цель второй части обзора — рассмотрение основных результатов, опубликованных за последние 20 лет, по созданию методом молекулярного наслаивания твердофазных материалов различного функционального назначения и прогноз дальнейшего развития и коммерциализации нанотехнологии, базирующейся на принципах нового прецизионного процесса синтеза.

Общие направления прикладных разработок по молекулярному наслаиванию в XXI веке

Анализ всей совокупности доступной научно-технической информации позволил установить, что в последние 20 лет на базе технологии молекулярного наслаивания активно развивались как технологические приемы проведения процесса с использованием физико-химических методов воздействия (активация или увеличение плотности функциональных группировок на поверхности матрицы за счет плазмохимической обработки [2, 3], активация электронным пучком [4–6], локальная сорбция активного окислителя [7], обработка коронным разрядом [8]; активация используемых реагентов (чаще — перевод в радикальную форму, т. е. радикало-стимулированное наслаивание) плазмохимической обработкой низкомолекулярного реагента [9–11] или воздействием на газовый поток электронным пучком [12]), так и оборудование для ускорения проведения процесса синтеза:

— на базе конструкции, реализованной еще в 1985 г. В. П. Толстым [13], разработаны установки с газовой завесой из газа-носителя, разделяющей потоки реагентов [14–18];

— созданы установки для обработки рулонных материалов [19, 20], в том числе барабанного типа [21, 22];

— изготовлен и испытан реактор колонного типа с пространственным разделением партий обрабатываемого дисперсного материала [23];

— сконструированы реакторы с взвешенным слоем, в том числе барабанного типа [24–26];

— создано оборудование, включающее узлы активации как поверхности модифицируемых материалов, так и применяемых низкомолекулярных реагентов [27, 28].

В последние годы получила развитие химическая сборка по технологии молекулярного наслаивания тонкослойных покрытий из многокомпонентных материалов с использованием нескольких прекурсоров. При этом показана возможность создания (рис. 1) наноматериалов (в том числе гибридных органо-неорганических) как с периодической (наноламинаты) [29–31], так и градиентной структурой (многокомпонентной [32–34] или однокомпонентной с градиентом плотности [35]); твердых растворов [36–38]; материалов, легированных вторым компонентом [39–42]. Таким путем собирают тонкопленочные структуры не только халькогенидных полупроводников, используемых в фотопреобразователях солнечного излучения [43, 44], но и сегнетоэлектриков [45], ферромагнетиков [46, 47], материалов, проявляющих свойства сверхпроводников (CuO [48], TiN [49]), органо-неорганических гибридных [50] и др. [51].

Следует отметить, что активно продвигаемые в последние 20 лет технологии MLD (Molecular Layer Deposition — молекулярно-слоевое осаждение) [53–56], ALEt (Atomic Layer Etching — атомно-слоевое травление) [57–60] и ионного наслаивания (Layer-by-Layer) [61–63] как самостоятельные методы прецизионного создания наноматериалов по сути являются элементами технологии молекулярного наслаивания. Согласно работам С. И. Кольцова [64, 65], изменение состава функциональных центров на поверхности твердого тела может осуществляться за счет не только реакций замещения [1], но и реакций включения и присоединения (основа ионного наслаивания). Во всех рассматриваемых реакциях реагент, взаимодействующий с функциональными группами матрицы, может быть любым, в том числе макромолекулярным (например, коллоидная частица в процессе ионного наслаивания) или органической природы (MLD). Поэтому какие бы особенности технологии не выделяли авторы, вышеперечисленные процессы мы рассматриваем в одном ряду как элементы технологии молекулярного наслаивания.

Благодаря работам Steven M. George под названием «атомно-слоевое травление» (Atomic Layer Etching, ALEt) [58, 59, 66–69] получила развитие еще одна возможность технологии молекулярного наслаивания. В основе этого процесса лежат реакции диссоциации функциональных группировок [1] в условиях, когда энергия связи между элементами остова матрицы ниже, чем связь элемента остова с функци-

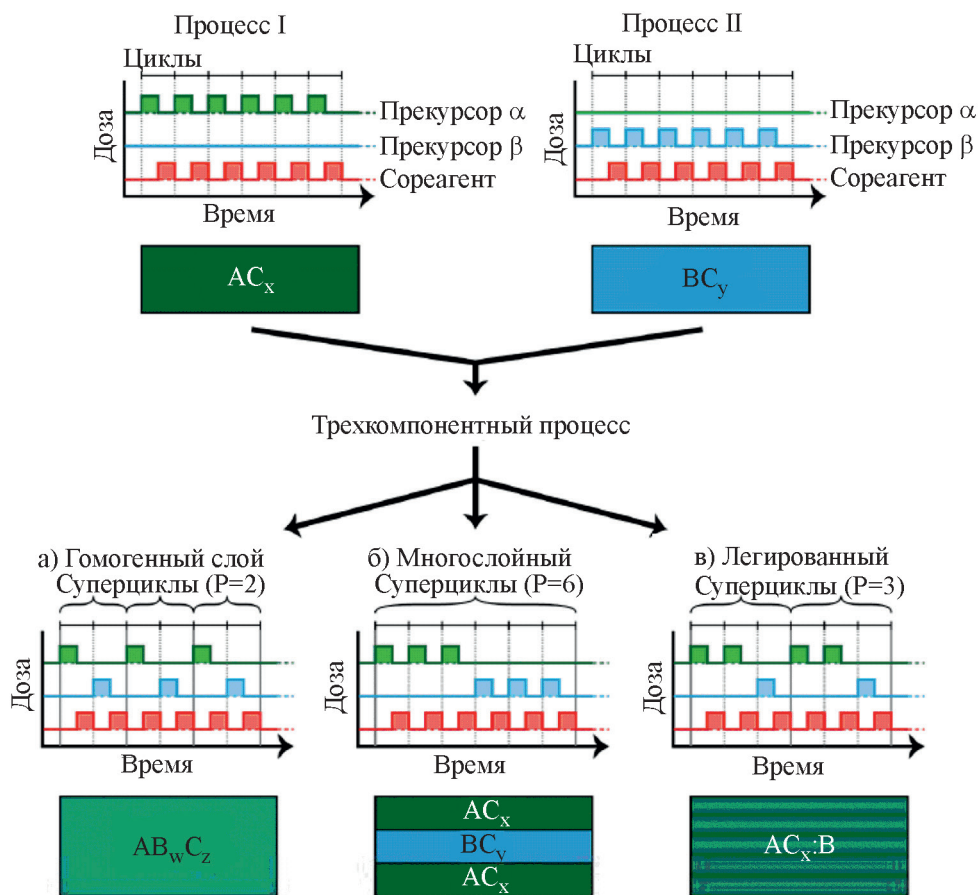


Рис. 1. Схематическое изображение получения по технологии молекулярного наслаивания: однородной двухкомпонентной пленки (а), слоистой структуры (б) и легированного материала (в) [52].*

ональной группировкой ($E_{A-A} < E_{A-B}$). Указанное направление технологии позволяет с точностью до одного атомарного слоя управлять рельефом матрицы, что представляет несомненный интерес для развития технологий нанoeлектроники [70].

Кроме того, на базе комбинации технологий молекулярного наслаивания и ALEt разрабатываются технологии пространственно-ограниченного синтеза, для которых предлагается собственное наименование «осаждение на выбранной площадке» (Area-Selective Deposition, ASD) [67, 71, 72].

Самостоятельное название «молекулярно-слоевое осаждение» (Molecular Layer Deposition, MLD) предложено и для технологии молекулярного наслаивания органических и органо-неорганических гибридных нанопокровов [53–56, 73–78].

Существенно расширилась номенклатура прекурсоров, используемых для нанесения покрытий различного химического состава, за счет разработки и

организации промышленного производства большого числа металлоорганических соединений [79–81].**

Особо следует отметить появление первых работ по кинетическому описанию процесса молекулярного наслаивания [82], а также квантово-химическому моделированию строения формирующихся в ходе молекулярного наслаивания группировок и термодинамике процесса синтеза [83–93].

Применение нанотехнологии молекулярного наслаивания в электронике и смежных областях

Микро- и нанoeлектроника. Наиболее масштабное внедрение технологии молекулярного наслаивания происходит в микроэлектронике и смежных областях:

— создание *high-k* тонких диэлектрических слоев (в том числе легированных и нестехиометрических);

** Перечень предлагаемых прекурсоров можно найти, например, в каталогах: MOCVD, CVD & ALD Precursors. Newburyport, MA, USA: Strem Chemicals, Inc., 2018. 70 p. City Chemical LLC. Chemical Products Catalogue. West Haven, CT, USA: City Chemical LLC, 2020. 768 p.

* Перепечатано с разрешения American Chemical Society от 20.07.2021. Copyright 2019 American Chemical Society.

— нанесение металлических тонкопленочных структур;

— формирование конформных нитридных покрытий.

Переход в микроэлектронике на топологические размеры менее 50 нм потребовал не только уменьшения толщины диэлектрических слоев (в первую очередь — подзатворных диэлектриков комплементарных металл–оксид–полупроводник транзисторов (КМОП-транзисторов) логических устройств), ранее формировавшихся на основе SiO_2 , но и использования для этих целей материалов с более высокой диэлектрической проницаемостью [94, 95]. Наибольший интерес представляют достаточно просто получаемые диэлектрические слои на основе ZrO_2 [96–99], HfO_2 [100–107] и Ta_2O_5 [108–110], а также различные комбинированные соединения на их основе: двухкомпонентные ($\text{HfO}_2\text{--ZrO}_2$ [111], $\text{HfO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ [112–116], $\text{ZrO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ [114, 117–119], $\text{TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ [120], $\text{HfO}_2\text{--TiO}_2$ [121–123], $\text{ZrO}_2\text{--Ta}_2\text{O}_5$ [124, 125]), трехкомпонентные $\text{HfO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ [126].

Важным преимуществом метода молекулярного наслаивания является конформность нанесенных слоев на поверхности с высоким аспектным соотношением [91, 127]. Это обусловило еще одно применение молекулярного наслаивания в микроэлектронике — нанесение *high-k* оксидов для трехмерных конденсаторов основной памяти Dynamic Random Access Memory (DRAM) [128–134], в которых аспектное соотношение превышает величину 10:1.

Тонкие конформные диэлектрические покрытия с высокой диэлектрической проницаемостью также могут найти применение при создании энергоемких малоразмерных конденсаторов (так называемых «суперконденсаторов») [135–141].

Особо следует остановиться на подходах к получению наноразмерных аморфных гомогенных диэлектрических покрытий на основе оксидной ($\text{TiO}_2\text{--V}_2\text{O}_5$) [142] или оксокарбидной (AlSiCOH) [143, 144] керамики. Химическая сборка и последующая сшивка привитых элементарноорганических структур препятствуют появлению центров кристаллизации, в результате чего отжиг органосодержащих компонентов приводит к формированию аморфного покрытия.

Развитие устройств энергонезависимой памяти в настоящий момент связывают с созданием оксидной резистивной памяти произвольного доступа — Oxide Resistive Random Access Memory (OxReRAM), основанной на эффекте изменения проводимости за счет образования проводящего канала из кислородных вакансий. Поскольку технология молекулярного наслаивания приводит к получению стехиометрических

соединений, для использования в OxReRAM требуется создавать диэлектрические оксидные слои с контролируемым содержанием дефектов (кислородных вакансий) за счет легирования покрытий элементами с более низкой степенью окисления ($\text{HfO}_2\text{:La}$ [145, 146], $\text{HfO}_2\text{:Gd}$ [147], $\text{ZrO}_2\text{:Y}$ [130]).

Другим перспективным направлением считается создание запоминающих устройств на основе сегнетоэлектриков — Ferroelectric Random Access Memory (FeRAM), базирующееся на изменении направления остаточной поляризации материала [45, 105, 111, 148–153]. Некоторые исследователи сообщают о получении методом молекулярного наслаивания полностью готовых запоминающих устройств [151, 154–158].

Одним из важных направлений использования молекулярного наслаивания в микроэлектронике является создание наноразмерных тонких металлических пленок, используемых как в качестве контактных площадок для создания КМОП-структур, так и для организации проводящих каналов между компонентами микросхем. Несмотря на то что в настоящее время отработаны процессы получения покрытий из более 20 различных металлов,* для микроэлектроники используют в основном металлы платиновой подгруппы [80, 159, 160], Cu [80, 161, 162], Co [163], Ni [164], полиметаллические сплавы [165].

Активная разработка процессов молекулярного наслаивания для нанесения конформных нитридных покрытий обуславливается не столько их диэлектрическими (Si_3N_4 , AlN), полупроводниковыми (TiN) или проводящими (VN) свойствами, сколько возможностью использовать нитридные материалы как барьерные слои, существенно замедляющие диффузионные процессы между тонкослойными элементами микроэлектроники. В настоящий момент процессы молекулярного наслаивания используются для получения нитридов кремния [101, 166–168], алюминия [169], титана [170–172], ванадия [173], а также нитридов смешанного состава [174].

Электролюминесцентные устройства. Развитие успешно проведенной в 1980-х годах финскими специалистами коммерциализации технологии молекулярного наслаивания для создания тонкопленочных электролюминесцентных дисплеев в последние 15–20 лет существенно затормозилось. В первоначально разработанной конструкции использовали тонкопленочную слоистую структуру, где слой люминофора

* Plasma & Materials Processing group at Eindhoven University of Technology (Netherlands), ALD Database, 2021. URL: <https://www.atomiclimits.com/alddbatabase> (дата обращения: 02.06.2021).

(ZnS:Mn желто-оранжевого цвета свечения) толщиной 500–1000 нм отделяли от оптически прозрачных электродов тонкими (~200 нм) диэлектрическими слоями на основе Al_2O_3 или Ta_2O_5 . Дальнейшие разработки позволили повысить пороговое напряжение, после которого наступает электрический пробой изолирующих слоев, за счет использования в качестве диэлектрика слоистых систем $Al_2O_3-TiO_2$. В настоящий момент на замену указанной системе разрабатываются более электропрочные диэлектрические слои на основе HfO_2 , ZrO_2 и слоистых (nanolaminate) материалов на их основе [119, 125, 175, 176].

Для расширения спектра цветов люминесценции была исследована возможность создания тонкопленочных электролюминесцентных структур с высокой яркостью и энергоэффективностью на основе различных халькогенидов (ZnS, CaS, SrS, BaS, ZnSe) и тиогаллатов ($SrGa_2S_4$), активированных РЗЭ (Ce^{3+} , Eu^{2+} , Sm^{3+} , Tb^{3+} , Tm^{3+} и др.) [37, 43, 177–180], что позволило создать трехцветный (зелено-желто-красный) дисплей на основе ZnS:Tb (цветовые координаты $X = 0.30$, $Y = 0.60$) или SrS:Ce ($X = 0.3$, $Y = 0.5$), ZnS:Mn ($X = 0.45$, $Y = 0.55$) и ZnS:Sm ($X = 0.68$, $Y = 0.31$). Появились сообщения о создании тонкослойных электролюминесцентных дисплеев на основе $Y_2O_3:Eu$ -люминофора красного цвета свечения [181]. Создание же полноцветных дисплеев затрудняется отсутствием технологии молекулярного наслаивания «синего» люминофора, излучающего в области 450–480 нм [182] (разработанный люминесцентный дисплей с люминофором «синего» цвета свечения на основе SrS:Cu [183] обладает максимумом в диапазоне 470–530 нм, т. е. голубовато-салатного цвета). Вследствие этого электролюминесцентные панели практически полностью вытеснены с рынка более дешевыми полноцветными жидкокристаллическими дисплеями (в различных модификациях) и дисплеями на основе органических светодиодов [182].

Люминесцентные композиции. Использование молекулярного наслаивания для создания люминесцентных материалов включает следующие процессы:

- формирование тонких люминесцентных покрытий на поверхности инертной матрицы;
- создание на поверхности дисперсных люминофоров различного назначения тонких радиационно-стойких оптически прозрачных защитных покрытий, обладающих высокой электропроводностью;
- изменение концентрации и состава активаторов (соактиваторов) люминесценции в тонком приповерхностном слое полупроводникового люминесцирующего материала.

В настоящее время методом молекулярного наслаивания с использованием хлоридов или алкоксидов металлов и H_2S (H_2Se) синтезированы люминофоры различного назначения не только на базе ZnS с различным набором активаторов (например, ZnS:Cu, ZnS:Mn, ZnS:Er³⁺) [40] или CdS [184], но и тонкие люминесцентные слои на основе SrS, BaS, CaS и др. (перечни синтезированных сульфидов и люминофоров на их основе можно найти в обзорах [43, 185, 186]), а также на основе смешанных сульфидов ($Cd_xZn_{1-x}S$), селенидов (ZnSe) и сульфидов-селенидов ($SrS_{1-x}Se_x$, $ZnS_{1-x}Se_x$) переменного состава.

Технологию молекулярного наслаивания используют для нанесения тонких защитных слоев на основе SiO_2 [187], Al_2O_3 [188, 189] или TiO_2 [190], предотвращающих деградацию поверхности люминофоров в процессе их эксплуатации и не снижающих при этом яркости люминофора.

Кроме того, существует работа, где показана возможность формирования фосфора активационным методом путем введения методом химической сборки в его приповерхностный слой дополнительного соактиватора, что приводит к значительному повышению яркости люминофора [191]. Однако в настоящий момент масштабное коммерческое применение технологии молекулярного наслаивания в данной области прогнозируется только для обеспечения защиты поверхности люминесцентных материалов от воздействия внешней среды в ходе эксплуатации [192].

Фотовольтаика. Для создания фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии необходимо использовать полупроводниковый материал с шириной запрещенной зоны в пределах 0.9–1.7 эВ. Для этих целей подходит не только кристаллический кремний, но и ряд халькогенидов со структурой халькопирита [$CuInSe_2$, $Cu(In,Ga)Se_2$, $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$, $Cu(Zn,Sn)(S,Se)_2$], а также соединения ABX_3 со структурой перовскита (в том числе и органо-неорганические системы, например $CH_3NH_3PbX_3$ ($X = Br, I, I_{0.67}Cl_{0.33}$) [44]). При этом от качества интерфейса (сплошности, бездефектности) на границе гетеропереходов (как полупроводник/полупроводник, так и полупроводник/изолятор) в ячейке зависит величина скорости рекомбинации носителей заряда и в итоге эффективность преобразователя энергии.

Применение технологии молекулярного наслаивания для нанесения на поверхность фотопреобразователя на основе $p-Si$ пассивирующей алюмооксидной пленки существенно повысило эффективность устройства (с 19–20 до 23.2%) [193]. А нанесение путем обработки парами $CuCl$, $InCl_3$ и H_2S тонкой конформной пленки $CuInS_2$ внутри нанопористого

каркаса TiO_2 позволило повысить эффективность фотопреобразователя на 4% по сравнению с исходным TiO_2 [194]. Сопоставление качества интерфейса $\text{Al}_2\text{O}_3/p\text{-Si}$, полученного по технологии молекулярного наплавления и с использованием других технологий нанесения покрытий (рис. 2), свидетельствует о значительно (в 5–20 раз) более низкой скорости рекомбинации носителей заряда на границах, полученных по технологии молекулярного наплавления [195].

Учитывая все большее внимание к получению энергии из альтернативных возобновляемых источников, следует ожидать активного внедрения технологии молекулярного наплавления в производство солнечных фотопреобразователей. По данной технологии активно разрабатываются не только способы нанесения различных изолирующих или пассивирующих оксидных покрытий (интерес в последние годы вызывают такие оксиды металлов, как, например, MoO_x [196–198], WO_x [198], V_2O_5 [198], NiO_x [199, 200] и TiO_x [201]) на любые материалы, включая органические [202], но и получение тонкопленочных полупроводников с необходимой кристаллической структурой: халькопиритов [203] и перовскитов [204], а также оптически прозрачных проводников с низким электросопротивлением [205, 206], что в итоге позво-

ляет перейти к направленной сборке тонкопленочных панелей солнечных преобразователей, в том числе на гибкой основе [207–209].

Применение молекулярного наплавления для создания неорганических и гибридных материалов

Керновые пигменты и наполнители. Многие часто используемые в технологии молекулярного наплавления соединения (например, Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO) в составе покрытий толщиной в несколько нанометров оптически прозрачны и не изменяют оптических характеристик нижежащей матрицы. Это позволяет использовать такие материалы в виде пассивирующих покрытий, нанесение которых на поверхность различных пигментов препятствует деградации матрицы в условиях эксплуатации [192, 210–216]. Однако формирование из тех же материалов достаточно толстых покрытий, полностью перекрывающих матрицу, либо нанесение оптически окрашенных слоев (например, ZnO , Fe_3O_4 , TiO_2 , Cr_2O_3) позволяет на базе дешевого матричного материала создать керновые пигменты и наполнители с характеристиками, аналогичными традиционным объемным продуктам [192, 217–219]. Перспективность данного направления обусловлена возможностью увеличения объемов производства указанных пигментов и наполнителей без расширения сырьевой базы [220, 221]. Однако следует отметить, что в силу неисчерпанности материальных ресурсов, используемых в качестве пигментов в лакокрасочной промышленности, вопрос активного развития производства керновых пигментов пока не стоит.

Неорганические и гибридные материалы со строго заданным строением. Активно развивающимся направлением использования технологии молекулярного наплавления является нанесение тонкопленочных или структурированных покрытий на поверхности высокопористых материалов различного генезиса и строения. При этом матрица может как включаться в состав получаемого композита (в том числе гибридного органо-неорганического), так и являться жертвенным материалом. Такой синтетический прием получил название «темплатный синтез».

В последние годы активно развиваются следующие направления применения полученных гибридных материалов:

1. Использование волокнистой матрицы органического происхождения в качестве жертвенного материала позволяет получить тонкостеночные трубчатые металлоксидные наноматериалы [222, 223] с высокой

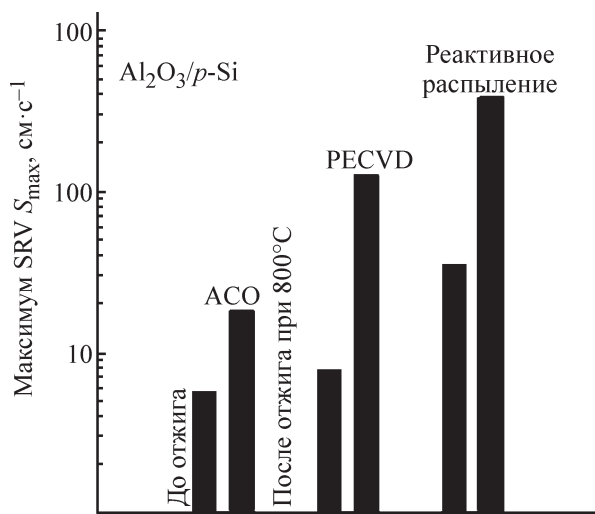


Рис. 2. Сравнение характеристик пассивации поверхности элемента на основе Si p -типа, пассивированного Al_2O_3 , нанесенного методами МН-АСО, PECVD и реактивным распылением до и после отжига при $\sim 800^\circ\text{C}$ [скорость поверхностной рекомбинации (SRV) S_{\max} измерена при уровне инжекции $n = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$] [195].*

* Перепечатано с разрешения WIP Renewable Energies от 09.09.2021. Copyright 2010 WIP Renewable Energies (European Photovoltaic Solar Energy Conf.).

удельной поверхностью, представляющие интерес в качестве высокочувствительных сенсоров [224, 225].

2. Аналогичный процесс с использованием матрицы, характеризующейся упорядоченной периодической (опалоподобной) структурой, позволяет сформировать материал со структурой инвертированного опала, в которой к низкой плотности и высоким функциональным свойствам добавляются еще и необычные физико-химические и оптические характеристики фотонных кристаллов [226–233].

Следует, однако, учитывать, что вещество в наноразмерном состоянии (а толщина стенок таких материалов определяется количеством нанесенных монослоев соответствующего оксида) может существенно изменять свои физико-химические (например, температуру плавления [232]) и электрофизические свойства [234].

3. Формирование во внутривпоровом пространстве мембранного материала наноразмерных покрытий позволяет тонко регулировать эффективный диаметр пор и тем самым регулировать поток элюента через мембрану либо (в случае наноразмерных пор) осуществлять сепарацию компонентов газовой или жидкостной смеси продуктов [235–240].

4. Если же на внутреннюю поверхность пор мембраны методом молекулярного наслаивания нанести каталитически-активные наноструктуры, то возможно создание энергоэффективных каталитических мембранных реакторов, позволяющих в один проход сепарировать и каталитически преобразовывать компоненты газовых смесей [238, 241, 242].

При нанесении на поверхность матрицы биологически-активных материалов (например, ZnO) полученные нанопористые мембраны можно использовать для очистки воды от патогенов (например, распространяющихся в воде *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus* [243]).

Неорганические материалы для сенсоров. В последние годы молекулярное наслаивание активно используется для создания адсорбционно-резистивных газовых сенсоров, содержащих адсорбционно-чувствительный слой (на основе поликристаллических оксидов переходных металлов, а также твердых растворов на их основе), нанесенный на подложку, снабженную электродами и нагревателем. Сенсор обычно работает при нагревании в пределах 200–400°C. В этих условиях сорбция на поверхности чувствительного слоя анализита приводит к изменению его электрофизических свойств.

В качестве чувствительного слоя чаще всего наносят тонкие слои или наноструктуры на основе SnO₂ [244–248], ZnO [246, 248–250], TiO₂ [245, 251–254],

но в последнее время все чаще появляются работы по созданию сенсорных устройств на основе ZrO₂ [254], Fe₂O₃ [255], Cr₂O₃ [256], NiO [257]. Анализируют обычно содержания O₂, CO, CH₄, H₂, NH₃, причем селективность покрытий к разным анализитам может различаться на порядки. При этом чувствительность тонкослойных сенсоров к анализитам носит нелинейный характер (рис. 3) [258].

Разрабатываются и оптические сенсоры на основе материалов ядро–нанооболочка, полученных по технологии молекулярного наслаивания. Чувствительный слой, нанесенный на одномодовое оптическое волокно, при адсорбции анализита изменяет показатель преломления, что позволяет получить высокочувствительные датчики, способные контролировать параметры процессов, протекающих в опасных и химически агрессивных средах [249, 259–264]. Показано, что для повышения чувствительности оптических сенсоров требуется нанесение более толстых, чем для резистивных сенсоров, покрытий. При этом оптимальная толщина чувствительного слоя оптического сенсора определяется оптическими свойствами наносимого покрытия и длиной волны используемого для измерений источника когерентного излучения (рис. 4) [259, 265].

Неорганические сорбенты и катализаторы. Адаптация технологии молекулярного наслаивания для создания активных каталитических систем протекает в двух направлениях.

С использованием «эффекта монослоя» [221] (когда прививка первого монослоя инородных атомов

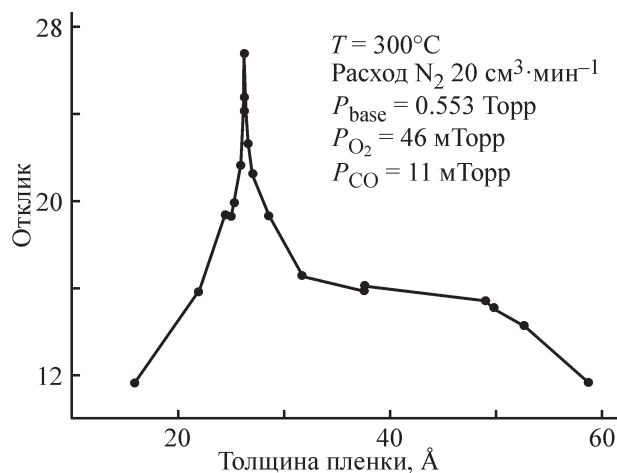


Рис. 3. Реакция сенсора на основе SnO₂ на присутствие 11 мТорр СО при 300°C в зависимости от толщины нанесенной пленки [258].*

* Перепечатано с разрешения Elsevier от 23.07.2021. Copyright 2008 Elsevier.

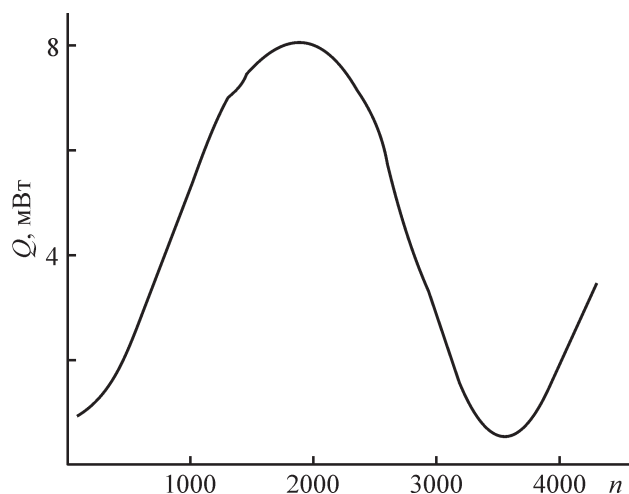


Рис. 4. Влияние толщины титаноксидного покрытия на величину отраженной от торца волокна мощности Q лазера ($\lambda = 1310$ нм) [265].*

n — число циклов молекулярного наслаивания.

приводит к существенному увеличению функциональных свойств композита по сравнению с матрицей [266]) и собственной высокой каталитической активности прививаемых структур на базе известных каталитических систем на основе металлов платиновой группы (Pt, Pd, Ir, Rh, Ru) [267–275] и соединений некоторых металлов (Co, Ni, Cu, Nb) [276–279] на поверхности инертных матриц создан большой ряд катализаторов с активным центром в виде отдельных атомов или наноразмерных кластеров [273, 280, 281]. Пользуясь возможностями технологии регулировать количество и распределение функциональных групп на поверхности исходного носителя (полностью или частично гидроксильная поверхность) [282–284], можно управлять плотностью распределения и строением прививаемых группировок, а количеством циклов обработки регулировать размеры формирующихся на поверхности наноструктур [280, 281]. Таким образом, метод молекулярного наслаивания позволяет регулировать активность и селективность катализатора. Например, нанесение наночастиц Pt привело к повышению выхода метанола и этанола в ходе конверсии синтез-газа [272].

Нанесение достаточно толстого (полностью перекрывающего поверхность матрицы) слоя каталитически-активного соединения (обычно оксиды или сульфиды переходных металлов) на высокодисперсную или высокопористую матрицу позволяет получить катализаторы типа ядро–оболочка с высокими

* Перепечатано с разрешения Журнала прикладной химии от 21.09.2021. Copyright 2018 Журнал прикладной химии.

эксплуатационными характеристиками. Достаточно обширный, но не исчерпывающий перечень каталитических реакций, промотируемых с помощью элементных оксидных покрытий, нанесенных на поверхность дисперсного носителя, представлен в работе [279].

Методом молекулярного наслаивания получают активные сорбционные материалы, способные к селективному поглощению ряда газов [285–288] или ионов тяжелых металлов (Fe, Cu, Zn, Ni) из растворов [289]. Следует отметить, что для ускорения синтеза сорбентов типа ядро–оболочка предлагается использовать гибридную технологию, включающую газо- или жидкофазное молекулярное наслаивание тонкого переходного слоя с последующим осаждением металлоорганических соединений из растворов по технологии Layer-by-Layer [290]. Сорбенты на основе γ -Mg(BH₄)₂ с нанесенным алюмооксидным слоем предлагается использовать как накопитель водорода [291].

Неорганические материалы для медицины. В хирургической ортопедии для замены костных элементов обычно используют металлические импланты, чаще всего на основе металлического титана. Технология молекулярного наслаивания позволяет повысить биосовместимость таких имплантов без изменения их строения за счет нанесения тонких слоев на основе материалов, не отторгаемых организмом (например, TiO₂ [292–296] либо гидроксипатит [297, 298] для костных имплантов или CaCO₃ [299] для зубных).

Разрабатываются также приемы, позволяющие ускорить заживление окружающих имплант тканей за счет придания нанесенному покрытию дополнительных антибактериальных свойств (например, легирование тонкопленочного покрытия на основе TiO₂ углеродом или азотом — TiO₂:C и TiO₂:N [300, 301]).

Другое применение технологии молекулярного наслаивания, активно развивающееся в XXI веке, — биосенсорика. Чтобы биосенсор мог выработать сигнал, который может быть сопоставлен с присутствием и концентрацией определенного аналита, необходима определенная морфология сенсорного элемента с оптимальными химическими, электрическими, оптическими и структурными свойствами [302, 303], что может быть достигнуто применением технологии молекулярного наслаивания — нанесением изолирующих покрытий [304–308] или химически активных сенсорных наноструктур [309, 310]. В бесферментных сенсорах на поверхности электрода формируются проводящие наноструктуры из материалов с высокой электрохимической активностью

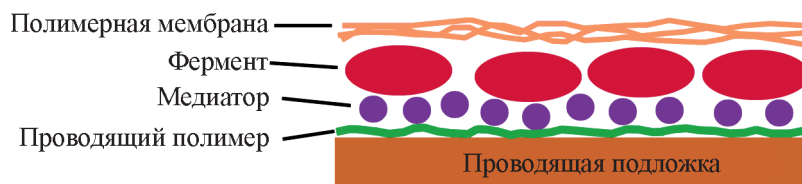


Рис. 5. Строение ферментсодержащего электрохимического сенсора.

(наночастицы Pt, Au, CdS, оксидов металлов) [302]. В ферментсодержащих электрохимических сенсорах (рис. 5) поверх проводящего слоя (медиатора), обеспечивающего эффективный перенос заряда на электрод, иммобилизуется чувствительный слой на основе ферментов, а для защиты сенсора от воздействия нежелательных компонентов анализируемых растворов и повышения селективности наносится полупроницаемая мембрана [311]. В некоторых случаях технология молекулярного наслаивания используется также для защиты активных компонентов сенсора от деградации путем нанесения тонкого защитного покрытия на готовое изделие [231, 312, 313].

Одно из интересных применений технологии молекулярного наслаивания в биосенсорике возникло в эпоху разработки технологии секвенирования биополимеров (белков и нуклеиновых кислот — ДНК и РНК). Для организации отделения нуклеотидов воспользовались трековыми мембранами, регулируя их диаметр путем нанесения инертных неорганических покрытий [235, 314–316].

Возможно использование технологии молекулярного наслаивания и для создания носителей лекарственных средств, позволяющих реализовывать таргетную доставку действующего вещества. Для этих целей хорошо подходят наноразмерные дисперсные матрицы на основе Fe_3O_4 , перемещение которых в организме может легко регулировать внешним магнитным полем [317, 318]. Однако для закрепления (иммобилизации) лекарственных препаратов поверхность такой матрицы часто нуждается в защите или изменении физико-химических свойств.

Тонкопленочные неорганические нанопокрывтия различного функционального назначения. Наиболее часто покрытия используют для обеспечения защиты различных материалов и изделий от воздействия окружающей или рабочей среды. С такой целью наносят покрытия различного состава (Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , ZrO_2 , HfO_2 и др., в том числе органо-неорганические) для защиты:

- конструктивных элементов химических источников или накопителей тока [43, 77, 319–325];
- металлов и сплавов от контакта с окружающей средой [326–332];

— активных центров катализаторов, сорбентов или сенсоров [231, 312, 313, 333];

— готовых изделий — от сложных технических устройств [265, 334–336] до коллекционных монет [337].

При этом защитные характеристики покрытий превосходят свойства аналогичных, получаемых с использованием других технологий при значительно меньшей толщине [336].

Интересный способ формирования покрытия на поверхности полимерного материала за счет использования двух различных методик молекулярного наслаивания: осаждения наночастиц TiO_2 и SiO_2 по технологии Layer-by-Layer с последующей сшивкой последних газофазным осаждением алюмооксидного покрытия в порах кремний-титаноксидного слоя (рис. 6) — был предложен в работе [338]. Такой подход позволил нанести на полимерную пленку покрытия, по прочности превосходящие получаемые путем спекания (рис. 7), но без термического воздействия на защищаемый материал.

Во многих случаях нанесение защитного покрытия сопровождается упрочнением поверхностного слоя защищаемого материала на наноразмерном уровне [339] за счет «залечивания» дефектов строения поверхностного слоя (наноразмерные трещины, поры и т. п.), что позволяет не только повысить эксплуатационные характеристики стеклянных матриц [340], но и увеличить прочностные характеристики металлических изделий, например шарикоподшипников [341, 342].

В последние годы в процессе расширения номенклатуры реагентов, используемых для нанесения покрытий, появляются работы по нанесению на различные материалы и изделия термостойких слоистых материалов (MoS_2 , WS_2), придающих матрице антифрикционные свойства [343–346].

Интерференция света, наблюдаемая в тонких пленках, позволяет окрашивать поверхность защищаемых материалов в широкую гамму оттенков [347–349], что с учетом возможностей фотолитографии позволяет создавать защитные хроматические покрытия, подтверждающие подлинность защищаемого объекта.

Технология молекулярного наслаивания может быть использована и для изменения хроматического

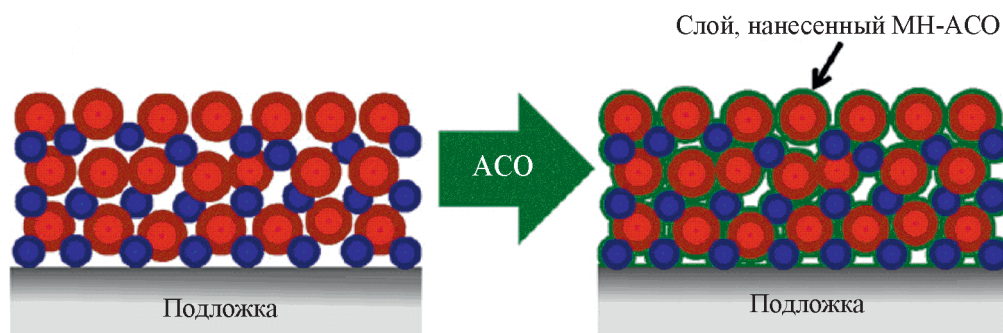


Рис. 6. Схематическое изображение пленки $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, полученной по технологии Layer-by-Layer, до (слева) и после осаждения атомного слоя по технологии молекулярного наслаивания (справа) [338].*

ряда полудрагоценных камней. Так, нанесение на поверхность опалов элементоксидных нанопокровов различного химического состава позволяет в широких пределах изменять цветовую гамму материала (см. таблицу).

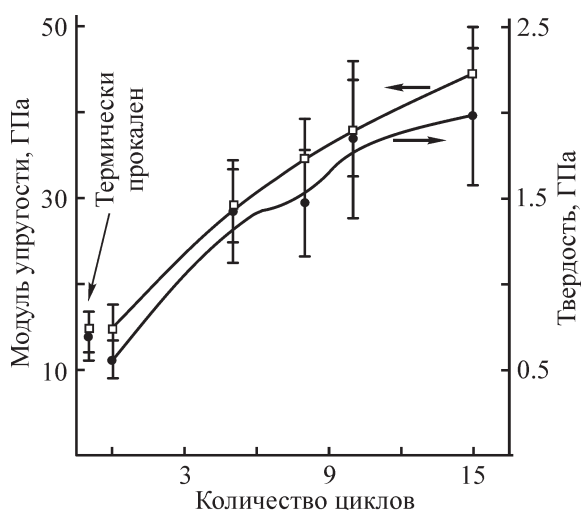


Рис. 7. Модуль упругости (значения плато) и твердость композитной пленки TiO_2 (МН-АСО)/ SiO_2 (Layer-by-Layer) на пластинах монокристаллического кремния в зависимости от количества циклов молекулярного наслаивания.

Каждая точка — статистическое среднее значение для 36 испытаний измерения жесткости при глубине вдавливания 9.5–10.5% от толщины пленки [338].**

* Перепечатано с разрешения American Chemical Society от 23.07.2021. Copyright 2011 American Chemical Society.

** Там же.

Керамические материалы и композиты. Технология молекулярного наслаивания используется для создания керамических материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами:

- получения вакуумплотной керамики с низкой температурой спекания (нанесение на поверхность предкерамических материалов элементоксидного монослоя на основе V_2O_5 , TiO_2 или Cr_2O_3 позволяет снизить температуру спекания материала на $\sim 100^\circ\text{C}$ [350]);
- повышения термоокислительной стойкости керамики на основе SiC [351];
- повышения теплопроводности композитов [352];
- снижения пористости керамических материалов [353];
- формирования трехмерных наноструктурированных (армированных) керамических материалов [354].

Химически модифицированные по технологии молекулярного наслаивания дисперсные материалы используют при создании органо-неорганических композитов различного функционального назначения [25, 355].

Полимерные и гибридные материалы. Технология молекулярного наслаивания активно используется в процессе создания полимерных материалов с регулируемыми свойствами (повышенной устойчивостью к термоокислению, смачиваемостью, газо- и влагопроницаемостью и т. д.).

Так, для снижения горючести полимерных материалов, натуральных волокон и изделий из них перспективной является поверхностная обработка, которая обеспечивает блокировку центров, ответственных

Цветовые характеристики опалов с модифицированной поверхностью

Реагент	Число циклов обработки	Заряд катиона в покрытии	Цвет образца	
			в отраженном свете	на просвет
VOCl ₃ , H ₂ O	1	V(+5)	Темно-зеленый	Горчичный
VOCl ₃ , H ₂ O	4	V(+5)	Голубой Зеленый	Желто-розовый
CrO ₂ Cl ₂	1	Cr(+6)	Красный Оранжевый	Непрозрачный
CrO ₂ Cl ₂ , C ₂ H ₅ OH	1	Cr(+3)	Оранжевый Зеленый	Зеленый
CrO ₂ Cl ₂ , C ₂ H ₅ OH	4	Cr(+3)	Красный Зеленый Фиолетовый	Коричневый
VOCl ₃ , H ₂ O, POCl ₃	1	V(+5), P(+5)	Салатный	Желто-зеленый

за разрушение материала [356]. Здесь вместо физико-химических и коллоидно-химических методов защиты (адсорбция наночастиц, золь-гель покрытия, осаждение биомакромолекул [357]) можно использовать два подхода, базирующиеся на технологии молекулярного наслаивания.

Во-первых, обработка готовых изделий реагентами, содержащими элементы-ингибиторы окисления (например, фосфор), которые принимают активное участие в замедлении деструкции полимера как в газовой (деактивация свободных радикалов), так и в конденсированной (рекомбинация активных центров на границе раздела газ–твердое тело) фазах [358].

Во-вторых, нанесение с использованием методики ионного наслаивания на поверхность горючих матриц гибридных или чисто неорганических композиций, препятствующих доступу кислорода к защищаемому материалу [359–362].

Важным направлением использования технологии молекулярного наслаивания является изменение химической природы поверхности полимерных материалов, обеспечение смачиваемости или, наоборот, несмачиваемости поверхности полярными или неполярными средами (рис. 8) [240, 363–366]. Для изменения гидро(лио)фильных свойств исходного материала бывает достаточно однократной обработки матрицы соответствующим низкомолекулярным реагентом (для гидрофобных материалов — низкомолекулярным соединением с гидрофильными свойствами (например, VOCl₃, PCl₃), для гидрофильных — элементарноорганическими соединениями с метильными группами) [363]. С учетом возможности обработки по технологии молекулярного наслаивания рулонных материалов на разработанном оборудовании барабан-

ного типа [19–22] такой способ модифицирования полимерных пленок является экономически привлекательным.

Следует отметить, что полимерные материалы, будучи по природе волокнистыми, обладают проницаемостью по отношению к различным низкомолекулярным веществам. Поэтому химическая обработка поверхности полимеров по технологии молекулярного наслаивания приводит к формированию привитых структур не только на поверхности материала, но и по всему объему полимера, что позволяет регулировать газо- и влагопроницаемость соответствующего материала [367–370]. Аналогичных результатов можно до-

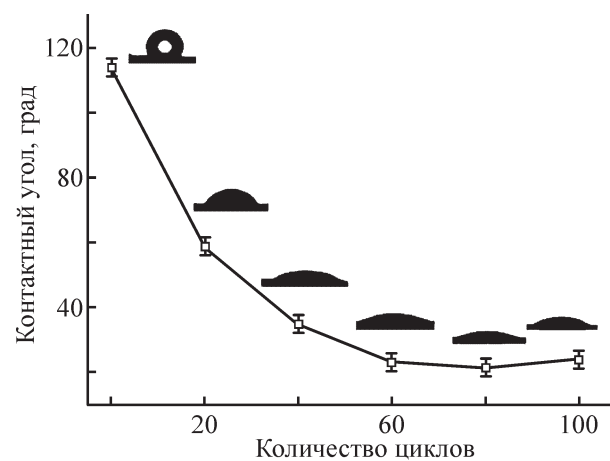


Рис. 8. Изменение контактного угла смачивания водой углеродных нанотрубок с цинкоксидным покрытием в зависимости от числа циклов молекулярного наслаивания [364].*

* Перепечатано с разрешения Elsevier от 23.07.2021. Copyright 2018 Elsevier.

биться путем изготовления композитов с химически модифицированными по технологии молекулярного наслаивания наноразмерными слоями [335, 371] или наполнителями [355].

В последние годы сформировалось направление использования молекулярного наслаивания для модифицирования полимеров — путем химической прививки к активным центрам полимерной матрицы на ее поверхности создаются активные неорганические структуры, способные накапливать и длительно удерживать электрический заряд [372–374]. В случае же формирования сложных двух- (и более) компонентных привитых группировок возможен синергический эффект, существенно (вплоть до температур перехода матрицы в вязкотекучее состояние или ее термодеструкции) повышающий термическую стойкость полимерного электрета [375].

Заключение

Представленные в обзоре основные достижения в области создания материалов различного функционального назначения с применением метода молекулярного наслаивания, разработанного С. И. Кольцовым на основе «остовой» гипотезы В. Б. Алесковского, динамично развивающегося во многих странах мира в последние двадцать лет, свидетельствуют о высокой востребованности таких разработок в первую очередь для высокотехнологичных направлений техники и технологии.

Анализ основных результатов исследований и коммерциализации нанотехнологии молекулярного наслаивания в последние два десятилетия позволяет выделить ряд перспективных направлений развития работ в области МН-АСО в ближайшем десятилетии.

В области расширения синтетических возможностей молекулярного наслаивания и появления новых фундаментальных разработок:

— продолжится развитие методик тонкого органического синтеза прекурсоров для рассматриваемого процесса;

— получат дальнейшее развитие процессы МН-АСО, совмещенные с различными технологиями воздействия на матрицу и реагенты (воздействие УФ-излучения, плазмы, электромагнитных полей и др.), особенно при синтезе металлических наноструктур и нанослоев;

— наибольший интерес будет представлять химическая сборка многокомпонентных наноструктур разного состава и строения, что особенно важно при

синтезе синергических наносистем, а также многофункциональных нанопокровов;

— будут совершенствоваться приемы квантово-химического и других вариантов моделирования процесса МН-АСО, результаты которых могут быть положены в основу оптимизации и прогнозирования режимов синтеза, состава и строения, а следовательно, и свойств целевых продуктов;

— активизируется развитие гибридной нанотехнологии с использованием технологий туннельно-зондовой нанолитографии как способа функционализации поверхности для проведения процесса молекулярного наслаивания.

Нанотехнология молекулярного наслаивания может быть востребована во многих областях твердофазного материаловедения при создании материалов и изделий различного функционального назначения:

— модифицированных сорбентов на основе промышленных пористых носителей (силикагель, уголь, цеолит, оксид алюминия и др.), обладающих повышенными сорбционными характеристиками;

— гетерогенных катализаторов окисления, дегидрирования и других процессов с высокими удельными характеристиками;

— керновых пигментов и наполнителей композиционных материалов, обладающих высокими адгезионными свойствами, заданными цветовыми характеристиками;

— защитных нанопокровов и поверхностных нанодобавок, обеспечивающих повышение коррозионной стойкости к химическим и другим атмосферным воздействиям, радиационным излучениям, высоким температурам, пламени, вибро- и ударным нагрузкам и другим механическим воздействиям;

— декоративных покрытий в ювелирной промышленности;

— различных видов носителей для сенсорных и других датчиков контроля и индикации газовых и жидких сред, в том числе для эксплуатации в экстремальных условиях, с повышенными функциональными характеристиками по чувствительности, селективности, надежности;

— новых преобразователей энергии с высокими удельными параметрами (элементов, в том числе гибких, солнечных батарей, твердотельных суперконденсаторов, литиевых источников тока, электретных материалов);

— мембранных материалов и изделий с заданными транспортными характеристиками, селективностью, каталитической и сорбционной активностью;

— нанолегированных керамических материалов (оксидная и бескислородная керамика) с пониженной температурой компактирования, повышенными функциональными свойствами;

— градиентных нанопокровов, обеспечивающих закономерное изменение функциональных (оптических, комплексных) характеристик материалов и изделий;

— тонких покрытий из высокотемпературных сверхпроводников;

— биосовместимых покрытий и имплантов;

— электролюминесцентных дисплеев (не мешающих обзору) на лобовых и боковых стеклах транспортных средств.

Появление новых твердофазных носителей, таких как фуллерены, углеродные и неорганические нанотрубки, графен, представляет не только фундаментальный, но и практический интерес для использования их в качестве носителей при создании новых материалов вида ядро–нанооболочка.

Не вызывает сомнений ускоренное развитие работ по созданию промышленного технологического оборудования для реализации процесса молекулярного наслаивания как при атмосферном давлении, так и в вакууме. При этом важное значение должны приобрести автоматизация процесса синтеза (в том числе разработка программного обеспечения установок), а также организация процесса молекулярного наслаивания, обеспечивающая повышение скорости формирования функциональных нанопокровов. В установках ускоренного молекулярного наслаивания в отличие от традиционных устройств, в которых в реактор с подложкой поочередно в заданной последовательности подаются потоки реагентов и инертных газов, будет осуществляться перемещение подложки в потоки реагентов, разделенных барьерами из осуженного инертного газа.

Появления каких-либо принципиально новых методов идентификации систем ядро–оболочка в предстоящее десятилетие не ожидается. Основное внимание будет уделено развитию неразрушающих методов контроля и проведению исследований в режиме *in situ*.

Следует отметить, что сформулированные перспективные направления коммерциализации нанотехнологии молекулярного наслаивания согласуются с подготовленными в последние годы прогнозами научно-технологического развития России до 2030 г.*

* Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 г. Минобрнауки России. М., декабрь 2013 г. № ДМ-П8-5 (утв. Правительством РФ

Поэтому именно в ближайшее десятилетие следует ожидать наиболее широкое внедрение нанотехнологии молекулярного наслаивания, в первую очередь в микро- и нанoeлектронике, альтернативной энергетике, сорбции и катализе. Успешное решение указанной задачи в России, особенно с учетом проблем, связанных с импортозамещением, потребует в кратчайшие сроки организации промышленного производства установок молекулярного наслаивания, а также развития малотоннажной химии для синтеза необходимых элементарноорганических реагентов. Одним из эффективных подходов для достижения поставленной цели и коммерциализации результатов исследований является частно-государственное партнерство, реализуемое, например, через создание инжиниринговых центров на базе ведущих вузов или научных организаций. Примером такого партнерства может быть создание в 2021 г. в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте (техническом университете) при поддержке Правительства Санкт-Петербурга и Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2021-028) Первого всероссийского инжинирингового центра технологии молекулярного наслаивания.

Финансирование работы

Подготовка обзора поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 20-13-50088).

Конфликт интересов

А.А. Малыгин является заместителем главного редактора Журнала прикладной химии. Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Соснов Евгений Алексеевич, к.х.н., доцент,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1639-9514>

Малков Анатолий Алексеевич, к.х.н., доцент,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9219-4759>

Малыгин Анатолий Алексеевич, д.х.н., проф.,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1818-7761>

03.01.2014) и Прогноз научно-технологического развития России: 2030. Новые материалы и нанотехнологии / Под ред. Л. М. Гохберга, А. Б. Ярославцева. М.: Минобрнауки России, НИУ ВШЭ, 2014. 52 с.

Список литературы

- [1] *Sosnov E. A., Malkov A. A., Malygin A. A.* Нанотехнология молекулярного наслаивания в производстве неорганических и гибридных материалов различного функционального назначения (обзор). I. История создания и развития метода молекулярного наслаивания // ЖПХ. 2021. Т. 94. № 8. С. 967–986. <https://doi.org/10.31857/S0044461821080028> [*Sosnov E. A., Malkov A. A., Malygin A. A.* The nanotechnology of Molecular Layering in the production of inorganic and hybrid materials for various functional purposes (A review). I. History of creation and development of the Molecular Layering method // Russ. J. Appl. Chem. 2021. V. 94. N 8. P. 1022–1037. <https://doi.org/10.1134/S1070427221080024>].
- [2] *Chen H., Lin Q., Xu Q., Yang Y., Shao Z., Wang Y.* Plasma activation and Atomic Layer Deposition of TiO₂ on polypropylene membranes for improved performances of lithium-ion batteries // J. Membr. Sci. 2014. V. 458. P. 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.02.004>
- [3] *Mameli A., Kuang Y., Aghaee M., Ande C. K., Karasulu B., Creatore M., Mackus A. J. M., Kessels W. M. M., Roozeboom F.* Area-selective Atomic Layer Deposition of In₂O₃:H using a μ -plasma printer for local area activation // Chem. Mater. 2017. V. 29. N 3. P. 921–925. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b04469>
- [4] *Sprenger J. K., Cavanagh A. S., Sun H., Wahl K. J., Roshko A., George S. M.* Electron enhanced growth of crystalline gallium nitride thin films at room temperature and 100°C using sequential surface reactions // Chem. Mater. 2016. V. 28. N 15. P. 5282–5294. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b00676>
- [5] *Sprenger J. K., Sun H., Cavanagh A. S., Roshko A., Blanchard P. T., George S. M.* Electron-Enhanced Atomic Layer Deposition (EE-ALD) of boron nitride thin films at room temperature and 100°C // J. Phys. Chem. C. 2018. V. 122. N 17. P. 9455–9464. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b00796>
- [6] *Mameli A., Karasulu B., Verheijen M. A., Barcones B., Macco B., Mackus A. J. M., Kessels W. M. M. E., Roozeboom F.* Area-selective Atomic Layer Deposition of ZnO by area activation using Electron Beam-Induced Deposition // Chem. Mater. 2019. V. 31. N 4. P. 1250–1257. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b03165>
- [7] *Singh J. A., Thissen N. F. W., Kim W.-H., Johnson H., Kessels W. M. M., Bol A. A., Bent S. F., Mackus A. J. M.* Area-selective Atomic Layer Deposition of metal oxides on noble metals through catalytic oxygen activation // Chem. Mater. 2018. V. 30. N 3. P. 663–670. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b03818>
- [8] *Hirvikorpi T., Vähä-Nissi M., Harlin A., Marles J., Miikkulainen V., Karppinen M.* Effect of corona pretreatment on the performance of gas barrier layers applied by Atomic Layer Deposition onto polymer-coated paperboard // Appl. Surf. Sci. 2010. V. 257. N 3. P. 736–740. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.07.051>
- [9] *King S. W.* Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition of SiN_x:H and SiO₂ // J. Vac. Sci. Technol. A. 2011. V. 29. N 4. ID 041501. <https://doi.org/10.1116/1.3584790>
- [10] *Potts S. E., Kessels W. M. M.* Energy-enhanced Atomic Layer Deposition for more process and precursor versatility // Coord. Chem. Rev. 2013. V. 257. N 23–24. P. 3254–3270. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2013.06.015>
- [11] *Suh S., Ryu S. W., Cho S., Kim J. R., Kim S., Hwang C. S., Kim H. J.* Low-temperature SiON films deposited by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition method using activated silicon precursor // J. Vac. Sci. Technol. A. 2016. V. 34. N 1. ID 01A136. <https://doi.org/10.1116/1.4937734>
- [12] *Lien C., Konh M., Chen B., Teplyakov A. V., Zaera F.* Gas-phase electron-impact activation of Atomic Layer Deposition (ALD) precursors: MeCpPtMe₃ // J. Phys. Chem. Lett. 2018. V. 9. N 16. P. 4602–4606. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.8b02125>
- [13] A. c. SU 1359261 A1 (опубл. 1987). Устройство для синтеза оксидных покрытий.
- [14] *Poodt P., Lankhorst A., Roozeboom F., Spee K., Maas D., Vermeer A.* High-speed Spatial Atomic-Layer Deposition of aluminum oxide layers for solar cell passivation // Adv. Mater. 2010. V. 22. N 32. P. 3564–3567. <https://doi.org/10.1002/adma.201000766>
- [15] *Munoz-Rojas D., MacManus-Driscoll J.* Spatial atmospheric Atomic Layer Deposition: A new laboratory and industrial tool for low-cost photovoltaics // Mater. Horiz. 2014. V. 1. N 3. P. 314–320. <https://doi.org/10.1039/C3MH00136A>
- [16] *Maydannik P. S., Kääriäinen T. O., Lahtinen K., Cameron D. C., Söderlund M., Soininen P., Johansson P., Kuusipalo J., Moro L., Zeng X.* Roll-to-roll Atomic Layer Deposition process for flexible electronics encapsulation applications // J. Vac. Sci. Technol. A. 2014. V. 32. N 5. ID 051603. <https://doi.org/10.1116/1.4893428>
- [17] *Sharma K., Hall R. A., George S. M.* Spatial Atomic Layer Deposition on flexible substrates using a modular rotating cylinder reactor // J. Vac. Sci. Technol. A. 2015. V. 33. N 1. ID 01A132. <https://doi.org/10.1116/1.4902086>
- [18] *Hoye R. L., Muñoz-Rojas D., Nelson S. F., Illiberi A., Poodt P., Roozeboom F., MacManus-Driscoll J. L.* Research update: Atmospheric pressure Spatial Atomic Layer Deposition of ZnO thin films: Reactors, doping, and devices // APL Mater. 2015. V. 3. N 4. ID 040701. <https://doi.org/10.1063/1.4916525>
- [19] *Dickey E., Barrow W. A.* High rate roll to roll Atomic Layer Deposition, and its application to moisture

- barriers on polymer films // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2012. V. 30. N 2. ID 021502.
<https://doi.org/10.1116/1.3678486>
- [20] *Hirvikorpi T., Laine R., Vähä-Nissi M., Kilpi V., Salo E., Li W.-M., Lindfors S., Vartiainen J., Kenttä E., Nikkola J., Harlin A., Kostamo J.* Barrier properties of plastic films coated with an Al₂O₃ layer by roll-to-roll Atomic Layer Deposition // *Thin Solid Films*. 2014. V. 550. P. 164–169.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.10.148>
- [21] *Maydannik P. S., Kääriäinen T. O., Cameron D. C.* An Atomic Layer Deposition process for moving flexible substrates // *Chem. Eng. J.* 2011. V. 171. N 1. P. 345–349. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.097>
- [22] *Poodt P., Knaapen R., Illiberi A., Roozeboom F., van Asten A.* Low temperature and roll-to-roll Spatial Atomic Layer Deposition for flexible electronics // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2012. V. 30. N 1. ID 01A142. <https://doi.org/10.1116/1.3667113>
- [23] *Мальгин А. А.* Метод молекулярного наслаивания: от фундаментальных исследований к коммерциализации // *Рос. хим. журн.* 2013. Т. LVII. № 6. С. 7–20.
- [24] *McCormick J. A., Cloutier B. L., Weimer A. W., George S. M.* Rotary reactor for Atomic Layer Deposition on large quantities of nanoparticles // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2007. V. 25. N 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1116/1.2393299>
- [25] *Liang X., Hakim L. F., Zhan G.-D., McCormick J. A., George S. M., Weimer A. W., Spencer J. A. II, Buechler K. J., Blackson J., Wood C. J., Dorgan J. R.* Novel processing to produce polymer/ceramic nanocomposites by Atomic Layer Deposition // *J. Am. Ceram. Soc.* 2007. V. 90. N 1. P. 57–63. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01359.x>
- [26] *Adhikari S., Selvaraj S., Kim D.-H.* Progress in powder coating technology using Atomic Layer Deposition // *Adv. Mater. Interfaces*. 2018. V. 5. N 16. ID 1800581. <https://doi.org/10.1002/admi.201800581>
- [27] *Heil S. B. S., Van Hemmen J. L., Hodson C. J., Singh N., Klootwijk J. H., Roozeboom F., Van de Sanden M. C. M., Kessels W. M. M.* Deposition of TiN and HfO₂ in a commercial 200 mm remote Plasma Atomic Layer Deposition reactor // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2007. V. 25. N 5. P. 1357–1366. <https://doi.org/10.1116/1.2753846>
- [28] *Knoops H. C. M., Faraz T., Arts K., Kessels W. M. M.* Status and prospects of plasma-assisted Atomic Layer Deposition // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2019. V. 37. N 3. ID 030902. <https://doi.org/10.1116/1.5088582>
- [29] *Sammelselg V., Tarre A., Lu J., Aarik J., Niilisk A., Uustare T., Netšipailo I., Rammula R., Pärna R., Rosental A.* Structural characterization of TiO₂–Cr₂O₃ nanolaminates grown by Atomic Layer Deposition // *Surf. Coat. Technol.* 2010. V. 204. N 12–13. P. 2015–2018. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.11.039>
- [30] *Huang J., Lucero A. T., Cheng L., Hwang H. J., Ha M.-W., Kim J.* Hydroquinone-ZnO nano-laminate deposited by Molecular-Atomic Layer Deposition // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 106. N 12. ID 123101. <https://doi.org/10.1063/1.4916510>
- [31] *Buchkov K., Galluzzi A., Blagoev B., Paskaleva A., Terziyska P., Stanchev T., Mehandzhiev V., Tzvetkov P., Kovacheva D., Avramova I., Nazarova E., Polichetti M.* Magneto-optical characterization of ZnO/Ni nano-laminate obtained via Atomic Layer Deposition // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 1762. N 1. ID 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1762/1/012041>
- [32] *Marin E., Guzman L., Lanzutti A., Ensinger W., Fedrizzi L.* Multilayer Al₂O₃/TiO₂ Atomic Layer Deposition coatings for the corrosion protection of stainless steel // *Thin Solid Films*. 2012. V. 522. P. 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.08.023>
- [33] *Ahn C. H., Kim S. H., Yun M. G., Cho H. K.* Design of step composition gradient thin film transistor channel layers grown by Atomic Layer Deposition // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 105. N 22. ID 223513. <https://doi.org/10.1063/1.4901732>
- [34] *Jogiaas T., Zabels R., Tarre A., Tamm A.* Hardness and modulus of elasticity of Atomic Layer Deposited Al₂O₃–ZrO₂ nanolaminates and mixtures // *Mater. Chem. Phys.* 2020. V. 240. ID 122270. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122270>
- [35] *Park H., Shin S., Choi H., Lee N., Choi Y., Kim K., Jeon H.* Thin-film encapsulation of Al₂O₃ multidensity layer structure prepared by Spatial Atomic Layer Deposition // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2020. V. 38. N 6. ID 062403. <https://doi.org/10.1116/6.0000485>
- [36] *Terai Y., Kuroda S., Takita K.* Growth of self-organized dots of Cd_{1-x}Mn_xTe on ZnTe by Atomic Layer Epitaxy // *J. Cryst. Growth*. 2000. V. 214–215. P. 178–182. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(00\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00067-1)
- [37] *Ihanus J., Lambers E., Holloway P. H., Ritala M., Leskelä M.* XPS and electroluminescence studies on SrS_{1-x}Se_x and ZnS_{1-x}Se_x thin films deposited by Atomic Layer Deposition technique // *J. Cryst. Growth*. 2004. V. 260. N 3–4. P. 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2003.08.046>
- [38] *Bakke J. R., Tanskanen J. T., Jung H. J., Sinclair R., Bent S. F.* Atomic Layer Deposition of Cd_xZn_{1-x}S films // *J. Mater. Chem.* 2011. V. 21. N 3. P. 743–751. <https://doi.org/10.1039/C0JM02786C>
- [39] *Yun S. J., Kim Y. S., Park S.-H. K.* Fabrication of CaS:Pb blue phosphor by incorporating dimeric Pb²⁺ luminescent centers // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. N 6. P. 721–723. <https://doi.org/10.1063/1.1343478>
- [40] *Hikavy A., Neyts K., Stuyven G., Poelman D., De Visschere P.* Photoluminescent ZnS:Cu phosphor films made with Atomic-Layer Chemical Vapor Deposition and thermal evaporation // *J. Soc. Inf. Disp.* 2002. V. 10. N 3. P. 255–258. <https://doi.org/10.1889/1.1827876>

- [41] *Hoang J., Van T. T., Sawkar-Mathur M., Hoex B., Van de Sanden M. C. M., Kessels W. M. M., Ostroumov R., Wang K. L., Bargar J. R., Chang J. P.* Optical properties of Y_2O_3 thin films doped with spatially controlled Er^{3+} by Atomic Layer Deposition // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 101. N 12. ID 123116. <https://doi.org/10.1063/1.2748629>
- [42] *Hendriks W. A., Chang L., Van Emmerik C. I., Mu J., De Goede M., Dijkstra M., Garcia-Blanco S. M.* Rare-earth ion doped Al_2O_3 for active integrated photonics // *Adv. Phys.: X.* 2021. V. 6. N 1. ID 1833753. <https://doi.org/10.1080/23746149.2020.1833753>
- [43] *Dasgupta N. P., Meng X., Elam J. W., Martinson A. B.* Atomic Layer Deposition of metal sulfide materials // *Acc. Chem. Res.* 2015. V. 48. N 2. P. 341–348. <https://doi.org/10.1021/ar500360d>
- [44] *Park N.-G.* Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology // *Mater. Today.* 2015. V. 18. N 2. P. 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.007>
- [45] *Перевалов Т. В., Гриценко В. А., Гутаковский А. К., Просвири И. П.* Структура сегнетоэлектрических пленок $\text{Hf}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{O}_2$, полученных методом атомно-слоевого осаждения // *Письма в ЖЭТФ.* 2019. Т. 109. № 1–2. С. 112–117. <https://doi.org/10.1134/S0370274X19020097>
- [46] *Perevalov T. V., Gritsenko V. A., Gutakovskii A. K., Prosvirin I. P.* Structure of $\text{Hf}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{O}_2$ ferroelectric films obtained by the Atomic Layer Deposition // *JETP Lett.* 2019. V. 109. N 2. P. 116–120. <https://doi.org/10.1134/S0021364019020115>
- [47] *Uusi-Esko K., Rautama E. L., Laitinen M., Sajavaara T., Karppinen M.* Control of oxygen nonstoichiometry and magnetic property of MnCo_2O_4 thin films grown by Atomic Layer Deposition // *Chem. Mater.* 2010. V. 22. N 23. P. 6297–6300. <https://doi.org/10.1021/cm102003y>
- [48] *Zhang Y., Ren W., Niu G., Li C., Wang C., Jiang Z.-D., Liu M., Ye Z.-G.* Atomic Layer Deposition of void-free ZnFe_2O_4 thin films and their magnetic properties // *Thin Solid Films.* 2020. V. 709. ID 138206. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.138206>
- [49] *Tamm A., Tarre A., Verchenko V., Seemen H., Stern R.* Atomic Layer Deposition of superconducting CuO thin films on three-dimensional substrates // *Crystals.* 2020. V. 10. N 8. ID 650. <https://doi.org/10.3390/cryst10080650>
- [50] *Coumou P. C. J. J., Zuiddam M. R., Driessen E. F. C., de Visser P. J., Baselmans J. J. A., Klapwijk T. M.* Microwave properties of superconducting Atomic-Layer Deposited TiN films // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2012. V. 23. N 3. ID 7500404. <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2236603>
- [51] *Yoshizawa S., Minamitani E., Vijayaraghavan S., Mishra P., Takagi Y., Yokoyama T., Oba H., Nitta J., Sakamoto K., Watanabe S., Nakayama T., Uchihashi T.* Controlled modification of superconductivity in epitaxial atomic layer–organic molecule heterostructures // *Nano Lett.* 2017. V. 17. N 4. P. 2287–2293. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b05010>
- [52] *Proslie T., Klug J., Becker N. C., Elam J. W., Pellin M.* Atomic Layer Deposition of superconductors // *ECS Trans.* 2011. V. 41. N 2. P. 237–245. <https://doi.org/10.1149/1.3633673>
- [53] *Mackus A. J., Schneider J. R., MacIsaac C., Baker J. G., Bent S. F.* Synthesis of doped, ternary, and quaternary materials by Atomic Layer Deposition: A review // *Chem. Mater.* 2018. V. 31. N 4. P. 1142–1183. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b02878>
- [54] *Zhou H., Bent S. F.* Fabrication of organic interfacial layers by Molecular Layer Deposition: Present status and future opportunities // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2013. V. 31. N 4. ID 040801. <https://doi.org/10.1116/1.4804609>
- [55] *Cameron D. C., Ivanova T. V.* Molecular Layer Deposition // *ECS Tran.* 2013. V. 58. N 10. P. 263–275. <https://doi.org/10.1149/05810.0263ecst>
- [56] *Sundberg P., Karppinen M.* Organic and inorganic-organic thin film structures by Molecular Layer Deposition: A review // *Beilstein J. Nanotechnol.* 2014. V. 5. N 1. P. 1104–1136. <https://doi.org/10.3762/bjnano.5.123>
- [57] *Meng X.* An overview of Molecular Layer Deposition for organic and organic–inorganic hybrid materials: mechanisms, growth characteristics, and promising applications // *J. Mater. Chem. A.* 2017. V. 5. N 35. P. 18326–18378. <https://doi.org/10.1039/C7TA04449F>
- [58] *Kanarik K. J., Lill T., Hudson E. A., Sriraman S., Tan S., Marks J., Vahedi V., Gottscho R. A.* Overview of Atomic Layer Etching in the semiconductor industry // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2015. V. 33. N 2. ID 020802. <https://doi.org/10.1116/1.4913379>
- [59] *Lee Y., DuMont J. W., George S. M.* Atomic Layer Etching using thermal reactions: Atomic Layer Deposition in reverse // *ECS Trans.* 2015. V. 69. N 7. P. 233–241. <https://doi.org/10.1149/06907.0233ecst>
- [60] *George S. M.* Mechanisms of thermal Atomic Layer Etching // *Acc. Chem. Res.* 2020. V. 53. N 6. P. 1151–1160. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00084>
- [61] *Fischer A., Routzahn A., George S. M., Lill T.* Thermal Atomic Layer Etching: A review // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2021. V. 39. N 3. ID 030801. <https://doi.org/10.1116/6.0000894>
- [62] *Толстой В. П.* Синтез тонкослойных структур методом ионного наслаивания // *Успехи химии.* 1993. Т. 62. № 3. С. 260–266 [Tolstoy V. P. Synthesis of thin-layer structures by the Ionic Layer Deposition method // *Russ. Chem. Rev.* 1993. V. 62. N 3. P. 237–242. <https://doi.org/10.1070/RC1993v062n03ABEH000015>].
- [63] *Толстой В. П.* Реакции ионного наслаивания. Применение в нанотехнологии // *Успехи химии.*

2006. Т. 75. № 2. С. 183–199 [Tolstoy V. P. Successive Ionic Layer Deposition. The use in nanotechnology // Russ. Chem. Rev. 2006. V. 75. N 2. P. 161–175. <https://doi.org/10.1070/RC2006v075n02ABEH001197>].
- [63] Толстой В. П. Основы нанотехнологии ионного наслаивания. СПб: АТОМ Publ., 2020. 142 с.
- [64] Кольцов С. И. Состав и химическое строение твердых веществ. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1987. 84 с.
- [65] Кольцов С. И. Реакции молекулярного наслаивания. СПб: СПбТИ, 1992. 63 с.
- [66] Agarwal A., Kushner M. J. Plasma Atomic Layer Etching using conventional plasma equipment // J. Vac. Sci. Technol. A. 2009. V. 27. N 1. P. 37–50. <https://doi.org/10.1116/1.3021361>
- [67] Faraz T., Roozeboom F., Knoops H. C. M., Kessels W. M. M. Atomic Layer Etching: What can we learn from Atomic Layer Deposition? // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2015. V. 4. N 6. P. N5023–N5032. <https://doi.org/10.1149/2.0051506jss>
- [68] Kanarik K. J., Tan S., Yang W., Kim T., Lill T., Kabansky A., Hudson E. A., Ohba T., Nojiri K., Yu J., Wise R., Berry I. L., Pan Y., Marks J., Gottscho R. A. Predicting synergy in Atomic Layer Etching // J. Vac. Sci. Technol. A. 2017. V. 35. N 5. ID 05C302. <https://doi.org/10.1116/1.4979019>
- [69] Kanarik K. J., Tan S., Gottscho R. A. Atomic Layer Etching: Rethinking the art of etch // J. Phys. Chem. Lett. 2018. V. 9. N 16. P. 4814–4821. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.8b00997>
- [70] Lu W., Lee Y., Murdzek J., Gertsch J., Vardi A., Kong L., George S. M., del Alamo J. A. First transistor demonstration of thermal Atomic Layer Etching: InGaAs FinFETs with sub-5 nm Fin-width Featuring in situ ALE-ALD // 2018 IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM). 2018. P. 39.1.1–39.1.4. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2018.8614536>
- [71] Song S. K., Saare H., Parsons G. N. Integrated isothermal Atomic Layer Deposition/Atomic Layer Etching supercycles for area-selective deposition of TiO₂ // Chem. Mater. 2019. V. 31. N 13. P. 4793–4804. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b01143>
- [72] Parsons G. N., Clark R. D. Area-Selective Deposition: Fundamentals, applications, and Future Outlook // Chem. Mater. 2020. V. 32. N 12. P. 4920–4953. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c00722>
- [73] George S. M., Yoon B., Dameron A. A. Surface chemistry for Molecular Layer Deposition of organic and hybrid organic–inorganic polymers // Acc. Chem. Res. 2009. V. 42. N 4. P. 498–508. <https://doi.org/10.1021/ar800105q>
- [74] Yoon B., Seghete D., Cavanagh A. S., George S. M. Molecular Layer Deposition of hybrid organic–inorganic Alucone polymer films using a three-step ABC reaction sequence // Chem. Mater. 2009. V. 21. N 22. P. 5365–5374. <https://doi.org/10.1021/cm9013267>
- [75] Ivanova T. V., Maydannik P. S., Cameron D. C. Molecular Layer Deposition of polyethylene terephthalate thin films // J. Vac. Sci. Technol. A. 2012. V. 30. N 1. ID 01A121. <https://doi.org/10.1116/1.3662846>
- [76] Lee B. H., Yoon B., Abdulagatov A. I., Hall R. A., George S. M. Growth and properties of hybrid organic–inorganic metalcone films using Molecular Layer Deposition techniques // Adv. Funct. Mater. 2013. V. 23. N 5. P. 532–546. <https://doi.org/10.1002/adfm.201200370>
- [77] Ban C., George S. M. Molecular Layer Deposition for surface modification of Lithium-Ion battery electrodes // Adv. Mater. Interfaces. 2016. V. 3. N 21. ID 1600762. <https://doi.org/10.1002/admi.201600762>
- [78] Yang Z., Zhang L., Liu J., Adair K., Zhao F., Sun Y., Wu T., Bi X., Amine K., Lu J., Sun X. Atomic/Molecular Layer Deposition for energy storage and conversion // Chem. Soc. Rev. 2021. V. 50. N 6. P. 3889–3956. <https://doi.org/10.1039/D0CS00156B>
- [79] Putkonen M., Niinistö L. Organometallic precursors for Atomic Layer Deposition // Precursor Chemistry of Advanced Materials. CVD, ALD and Nanoparticles / Ed. by R. A. Fischer. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. P. 125–145. <https://doi.org/10.1007/b136145>
- [80] Knisley T. J., Kalutarage L. C., Winter C. H. Precursors and chemistry for the Atomic Layer Deposition of metallic first row transition metal films // Coord. Chem. Rev. 2013. V. 257. N 23–24. P. 3222–3231. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2013.03.019>
- [81] Gordon R. G. ALD Precursors and Reaction Mechanisms // Atomic Layer Deposition for Semiconductors / Ed. by C. S. Hwang. Boston, MA: Springer, 2014. P. 15–46. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8054-9_2
- [82] Parsons G. N. Functional model for analysis of ALD nucleation and quantification of area-selective deposition // J. Vac. Sci. Technol. A. 2019. V. 37. N 2. ID 020911. <https://doi.org/10.1116/1.5054285>
- [83] Lu H. L., Chen W., Ding S. J., Xu M., Zhang D. W., Wang L. K. Quantum chemical study of the initial surface reactions in Atomic Layer Deposition of TiN on the SiO₂ surface // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. V. 18. N 26. P. 5937–5944. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/18/26/013>
- [84] Lee W., Dasgupta N. P., Trejo O., Lee J. R., Hwang J., Usui T., Prinz F. B. Area-selective Atomic Layer Deposition of lead sulfide: Nanoscale patterning and DFT simulations // Langmuir. 2010. V. 26. N 9. P. 6845–6852. <https://doi.org/10.1021/la904122e>
- [85] Elliott S. D. ALD Simulations // Atomic Layer Deposition for Semiconductors / Ed. by C. S. Hwang. Boston, MA: Springer, 2014. P. 47–69. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8054-9_3

- [86] Dey G., Elliott S. D. Quantum chemical study of the effect of precursor stereochemistry on dissociative chemisorption and surface redox reactions during the Atomic Layer Deposition of the transition metal copper // *J. Phys. Chem. C*. 2015. V. 119. N 11. P. 5914–5927. <https://doi.org/10.1021/jp509334u>
- [87] Mustard T. J. L., Kwak H. S., Goldberg A., Gavartin J., Morisato T., Yoshidome D., Halls M. D. Quantum mechanical simulation for the analysis, optimization and accelerated development of precursors and processes for Atomic Layer Deposition (ALD) // *J. Korean Ceram. Soc.* 2016. V. 53. N 3. P. 317–324. <https://doi.org/10.4191/kcers.2016.53.3.317>
- [88] Дроздов Е. О., Дубровенский С. Д., Малыгин А. А. Применение квантово-химических подходов для оптимизации режимов синтеза двухкомпонентных фосфор-титаноксидных структур на поверхности кремнезема // *ЖОХ*. 2016. Т. 86. № 10. С. 1613–1623 [Drozdov E. O., Dubrovenskii S. D., Malygin A. A. Quantum-chemical approach to optimization of the synthesis conditions of two-component phosphorus-titanium oxide structures on silica surface // *Russ. J. Gen. Chem.* 2016. V. 86. N 10. P. 2263–2272. <https://doi.org/10.1134/S1070363216100042>].
- [89] Elliott S. D., Dey G., Maimaiti Y., Ablat H., Filatova E. A., Fomengia G. N. Modeling mechanism and growth reactions for new nanofabrication processes by Atomic Layer Deposition // *Adv. Mater.* 2016. V. 28. N 27. P. 5367–5380. <https://doi.org/10.1002/adma.201504043>
- [90] Ngoc Van T. T., Ansari A. S., Shong B. Surface chemical reactions during Atomic Layer Deposition of ZnO, ZnS, and Zn (O, S) // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2019. V. 37. N 2. ID 020909. <https://doi.org/10.1116/1.5079247>
- [91] Cremers V., Puurunen R. L., Dendooven J. Conformality in Atomic Layer Deposition: Current status overview of analysis and modelling // *Appl. Phys. Rev.* 2019. V. 6. N 2. ID 021302. <https://doi.org/10.1063/1.5060967>
- [92] Дроздов Е. О., Дубровенский С. Д., Малыгин А. А. Квантово-химический анализ процессов синтеза ванадийоксидных структур на поверхности кремнезема // *ЖОХ*. 2020. Т. 90. № 5. С. 795–805. <https://doi.org/10.31857/S0044460X20050212> [Drozdov E. O., Dubrovenskii S. D., Malygin A. A. Quantum chemical analysis of the processes of synthesis of vanadium oxide structures on the silica surface // *Russ. J. Gen. Chem.* 2020. V. 90. N 5. P. 880–888. <https://doi.org/10.1134/S1070363220050217>].
- [93] Park J., Yu N. K., Jang D., Jung E., Noh H., Moon J., Kil D., Shong B. Adsorption of titanium halides on nitride and oxide surfaces during Atomic Layer Deposition: A DFT study // *Coatings*. 2020. V. 10. N 8. ID 712. <https://doi.org/10.3390/coatings10080712>
- [94] Robertson J. High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors // *Rep. Prog. Phys.* 2005. V. 69. N 2. P. 327–396. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/2/r02>
- [95] Kittl J. A., Opsomer K., Popovici M., Menou N., Kaczer B., Wang X. P., Adelman C., Pawlak M. A., Tomida K., Rothschild A., Govoreanu B. High-k dielectrics for future generation memory devices // *Microelectron. Eng.* 2009. V. 86. N 7–9. P. 1789–1795. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.03.045>
- [96] Lamperti A., Lamagna L., Congedo G., Spiga S. Cubic/tetragonal phase stabilization in high-k ZrO₂ thin films grown using O₃-based Atomic Layer Deposition // *J. Electrochem. Soc.* 2011. V. 158. N 10. P. G221–G226. <https://doi.org/10.1149/1.3625254>
- [97] Ye G., Wang H., Arulkumaran S., Ng G. I., Hofstetter R., Li Y., Anand M. J., Ang K. S., Maung Y. K. T., Foo S. C. Atomic Layer Deposition of ZrO₂ as gate dielectrics for AlGaN/GaN metal-insulator-semiconductor high electron mobility transistors on silicon // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 103. N 14. ID 142109. <https://doi.org/10.1063/1.4824445>
- [98] Anderson T. J., Wheeler V. D., Shahin D. I., Tadjer M. J., Koehler A. D., Hobart K. D., Christou A., Kub F. J., Eddy Jr. C. R. Enhancement mode AlGaN/GaN MOS high-electron-mobility transistors with ZrO₂ gate dielectric deposited by Atomic Layer Deposition // *Appl. Phys. Express*. 2016. V. 9. N 7. ID 071003. <https://doi.org/10.7567/APEX.9.071003>
- [99] Wang X., Ghosh S. K., Afshar-Mohajer M., Zhou H., Liu Y., Han X., Cai J., Zou M., Meng X. Atomic Layer Deposition of zirconium oxide thin films // *J. Mater. Res.* 2020. V. 35. N 7. P. 804–812. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.338>
- [100] Cheng Y. L., Hsieh C. Y., Chang Y. L. Deposition cycle of Atomic Layer Deposition HfO₂ film: Effects on electrical performance and reliability // *Thin Solid Films*. 2013. V. 528. P. 77–81. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.09.089>
- [101] Yota J., Shen H., Ramanathan R. Characterization of Atomic Layer Deposition HfO₂, Al₂O₃, and Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition Si₃N₄ as metal-insulator-metal capacitor dielectric for GaAs HBT technology // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2013. V. 31. N 1. ID 01A134. <https://doi.org/10.1116/1.4769207>
- [102] Cheng Y. L., Kao K. C., Huang C. J., Chen G. S., Fang J. S. Atomic Layer Deposition HfO₂ capping layer effect on porous low dielectric constant materials // *Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 354. Pt A. P. 115–119. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.070>
- [103] Corrêa S. A., Brizzi S., Schmeisser D. Spectroscopic investigation of the electronic structure of thin

- Atomic Layer Deposition HfO₂ films // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2016. V. 34. N 1. ID 01A117.
<https://doi.org/10.1116/1.4935338>
- [104] Rahman M., Kim J. G., Kim D. H., Kim T. W. Characterization of Al incorporation into HfO₂ dielectric by Atomic Layer Deposition // *Micromachines*. 2019. V. 10. N 6. ID 361.
<https://doi.org/10.3390/mi10060361>
- [105] Choi S. N., Moon S. E., Yoon S. M. Film thickness-dependent ferroelectric polarization switching dynamics of undoped HfO₂ thin films prepared by Atomic Layer Deposition // *Ceram. Int*. 2019. V. 45. N 17. P. 22642–22648.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.297>
- [106] Nigro R. L., Schilirò E., Mannino G., Di Franco S., Roccaforte F. Comparison between thermal and plasma enhanced Atomic Layer Deposition processes for the growth of HfO₂ dielectric layers // *J. Cryst. Growth*. 2020. V. 539. ID 125624.
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125624>
- [107] Chen P. Y., He Z. Y., Cha M. Y., Liu H., Zhu H., Chen L., Sun Q. Q., Ding S. J., Zhang D. W. Hafnium oxide-based ferroelectric devices for Computing-in-Memory applications // *Phys. Status Solidi A*. 2021. V. 218. N 9. ID 2000635.
<https://doi.org/10.1002/pssa.202000635>
- [108] Egorov K. V., Lebedinskii Yu. Yu., Markeev A. M., Orlov O. M. Full ALD Ta₂O₅-based stacks for resistive random access memory grown with *in vacuo* XPS monitoring // *Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 356. P. 454–459.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.217>
- [109] Егоров К. В., Кузьмичев Д. С., Лебединский Ю. Ю., Маркеев А. М. Атомно-слоевое осаждение оксида тантала с управляемым дефицитом кислорода для создания структур резистивной памяти // *ЖПХ*. 2016. Т. 89. № 11. С. 1459–1464 [Egorov K. V., Kuz'michev D. S., Lebedinskii Yu. Yu., Markeev A. M. Atomic Layer Deposition of tantalum oxide with controlled oxygen deficiency for making resistive memory structures // *Russ. J. Appl. Chem.* 2016. V. 89. N 11. P. 1825–1830.
<https://doi.org/10.1134/S1070427216110136>].
- [110] Vallat R., Gassilloud R., Eychenne B., Vallée C. Selective deposition of Ta₂O₅ by adding plasma etching super-cycles in Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition steps // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2017. V. 35. N 1. ID 01B104.
<https://doi.org/10.1116/1.4965966>
- [111] Chernikova A. G., Kozodaev M. G., Markeev A. M., Matveyev Y. A., Negrov D. V., Orlov O. M. Confinement-free annealing induced ferroelectricity in Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ thin films // *Microelectron. Eng.* 2015. V. 147. P. 15–18.
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2015.04.024>
- [112] Markeev A., Chouprik A., Egorov K., Lebedinskii Yu., Zenkevich A., Orlov O. Multilevel resistive switching in ternary Hf_xAl_{1-x}O_y oxide with graded Al depth profile // *Microelectron. Eng.* 2013. V. 109. P. 342–345. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2013.03.084>
- [113] Wang C., Xu M., Gu J., Zhang D. W., Peide D. Y. GaSb metal-oxide-semiconductor capacitors with Atomic-Layer-Deposited HfAlO as gate dielectric // *Electrochem. Solid-State Lett.* 2011. V. 15. N 3. P. H51–H54. <https://doi.org/10.1149/2.001203esl>
- [114] Yoo Y. W., Jeon W., Lee W., An C. H., Kim S. K., Hwang C. S. Structure and electrical properties of Al-doped HfO₂ and ZrO₂ films grown via Atomic Layer Deposition on Mo electrodes // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2014. V. 6. N 24. P. 22474–22482.
<https://doi.org/10.1021/am506525s>
- [115] Liu L., Hou Y., Zhang W., Han D., Wang Y. Ozone treatment improved the resistive switching uniformity of HfAlO₂ based RRAM devices // *Adv. Condens. Matter Phys.* 2015. V. 2015. ID 714097.
<https://doi.org/10.1155/2015/714097>
- [116] Lu B., Lv H., Zhang Y., Zhang Y., Liu C. Comparison of HfAlO, HfO₂/Al₂O₃, and HfO₂ on n-type GaAs using Atomic Layer Deposition // *Superlattices Microstruct.* 2016. V. 99. P. 54–57.
<https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.07.032>
- [117] Lamagna L., Molle A., Wiemer C., Spiga S., Grazianetti C., Congedo G., Fanciulli M. Atomic Layer Deposition of Al-doped ZrO₂ thin films as gate dielectric for In_{0.53}Ga_{0.47}As // *J. Electrochem. Soc.* 2011. V. 159. N 3. P. H220–H224.
<https://doi.org/10.1149/2.034203jes>
- [118] Lee S., Choi H., Shin S., Park J., Ham G., Jung H., Jeon H. Permeation barrier properties of an Al₂O₃/ZrO₂ multilayer deposited by Remote Plasma Atomic Layer Deposition // *Current Appl. Phys.* 2014. V. 14. N 4. P. 552–557.
<https://doi.org/10.1016/j.cap.2013.11.053>
- [119] Kukli K., Kemell M., Castán H., Dueñas S., Seemen H., Rähn M., Link J., Stern R., Heikkilä M. J., Ritala M., Leskelä M. Atomic Layer Deposition and performance of ZrO₂–Al₂O₃ thin films // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2018. V. 7. N 5. P. P287–P294. <https://doi.org/10.1149/2.0021806jss>
- [120] Alekhin A. P., Chouprik A. A., Gudkova S. A., Markeev A. M., Lebedinskii Yu. Yu., Matveyev Yu. A., Zenkevich A. V. Structural and electrical properties of Ti_xAl_{1-x}O_y thin films grown by Atomic Layer Deposition // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2011. V. 29. N 1. ID 01A302.
<https://doi.org/10.1116/1.3533763>
- [121] Cisneros-Morales M. C., Aita C. R. Phase selection and transition in Hf-rich hafnia-titania nanolaminates // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 109. N 12. ID 123523.
<https://doi.org/10.1063/1.3597321>
- [122] Pokhriyal S., Biswas S. Doping dependent high-frequency dielectric properties of Hf_{1-x}Ti_xO₂ nanoparticles // *Mater. Today: Proc.* 2016. V. 3. N 6. P. 1311–1319. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.009>

- [123] *Hernández-Arriaga H., López-Luna E., Martínez-Guerra E., Turrubiarres M. M., Rodríguez A. G., Vidal M. A.* Growth of HfO₂/TiO₂ nanolaminates by Atomic Layer Deposition and HfO₂-TiO₂ by Atomic Partial Layer Deposition // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 121. N 6. ID 064302. <https://doi.org/10.1063/1.4975676>
- [124] *Jögi I., Kukli K., Ritala M., Leskelä M., Aarik J., Aidla A., Lu J.* Atomic Layer Deposition of high capacitance density Ta₂O₅-ZrO₂ based dielectrics for metal-insulator-metal structures // *Microelectron. Eng.* 2010. V. 87. N 2. P. 144–149. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.06.032>
- [125] *Kukli K., Kemell M., Vehkamäki M., Heikkilä M. J., Mizohata K., Kalam K., Ritala M., Leskelä M., Kundrata I., Fröhlich K.* Atomic Layer Deposition and properties of mixed Ta₂O₅ and ZrO₂ films // *AIP Adv.* 2017. V. 7. N 2. ID 025001. <https://doi.org/10.1063/1.4975928>
- [126] *Alekhin A. P., Chouprik A. A., Grigal I. P., Gudkova S. A., Lebedinskii Yu. Yu., Markeev A. M., Zaitsev S. A.* Electrical properties of quaternary HfAlTiO thin films grown by Atomic Layer Deposition // *Thin Solid Films.* 2012. V. 520. N 14. P. 4547–4550. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.10.186>
- [127] *Васильев В. Ю.* О методологии оценки конформности атомно-слоевого осаждения тонких пленок в высокоаспектных наноструктурах // *Наноиндустрия.* 2019. Т. 12. № 3–4 (90). С. 194–205. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2019.12.3-4.194.204>
- [128] *Jeon W., Chung H. S., Joo D., Kang S. W.* TiO₂/Al₂O₃/TiO₂ nanolaminated thin films for DRAM capacitor deposited by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition // *Electrochem. Solid-State Lett.* 2007. V. 11. N 2. P. H19–H21. <https://doi.org/10.1149/1.2813881>
- [129] *Niinistö J., Kukli K., Heikkilä M., Ritala M., Leskelä M.* Atomic Layer Deposition of high-k oxides of the group 4 metals for memory applications // *Adv. Eng. Mater.* 2009. V. 11. N 4. P. 223–234. <https://doi.org/10.1002/adem.200800316>
- [130] *Park B. E., Oh I. K., Mahata C., Lee C. W., Thompson D., Maeng W. J., Kim H.* Atomic Layer Deposition of Y-stabilized ZrO₂ for advanced DRAM capacitors // *J. Alloys Compd.* 2017. V. 722. P. 307–312. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.036>
- [131] *Lee K., Jang W., Kim H., Lim H., Kim B., Seo H., Jeon H.* Leakage current suppression in spatially controlled Si-doped ZrO₂ for capacitors using Atomic Layer Deposition // *Thin Solid Films.* 2018. V. 657. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.04.033>
- [132] *Lau W. S.* Surface smoothing and roughening effects of high-k dielectric materials deposited by Atomic Layer Deposition and their significance for MIM capacitors used in DRAM technology // 2019 China Semicond. Technol. Int. Conf. (CSTIC). 2019. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/CSTIC.2019.8755629>
- [133] *Lau W. S.* Surface smoothing and roughening effects of high-k dielectric materials deposited by Atomic Layer Deposition and their significance for MIM capacitors used in DRAM technology. Part II // 2020 China Semicond. Technol. Int. Conf. (CSTIC). 2020. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/CSTIC49141.2020.9282429>
- [134] *Jeon W.* Recent advances in the understanding of high-k dielectric materials deposited by Atomic Layer Deposition for dynamic random-access memory capacitor applications // *J. Mater. Res.* 2020. V. 35. N 7. P. 775–794. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.335>
- [135] *Галперин В. А., Громов Д. Г., Кицюк Е. П., Маркеев А. М., Лебедев Е. А., Черникова А. Г., Дубков С. В.* Суперконденсатор на основе УНТ с использованием псевдоемкости тонких слоев оксидов металлов // *Нано- и микросистемная техника.* 2014. № 6 (167). С. 33–36.
- [136] Пат. RU 2521083 C2 (опубл. 2014). Наноструктурный электрод для псевдоемкостного накопления энергии.
- [137] Пат. RU 2528010 C2 (опубл. 2014). Твердотельный суперконденсатор на основе многокомпонентных оксидов.
- [138] Пат. RU 2572816 C2 (опубл. 2016). Многослойный нанокompозит для двухобкладочных конденсаторов и способ его изготовления.
- [139] *Zhong Y., Xia X., Zhan J., Wang Y., Wang X., Tu J.* Monolayer titanium carbide hollow sphere arrays formed via an Atomic Layer Deposition assisted method and their excellent high-temperature supercapacitor performance // *J. Mater. Chem. A.* 2016. V. 4. N 48. P. 18717–18722. <https://doi.org/10.1039/C6TA08179G>
- [140] *Du K., Lu P., Liu G., Chen X., Wang K.* Atomic Layer Deposition of TiN layer on TiO₂ nanotubes for enhanced supercapacitor performance // 2017 19th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). 2017. P. 710–713. <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994147>
- [141] *Majumdar D., Mandal M., Bhattacharya S. K.* V₂O₅ and its carbon-based nanocomposites for supercapacitor applications // *ChemElectroChem.* 2019. V. 6. N 6. P. 1623–1648. <https://doi.org/10.1002/celec.201801761>
- [142] *Абдулагатов А. И., Ашурбекова Кр. Н., Ашурбекова Ка. Н., Амашаев Р. Р., Рабаданов М. Х., Абдулагатов И. М.* Молекулярно-слоевое осаждение и термические превращения титан(алюминий)-ванадиевых органо-оксидных пленок // *ЖПХ.* 2018. Т. 91. № 3. С. 305–318 [*Abdulagatov A. I., Ashurbekova K. N., Ashurbekova K. N., Amashaev R. R., Rabadanov M. K., Abdulagatov*

- I. M.* Molecular Layer Deposition and thermal transformations of titanium (aluminum)-vanadium hybrid organic-inorganic films // *Russ. J. Appl. Chem.* 2018. V. 91. N 3. P. 347–359. <https://doi.org/10.1134/S1070427218030011>].
- [143] *Ashurbekova K., Ashurbekova K., Saric I., Gobbi M., Modin E., Chuvilin A., Petravic M., Abdulagatov I., Knez M.* Ultrathin hybrid SiAlCOH dielectric films through ring-opening Molecular Layer Deposition of cyclic tetrasiloxane // *Chem. Mater.* 2021. V. 33. N 3. P. 1022–1030. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c04408>
- [144] *Ashurbekova K., Ashurbekova K., Saric I., Modin E., Petravic M., Abdulagatov I., Abdulagatov A., Knez M.* Radical-triggered cross-linking for molecular layer deposition of SiAlCOH hybrid thin films // *Chem. Commun.* 2021. V. 57. N 17. P. 2160–2163. <https://doi.org/10.1039/D0CC07858A>
- [145] *Oh I. K., Kim M. K., Lee J. S., Lee C. W., Lansalot-Matras C., Noh W., Park J., Noori A., Thompson D., Chu S., Maeng W. J.* The effect of La₂O₃-incorporation in HfO₂ dielectrics on Ge substrate by Atomic Layer Deposition // *Appl. Surf. Sci.* 2013. V. 287. P. 349–354. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.153>
- [146] *Kozodaev M. G., Chernikova A. G., Korostylev E. V., Park M. H., Schroeder U., Hwang C. S., Markeev A. M.* Ferroelectric properties of lightly doped La:HfO₂ thin films grown by plasma-assisted Atomic Layer Deposition // *Appl. Phys. Lett.* 2017. V. 111. N 13. ID 132903. <https://doi.org/10.1063/1.4999291>
- [147] *Adelmann C., Tielens H., Dewulf D., Hardy A., Pierreux D., Swerts J., Rosseel E., Shi X., Van Bael M. K., Kittl J. A., Van Elshocht S.* Atomic Layer Deposition of Gd-doped HfO₂ thin films // *J. Electrochem. Soc.* 2010. V. 157. N 4. P. G105–G110. <https://doi.org/10.1149/1.3301663>
- [148] *Østreng E., Sønsteby H. H., Sajavaara T., Nilssen O., Fjellvåg H.* Atomic Layer Deposition of ferroelectric LiNbO₃ // *J. Mater. Chem. C.* 2013. V. 1. N 27. P. 4283–4290. <https://doi.org/10.1039/C3TC30271G>
- [149] *Onaya T., Nabatame T., Sawamoto N., Ohi A., Ikeda N., Nagata T., Ogura A.* Ferroelectricity of Hf_xZr_{1-x}O₂ thin films fabricated by 300°C low temperature process with Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition // *Microelectron. Eng.* 2019. V. 215. ID 111013. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.111013>
- [150] *Chang S., Selvaraj S. K., Choi Y. Y., Hong S., Nakhmanson S. M., Takoudis C. G.* Atomic Layer Deposition of environmentally benign SnTiO_x as a potential ferroelectric material // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2016. V. 34. N 1. ID 01A119. <https://doi.org/10.1116/1.4935650>
- [151] *Chernikova A. G., Kuzmichev D. S., Negrov D. V., Kozodaev M. G., Polyakov S. N., Markeev A. M.* Ferroelectric properties of full Plasma-Enhanced ALD TiN/La:HfO₂/TiN stacks // *Appl. Phys. Lett.* 2016. V. 108. N 24. ID 242905. <https://doi.org/10.1063/1.4953787>
- [152] *Kozodaev M. G., Lebedinskii Yu. Yu., Chernikova A. G., Polyakov S. N., Markeev A. M.* Low temperature Plasma-Enhanced ALD TiN ultrathin films for Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂-based ferroelectric MIM structures // *Phys. Status Solidi A.* 2017. V. 214. N 6. ID 1700056. <https://doi.org/10.1002/pssa.201700056>
- [153] *Chen Y., Wang L., Liu L., Tang L., Yuan X., Chen H., Zhou K., Zhang D.* Thickness-dependent ferroelectric properties of HfO₂/ZrO₂ nanolaminates using Atomic Layer Deposition // *J. Mater. Sci.* 2021. V. 56. N 10. P. 6064–6072. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05680-6>
- [154] *Kil D. S., Song H. S., Lee K. J., Hong K., Kim J. H., Park K. S., Yeom S. J., Roh J. S., Kwak N. J., Sohn H. C., Kim J. W.* Development of new TiN/ZrO₂/Al₂O₃/ZrO₂/TiN capacitors extendable to 45 nm generation DRAMs replacing HfO₂ based dielectrics // 2006 Symp. on VLSI Technol. Digest of Technical Papers. 2006. P. 38–39. <https://doi.org/10.1109/VLSIT.2006.1705205>
- [155] Пат. RU 2524415 C1 (опубл. 2014). Мемристор на основе смешанного оксида металла.
- [156] *Matveyev Y., Egorov K., Markeev A., Zenkevich A.* Resistive switching and synaptic properties of fully Atomic Layer Deposition grown TiN/HfO₂/TiN devices // *J. Appl. Phys.* 2015. V. 117. N 4. ID 044901. <https://doi.org/10.1063/1.4905792>
- [157] *Egorov K. V., Kirtaev R. V., Lebedinskii Yu. Yu., Markeev A. M., Matveyev Y. A., Orlov O. M., Zablotskiy A. V., Zenkevich A. V.* Complementary and bipolar regimes of resistive switching in TiN/HfO₂/TiN stacks grown by Atomic-Layer Deposition // *Phys. Status Solidi A.* 2015. V. 212. N 4. P. 809–816. <https://doi.org/10.1002/pssa.201431674>
- [158] *Jain B., Huang C. S., Misra D., Tapily K., Clark R. D., Consiglio S., Wajda C. S., Leusink G. J.* Multilevel resistive switching in Hf-based RRAM // *ECS Trans.* 2019. V. 89. N 3. P. 39–44. <https://doi.org/10.1149/08903.0039ecst>
- [159] *Hämäläinen J., Ritala M., Leskelä M.* Atomic Layer Deposition of noble metals and their oxides // *Chem. Mater.* 2014. V. 26. N 1. P. 786–801. <https://doi.org/10.1021/cm402221y>
- [160] *Васильев В. Ю.* Сверхтонкие пленки металлов платиновой группы для применения в нано- и микротехнологиях // *Нано- и микросистемная техника.* 2016. Т. 18. № 7. С. 454–460 [*Vasilyev V. Yu.* Ultra-thin metal films of the platinum group for application in nanoand micro-technologies // *Nanoand Microsystems Technology.* 2016. V. 18. N 7. P. 461–464].
- [161] *Knisley T. J., Ariyasena T. C., Sajavaara T., Saly M. J., Winter C. H.* Low temperature growth of

- high purity, low resistivity copper films by Atomic Layer Deposition // *Chem. Mater.* 2011. V. 23. N 20. P. 4417–4419. <https://doi.org/10.1021/cm202475e>
- [162] *Tripathi T. S., Karppinen M.* Efficient process for direct Atomic Layer Deposition of metallic Cu thin films based on an organic reductant // *Chem. Mater.* 2017. V. 29. N 3. P. 1230–1235. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b04597>
- [163] *Klesko J. P., Kerrigan M. M., Winter C. H.* Low temperature thermal Atomic Layer Deposition of cobalt metal films // *Chem. Mater.* 2016. V. 28. N 3. P. 700–703. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b03504>
- [164] *Yuan G., Shimizu H., Momose T., Shimogaki Y.* Kinetic study on hot-wire-assisted Atomic Layer Deposition of nickel thin films // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2014. V. 32. N 1. ID 01A104. <https://doi.org/10.1116/1.4829361>
- [165] *Blanquet E., Mantoux A., Pons M., Vahlas C.* Chemical Vapour Deposition and Atomic Layer Deposition of amorphous and nanocrystalline metallic coatings: Towards deposition of multimetallic films // *J. Alloys Compd.* 2010. V. 504. Supl. 1. P. S422–S424. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.205>
- [166] *Knoops H. C., Braeken E. M., de Peuter K., Potts S. E., Haukka S., Pore V., Kessels W. M. M.* Atomic Layer Deposition of silicon nitride from bis(tert-butylamino)silane and N₂ plasma // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. V. 7. N 35. P. 19857–19862. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b06833>
- [167] *Meng X., Byun Y. C., Kim H. S., Lee J. S., Lucero A. T., Cheng L., Kim J.* Atomic Layer Deposition of silicon nitride thin films: A review of recent progress, challenges, and outlooks // *Materials.* 2016. V. 9. N 12. ID 1007. <https://doi.org/10.3390/ma9121007>
- [168] *Васильев В. Ю.* Атомно-слоевое осаждение тонких слоев нитрида кремния для микро- и наноэлектроники // *Электрон. техника. Сер. 3. Микроэлектроника.* 2020. № 1 (177). С. 31–41. <https://doi.org/10.7868/S2410993220010042>
- [169] *Yun H. J., Kim H., Choi B. J.* Growth of aluminum nitride thin films by Atomic Layer Deposition and their applications: A review // *Korean J. Mater. Res.* 2019. V. 29. N 9. P. 567–577. <https://doi.org/10.3740/MRSK.2019.29.9.567>
- [170] *Nahar M., Rocklein N., Andreas M., Funston G., Goodner D.* Stress modulation of titanium nitride thin films deposited using Atomic Layer Deposition // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2017. V. 35. N 1. ID 01B144. <https://doi.org/10.1116/1.4972859>
- [171] *Krylov I., Zoubenko E., Weinfeld K., Kauffmann Y., Xu X., Ritter D., Eizenberg M.* Obtaining low resistivity (~100 μΩ cm) TiN films by Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition using a metalorganic precursor // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2018. V. 36. N 5. ID 051505. <https://doi.org/10.1116/1.5035422>
- [172] *Yeon C., Jung J., Byun H., Tan K. C., Song T., Kim S., Kim J. H., Lee S. J., Park Y. S.* Tertiary alkyl halides as growth activator and inhibitor for novel Atomic Layer Deposition of low resistive titanium nitride // *AIP Adv.* 2021. V. 11. N 1. ID 015218. <https://doi.org/10.1063/5.0031127>
- [173] *Kozen A. C., Sowa M. J., Ju L., Strandwitz N. C., Zeng G., Babuska T. F., Hsain Z., Krick B. A.* Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of vanadium nitride // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2019. V. 37. N 6. ID 061505. <https://doi.org/10.1116/1.5109671>
- [174] *Sowa M. J., Ju L., Kozen A. C., Strandwitz N. C., Zeng G., Babuska T. F., Hsain Z., Krick B. A.* Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of titanium vanadium nitride // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2018. V. 36. N 6. ID 06A103. <https://doi.org/10.1116/1.5037463>
- [175] *Kukli K., Kemell M., Castán H., Dueñas S., Seemen H., Rahn M., Link J., Stern R., Ritala M., Leskelä M.* Atomic Layer Deposition and properties of HfO₂–Al₂O₃ nanolaminates // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2018. V. 7. N 9. P. P501–P508. <https://doi.org/10.1149/2.0261809jss>
- [176] *Jõgiaas T., Kull M., Seemen H., Ritslaid P., Kukli K., Tamm A.* Optical and mechanical properties of nanolaminates of zirconium and hafnium oxides grown by Atomic Layer Deposition // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2020. V. 38. N 2. ID 022406. <https://doi.org/10.1116/1.5131563>
- [177] *Ihanus J., Ritala M., Leskelä M., Soininen E., Park W., Kaloyeros A. E., Harris W., Barth K. W., Topol A. W., Sajavaara T., Keinonen J.* Blue-and green-emitting SrS:Cu electroluminescent devices deposited by the Atomic Layer Deposition technique // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 94. N 6. P. 3862–3868. <https://doi.org/10.1063/1.1603349>
- [178] *Anila E. I., Jayaraj M. K.* Low temperature deposition of SrS:Cu, F ACTFEL device by electron beam evaporation // *J. Lumin.* 2010. V. 130. N 11. P. 2180–2183. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2010.06.016>
- [179] *Mishra S., Kshatri D. S., Khare A., Tiwari S., Dwivedi P. K.* Fabrication, characterization and electroluminescence studies of SrS:Ce³⁺ ACTFEL device // *Mater. Lett.* 2017. V. 198. P. 101–105. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.04.013>
- [180] *Kuhs J., Hens Z., Detavernier C.* Plasma enhanced Atomic Layer Deposition of gallium sulfide thin films // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2019. V. 37. N 2. ID 020915. <https://doi.org/10.1116/1.5079553>
- [181] *Rosa J., Heikkilä M. J., Sirkiä M., Merdes S.* Red Y₂O₃:Eu-based electroluminescent device prepared by Atomic Layer Deposition for transparent display

- applications // *Materials*. 2021. V. 14. N 6. ID 1505. <https://doi.org/10.3390/ma14061505>
- [182] Leskelä M., Mattinen M., Ritala M. Atomic Layer Deposition of optoelectronic materials // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2019. V. 37. N 3. ID 030801. <https://doi.org/10.1116/1.5083692>
- [183] Mitsuhashi E., Yano Y., Susukida M., Hirabayashi J., Tuenge R., Dickey E. Inorganic TDEL display using SrS:Cu blue-emitting phosphor // *SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap.* 2004. V. 35. N 1. P. 1151–1153. <https://doi.org/10.1889/1.1833130>
- [184] Bakke J. R., Jung H. J., Tanskanen J. T., Sinclair R., Bent S. F. Atomic layer deposition of CdS films // *Chem. Mater.* 2010. V. 22. N 16. P. 4669–4678. <https://doi.org/10.1021/cm100874f>
- [185] Smet P. F., Moreels I., Hens Z., Poelman D. Luminescence in sulfides: A rich history and a bright future // *Materials*. 2010. V. 3. N 4. P. 2834–2883. <https://doi.org/10.3390/ma3042834>
- [186] Miikkulainen V., Leskelä M., Ritala M., Puurunen R. L. Crystallinity of inorganic films grown by Atomic Layer Deposition: Overview and general trends // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. N 2. ID 021301. <https://doi.org/10.1063/1.4757907>
- [187] Jing Y., Merckx M. J. M., Cai J., Cao K., Kessels W. M. M., Mackus A. J. M., Chen R. Nanoscale encapsulation of perovskite nanocrystal luminescent films via Plasma-Enhanced SiO₂ Atomic Layer Deposition // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020. V. 12. N 47. P. 53519–53527. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c16082>
- [188] Cheng C. Y., Mao M. H. Photo-stability and time-resolved photoluminescence study of colloidal CdSe/ZnS quantum dots passivated in Al₂O₃ using Atomic Layer Deposition // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 120. N 8. ID 083103. <https://doi.org/10.1063/1.4961425>
- [189] Van Ommen J. R., Goulas A. Atomic Layer Deposition on particulate materials // *Mater. Today Chem.* 2019. V. 14. ID 100183. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.08.002>
- [190] Yu K., Lin X., Lu G., Wen Z., Yuan C., Chen J. Optimized CdS quantum dot-sensitized solar cell performance through Atomic Layer Deposition of ultrathin TiO₂ coating // *RSC Adv.* 2012. V. 2. N 20. P. 7843–7848. <https://doi.org/10.1039/C2RA20979A>
- [191] Соснов Е. А., Булгакова К. И., Пивнева С. П. Активационный метод создания низковольтных катодлюминофоров // *Исследования, синтез и технология люминофоров: Сб. науч. тр. ОАО «Люминофор». Вып. 42. Ставрополь: ОАО «Люминофор», 1997. С. 39–44.*
- [192] Weimer A. W. Particle Atomic Layer Deposition // *J. Nanopart. Res.* 2019. V. 21. N 1. ID 9. <https://doi.org/10.1007/s11051-018-4442-9>
- [193] Benick J., Hoex B., Van De Sanden M. C. M., Kessels W. M. M., Schultz O., Glunz S. W. High efficiency *n*-type Si solar cells on Al₂O₃-passivated boron emitters // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. N 25. ID 253504. <https://doi.org/10.1063/1.2945287>
- [194] Nanu M., Schoonman J., Goossens A. Solar-energy conversion in TiO₂/CuInS₂ nanocomposites // *Adv. Funct. Mater.* 2005. V. 15. N 1. P. 95–100. <https://doi.org/10.1002/adfm.200400150>
- [195] Schmidt J., Werner F., Veith B., Zielke D., Bock R., Tiba M. V., Poodt P., Roozeboom F., Li A., Cuevas A., Brendel R. Industrially relevant Al₂O₃ deposition techniques for the surface passivation of Si solar cells // *Proceedings 25th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. (EU PVSEC / WCPEC-5)*. Valencia, Spain, 2010. P. 1130–1133. <https://doi.org/10.4229/25theupvsec2010-2ao.1.6>
- [196] Battaglia C., De Nicolas S. M., De Wolf S., Yin X., Zheng M., Ballif C., Javey A. Silicon heterojunction solar cell with passivated hole selective MoO_x contact // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 104. N 11. ID 113902. <https://doi.org/10.1063/1.4868880>
- [197] Macco B., Vos M. F. J., Thissen N. F. W., Bol A. A., Kessels W. M. M. Low-temperature Atomic Layer Deposition of MoO_x for silicon heterojunction solar cells // *Phys. Status Solidi RRL*. 2015. V. 9. N 7. P. 393–396. <https://doi.org/10.1002/pssr.201510117>
- [198] Gerling L. G., Mahato S., Morales-Vilches A., Masmitja G., Ortega P., Voz C., Alcubilla R., Puigdollers J. Transition metal oxides as hole-selective contacts in silicon heterojunctions solar cells // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2016. V. 145. N 2. P. 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.08.028>
- [199] Islam R., Saraswat K. C. Metal/insulator/semiconductor carrier selective contacts for photovoltaic cells // *IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC): Proceedings*. Denver, CO, USA, 2014. P. 285–289. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6924915>
- [200] Islam R., Ramesh P., Nam J. H., Saraswat K. C. Nickel oxide carrier selective contacts for silicon solar cells // *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC): Proceedings*. New Orleans, LA, USA, 2015. 4 p. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7355921>
- [201] Avasthi S., McClain W. E., Man G., Kahn A., Schwartz J., Sturm J. C. Hole-blocking titanium-oxide/silicon heterojunction and its application to photovoltaics // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. N 20. ID 203901. <https://doi.org/10.1063/1.4803446>
- [202] Lin Z., Jiang C., Zhu C., Zhang J. Development of inverted organic solar cells with TiO₂ interface layer by using low-temperature Atomic Layer Deposition // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2013. V. 5. N 3. P. 713–718. <https://doi.org/10.1021/am302252p>
- [203] Banga D., Jarayaju N., Sheridan L., Kim Y.-G., Perdue B., Zhang X., Zhang Q., Stickney J.

- Electrodeposition of CuInSe₂ (CIS) via Electrochemical Atomic Layer Deposition (E-ALD) // *Langmuir*. 2012. V. 28. N 5. P. 3024–3031.
<https://doi.org/10.1021/la203574y>
- [204] Sutherland B. R., Hoogland S., Adachi M. M., Kanjanaboos P., Wong C. T. O., McDowell J. J., Xu J., Voznyy O., Ning Z., Houtepen A. J., Sargent E. H. Perovskite thin films via Atomic Layer Deposition // *Adv. Mater.* 2015. V. 27. N 1. P. 53–58.
<https://doi.org/10.1002/adma.201403965>
- [205] Luka G., Krajewski T. A., Witkowski B. S., Wisz G., Virt I. S., Guziewicz E., Godlewski M. Aluminum-doped zinc oxide films grown by Atomic Layer Deposition for transparent electrode applications // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2011. V. 22. N 12. P. 1810–1815.
<https://doi.org/10.1007/s10854-011-0367-0>
- [206] Pollock E. B., Lad R. J. Influence of dosing sequence and film thickness on structure and resistivity of Al-ZnO films grown by Atomic Layer Deposition // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2014. V. 32. N 4. ID 041516.
<https://doi.org/10.1116/1.4885063>
- [207] Van Delft J. A., Garcia-Alonso D., Kessels W. M. M. Atomic Layer Deposition for photovoltaics: Applications and prospects for solar cell manufacturing // *Semicond. Sci. Technol.* 2012. V. 27. N 7. ID 074002.
<https://doi.org/10.1088/0268-1242/27/7/074002>
- [208] Лучинин В. Гибкая электроника // *Наноиндустрия*. 2013. № 8 (46). С. 26–32.
- [209] Di Giacomo F., Zardetto V., D'Epifanio A., Pescetelli S., Matteocci F., Razza S., Di Carlo A., Licoccia S., Kessels W. M. M., Creatore M., Brown T. M. Flexible perovskite photovoltaic modules and solar cells based on Atomic Layer Deposited compact layers and UV-irradiated TiO₂ scaffolds on plastic substrates // *Adv. Energy Mater.* 2015. V. 5. N 8. ID 1401808.
<https://doi.org/10.1002/aenm.201401808>
- [210] King D. M., Liang X., Burton B. B., Akhtar M. K., Weimer A. W. Passivation of pigment-grade TiO₂ particles by nanothick Atomic Layer Deposited SiO₂ films // *Nanotechnology*. 2008. V. 19. N 25. ID 255604.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/25/255604>
- [211] Liang X., Weimer A. W. Photoactivity passivation of TiO₂ nanoparticles using Molecular Layer Deposited (MLD) polymer films // *J. Nanopart. Res.* 2010. V. 12. N 1. P. 135–142.
<https://doi.org/10.1007/s11051-009-9587-0>
- [212] King D. M., Liang X., Weimer A. W. Functionalization of fine particles using Atomic and Molecular Layer Deposition // *Powder Technol.* 2012. V. 221. P. 13–25.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.12.020>
- [213] Jang E., Sridharan K., Park Y. M., Park T. J. Eliminated phototoxicity of TiO₂ particles by an Atomic-Layer-Deposited Al₂O₃ coating layer for UV-protection applications // *Chemistry — A Eur. J.* 2016. V. 22. N 34. P. 12022–12026.
<https://doi.org/10.1002/chem.201600815>
- [214] Azizpour H., Talebi M., Tichelaar F. D., Sotudeh-Gharebagh R., Guo J., Van Ommen J. R., Mostoufi N. Effective coating of titania nanoparticles with alumina via Atomic Layer Deposition // *Appl. Surf. Sci.* 2017. V. 426. P. 480–496.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.168>
- [215] Dwivedi V., Hasegawa M., Adomaitis R., Salami H., Uy A. Modification of radiator pigments by Atomic Layer Deposition (ALD) // 48th Int. Conf. on Environmental Systems. July 8–12, 2018. Albuquerque, New Mexico. ICES-2018-16. URL: <http://hdl.handle.net/2346/74034>
- [216] Guo J., Benz D., Nguyen T.-T. D., Nguyen P.-H., Le T.-L. T., Nguyen H.-H., La Zara D., Liang B., Hintzen H. T., van Ommen J. R., Bui H. V. Tuning the photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles by ultrathin SiO₂ films grown by low-temperature atmospheric pressure Atomic Layer Deposition // *Appl. Surf. Sci.* 2020. V. 530. ID 147244.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147244>
- [217] Ninness B. J., Bousfield D. W., Tripp C. P. Formation of a thin TiO₂ layer on the surfaces of silica and kaolin pigments through Atomic Layer Deposition // *Colloids Surf. A*. 2003. V. 214. N 1–3. P. 195–204.
[https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00390-4](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00390-4)
- [218] King D. M., Liang X., Carney C. S., Hakim L. F., Li P., Weimer A. W. Atomic Layer Deposition of UV-absorbing ZnO films on SiO₂ and TiO₂ nanoparticles using a fluidized bed reactor // *Adv. Func. Mater.* 2008. V. 18. N 4. P. 607–615.
<https://doi.org/10.1002/adfm.200700705>
- [219] Scheffe J. R., Francés A., King D. M., Liang X., Branch B. A., Cavanagh A. S., George S. M., Weimer A. W. Atomic Layer Deposition of iron (III) oxide on zirconia nanoparticles in a fluidized bed reactor using ferrocene and oxygen // *Thin Solid Films*. 2009. V. 517. N 6. P. 1874–1879.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.09.086>
- [220] Малыгин А. А. Технология молекулярного наслаивания и некоторые области ее применения // *ЖПХ*. 1996. Т. 69. № 10. С. 1585–1593 [Malygin A. A. Molecular Layering technology and some of its applications // *Russ. J. Appl. Chem.* 1996. V. 69. N 10. P. 1419–1426].
- [221] Малыгин А. А., Малков А. А., Соснов Е. А. Структурно-размерные эффекты и их применение в системах «ядро-нанооболочка», синтезированных методом молекулярного наслаивания // *Изв. АН. Сер. хим.* 2017. № 11. С. 1939–1962 [Malygin A. A., Malkov A. A., Sosnov E. A. Structural-dimensional effects and their application in the «core-nanoshell» systems synthesized by the molecular

- layering // *Russ. Chem. Bull.* 2017. V. 66. N 11. P. 1939–1962.
<https://doi.org/10.1007/s11172-017-1971-9>].
- [222] Choi S.-W., Park J. Y., Lee C., Lee J. G., Kim S. S. Synthesis of highly crystalline hollow TiO₂ fibers using Atomic Layer Deposition on polymer templates // *J. Am. Ceram. Soc.* 2011. V. 94. N 7. P. 1974–1977.
<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04600.x>
- [223] Li F., Yao X., Wang Z., Xing W., Jin W., Huang J., Wang Y. Highly porous metal oxide networks of interconnected nanotubes by Atomic Layer Deposition // *Nano Lett.* 2012. V. 12. N 9. P. 5033–5038. <https://doi.org/10.1021/nl3028312>
- [224] Kim W. S., Lee B. S., Kim D. H., Kim H. C., Yu W. R., Hong S. H. SnO₂ nanotubes fabricated using electrospinning and Atomic Layer Deposition and their gas sensing performance // *Nanotechnology.* 2010. V. 21. N 24. ID 245605.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/24/245605>
- [225] Guo L., Zhong Z., Wang Y. Atomic Layer Deposition on block copolymer membranes with gyroidal nanopores toward periodically nanostructured vapor sensors: Nanotubes versus nanorods // *Adv. Mater. Interfaces.* 2016. V. 3. N 16. ID 1600017.
<https://doi.org/10.1002/admi.201600017>
- [226] King J. S., Neff C. W., Blomquist S., Forsythe E., Morton D., Summers C. J. ZnS-based photonic crystal phosphors fabricated using Atomic Layer Deposition // *Phys. Status Solidi B.* 2004. V. 241. N 3. P. 763–766.
<https://doi.org/10.1002/pssb.200304287>
- [227] King J. S., Heineman D., Graugnard E., Summers C. J. Atomic Layer Deposition in porous structures: 3D photonic crystals // *Appl. Surf. Sci.* 2005. V. 244. N 1–4. P. 511–516.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.10.110>
- [228] Scharer M., Wu X., Yamilov A., Cao H., Chang R. P. Fabrication of inverted opal ZnO photonic crystals by Atomic Layer Deposition // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86. N 15. ID 151113.
<https://doi.org/10.1063/1.1900957>
- [229] King J. S., Graugnard E., Summers C. J. Photoluminescence modification by high-order photonic bands in TiO₂/ZnS:Mn multilayer inverse opals // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 88. N 8. ID 081109. <https://doi.org/10.1063/1.2177351>
- [230] Sechrist Z. A., Schwartz B. T., Lee J. H., McCormick J. A., Piestun R., Park W., George S. M. Modification of opal photonic crystals using Al₂O₃ Atomic Layer Deposition // *Chem. Mater.* 2006. V. 18. N 15. P. 3562–3570.
<https://doi.org/10.1021/cm060263d>
- [231] Cha H., Lee J., Jordan L. R., Lee S. H., Oh S. H., Kim H. J., Park J., Hong S., Jeon H. Surface passivation of a photonic crystal band-edge laser by Atomic Layer Deposition of SiO₂ and its application for biosensing // *Nanoscale.* 2015. V. 7. N 8. P. 3565–3571. <https://doi.org/10.1039/C4NR07552H>
- [232] Furlan K. P., Pasquarelli R. M., Krekeler T., Ritter M., Zierold R., Nielsch K., Schneider G. A., Janssen R. Highly porous α -Al₂O₃ ceramics obtained by sintering Atomic Layer Deposited inverse opals // *Ceram. Int.* 2017. V. 43. N 14. P. 11260–11264.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.176>
- [233] Bakos L. P., Karajz D., Katona A., Hernadi K., Parditka B., Erdélyi Z., Lukács I., Hórvölgyi Z., Szitási G., Szilágyi I. M. Carbon nanosphere templates for the preparation of inverse opal titania photonic crystals by Atomic Layer Deposition // *Appl. Surf. Sci.* 2020. V. 504. ID 144443.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144443>
- [234] Lee W., Dasgupta N. P., Jung H. J., Lee J. R., Sinclair R., Prinz F. B. Scanning tunneling spectroscopy of lead sulfide quantum wells fabricated by Atomic Layer Deposition // *Nanotechnology.* 2010. V. 21. N 48. ID 485402.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/48/485402>
- [235] Chen P., Mitsui T., Farmer D. B., Golovchenko J., Gordon R. G., Branton D. Atomic Layer Deposition to fine-tune the surface properties and diameters of fabricated nanopores // *Nano Lett.* 2004. V. 4. N 7. P. 1333–1337. <https://doi.org/10.1021/nl0494001>
- [236] Кузема А. В., Малыгин А. А., Ермилова М. М., Орехова Н. В., Басов Н. Л., Терещенко Г. Ф. Структурные, химические и динамические характеристики керамических мембран, модифицированных самоорганизующимися супрамолекулярными кремнийоксидными системами // *ЖПХ* 2009. Т. 82. № 3. С. 386–394 [Kuzema A. V., Malygin A. A., Ermilova M. M., Orekhova N. V., Basov N. L., Tereshchenko G. F. Structural, chemical, and dynamic characteristics of ceramic membranes modified with self-organized supramolecular silicon oxide systems // *Russ. J. Appl. Chem.* 2009. V. 82. N 3. P. 378–386.
<https://doi.org/10.1134/S1070427209030070>].
- [237] Малыгин А. А., Малков А. А., Михайловский С. В., Басов Н. Л., Ермилова М. М., Орехова Н. В., Терещенко Г. Ф. Оптимизация свойств неорганических каталитических мембран с использованием нанотехнологии молекулярного наслаивания // *Рос. нанотехнологии.* 2010. Т. 5. № 3–4. С. 5–10 [Malygin A. A., Malkov A. A., Mikhailovskii S. V., Basov N. L., Ermilova M. M., Orekhova N. V., Tereshchenko G. F. Optimization of properties of inorganic catalytic membranes using molecular layering nanotechnology // *Nanotechnol. Russ.* 2010. V. 5. N 3–4. P. 153–159.
<https://doi.org/10.1134/S1995078010030018>].
- [238] Detavernier C., Dendooven J., Sree S. P., Ludwig K. F., Martens J. A. Tailoring nanoporous

- materials by Atomic Layer Deposition // *Chem. Soc. Rev.* 2011. V. 40. N 11. P. 5242–5253.
<https://doi.org/10.1039/C1CS15091J>
- [239] Wang Q., Wang X., Wang Z., Huang J., Wang Y. PVDF membranes with simultaneously enhanced permeability and selectivity by breaking the tradeoff effect via Atomic Layer Deposition of TiO₂ // *J. Memb. Sci.* 2013. V. 442. P. 57–64.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.04.026>
- [240] Yang H. C., Waldman R. Z., Chen Z., Darling S. B. Atomic Layer Deposition for membrane interface engineering // *Nanoscale.* 2018. V. 10. N 44. P. 20505–20513.
<https://doi.org/10.1039/C8NR08114J>
- [241] Михайловский С. В., Жилиева Н. А., Облецова А. А., Ермилова М. М., Орехова Н. В., Малыгин А. А., Ярославцев А. Б. Влияние состава поверхностных оксидных структур (Mo, Nb, V, Ti)/ γ -Al₂O₃ на окислительное дегидрирование этана в этилен // *ЖПХ.* 2016. Т. 89. № 1. С. 37–43 [Mikhailovskii S. V., Zhilyaeva N. A., Obletsova A. A., Ermilova M. M., Orekhova N. V., Malygin A. A., Yaroslavtsev A. B. Effect of the composition of (Mo, Nb, V, Ti)/ γ -Al₂O₃ surface oxide structures on the oxidative dehydrogenation of ethane to ethylene // *Russ. J. Appl. Chem.* 2016. V. 89. N 1. P. 34–39.
<https://doi.org/10.1134/S1070427216010055>].
- [242] Жилиева Н. А., Ермилова М. М., Орехова Н. В., Басов Н. Л., Михайловский С. В., Малыгин А. А., Ярославцев А. Б. Окислительное дегидрирование этана на оксидных материалах в импульсном микрокаталитическом и мембранном реакторах // *Неорган. материалы.* 2018. Т. 54. № 11. С. 1202–1209 [Zhilyaeva N. A., Ermilova M. M., Orekhova N. V., Basov N. L., Mikhailovskii S. V., Malygin A. A., Yaroslavtsev A. B. Oxidative dehydrogenation of ethane on oxide materials in a pulsed microcatalytic and a membrane reactor // *Inorg. Mater.* 2018. V. 54. N 11. P. 1136–1143.
<https://doi.org/10.1134/S002016851811016X>].
- [243] Narayan R. J., Adiga S. P., Pellin M. J., Curtiss L. A., Hryn A. J., Stafslin S., Chisholm B., Shih C. C., Shih C. M., Lin S. J., Su Y. Y. Atomic Layer Deposition-based functionalization of materials for medical and environmental health applications // *Philos. Trans. R. Soc. A.* 2010. V. 368. N 1917. P. 2033–2064. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0011>
- [244] Rosental A., Tarre A., Gerst A., Sundqvist J., Hårsta A., Aidla A., Aarik J., Sammelselg V., Uustare T. Gas sensing properties of epitaxial SnO₂ thin films prepared by Atomic Layer Deposition // *Sens. Actuators B.* 2003. V. 93. N 1–3. P. 552–555.
[https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(03\)00236-3](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(03)00236-3)
- [245] Rosental A., Tarre A., Gerst A., Kasikov A., Lu J., Ottosson M., Uustare T. Epitaxial single and double nanolayers of SnO₂ and TiO₂ for resistive gas sensors // *IEEE Sens. J.* 2013. V. 13. N 5. P. 1648–1655.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2238227>
- [246] Marichy C., Pinna N. Atomic Layer Deposition to materials for gas sensing applications // *Adv. Mater. Interfaces.* 2016. V. 3. N 21. ID 1600335.
<https://doi.org/10.1002/admi.201600335>
- [247] Ng S., Prášek J., Zazpe R., Pytlíček Z., Spotz Z., Pereira J. R., Michalička J., Přikryl J., Krbal M., Sopha H., Hubálek J., Macák J. M. Atomic Layer Deposition of SnO₂-coated anodic one-dimensional TiO₂ nanotube layers for low concentration NO₂ sensing // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2020. V. 12. N 29. P. 33386–33396.
<https://doi.org/10.1021/acsmi.0c07791>
- [248] Lou C., Yang C., Zheng W., Liu X., Zhang J. Atomic Layer Deposition of ZnO on SnO₂ nanospheres for enhanced formaldehyde detection // *Sens. Actuators B.* 2021. V. 329. ID 129218.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129218>
- [249] Listewnik P., Hirsch M., Struk P., Weber M., Bechelany M., Jędrzejewska-Szczerska M. Preparation and characterization of microsphere ZnO ALD coating dedicated for the fiber-optic refractive index sensor // *Nanomaterials.* 2019. V. 9. N 2. ID 306. <https://doi.org/10.3390/nano9020306>
- [250] Listewnik P. Temperature fiber-optic sensor with ZnO ALD coating // *Eng. Proc.* 2020. V. 2. N 1. P. 99–104.
<https://doi.org/10.3390/engproc2020002099>
- [251] Kaushik P., Eliáš M., Michalička J., Hegemann D., Pytlíček Z., Nečas D., Zajičková L. Atomic Layer Deposition of titanium dioxide on multi-walled carbon nanotubes for ammonia gas sensing // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 370. P. 235–243.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.031>
- [252] Tarre A., Möldre K., Niilisk A., Mändar H., Aarik J., Rosental A. Atomic Layer Deposition of epitaxial TiO₂ II on c-sapphire // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2013. V. 31. N 1. ID 01A118.
<https://doi.org/10.1116/1.4764892>
- [253] Mokrushin A. S., Simonenko E. P., Simonenko N. P., Akkuleva K. T., Antipov V. V., Zaharova N. V., Malygin A. A., Bukunov K. A., Sevastyanov V. G., Kuznetsov N. T. Oxygen detection using nanostructured TiO₂ thin films obtained by the molecular layering method // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 463. P. 197–202.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.08.208>
- [254] Арсентьев М. Ю., Калинина М. В., Тихонов П. А., Морозова Л. В., Егорова Т. Л., Шилова О. А. Формирование и исследование сенсорных тонких слоев на основе оксидов циркония, редкоземельных элементов (Ce, Y, Tb) и получение МОП структур на их основе // *Физика и химия стекла.* 2014. Т. 40. № 6. С. 820–826 [Arsent'ev M. Y., Kalinina M. V., Tikhonov P. A., Morozova L. V., Egorova T. L., Shilova O. A. The formation and

- study of sensor thin layers based on zirconium and rare earth metal (Ce, Y, and Tb) oxides and the preparation of metal-oxide-semiconductor structures based on them // *Glass Phys. Chem.* 2014. V. 40. N 6. P. 629–634.
<https://doi.org/10.1134/S1087659614060029>].
- [255] *Chen Y., Yuchi Q., Li T., Yang G., Miao J., Huang C., Liu J., Li A., Qin Y., Zhang L.* Precise engineering of ultra-thin Fe₂O₃ decorated Pt-based nanozymes via atomic layer deposition to switch off undesired activity for enhanced sensing performance // *Sens. Actuators B.* 2020. V. 305. ID 127436.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127436>
- [256] *Tarre A., Aarik J., Mändar H., Niilisk A., Pärna R., Rammula R., Uustare T., Rosental A., Sammelselg V.* Atomic Layer Deposition of Cr₂O₃ thin films: Effect of crystallization on growth and properties // *Appl. Surf. Sci.* 2008. V. 254. N 16. P. 5149–5156.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.02.016>
- [257] *Ran G., Xia Y., Liang L., Fu C.* Enhanced response of sensor on serotonin using nickel-reduced graphene oxide by Atomic Layer Deposition // *Bioelectrochemistry.* 2021. V. 140. ID 107820.
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.107820>
- [258] *Du X., George S. M.* Thickness dependence of sensor response for CO gas sensing by tin oxide films grown using Atomic Layer Deposition // *Sens. Actuators B.* 2008. V. 135. N 1. P. 152–160.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.08.015>
- [259] *Рогов А.М., Павленко Т.С., Малыгин А.А.* Оптические кварцевые волокна с функциональными титаноксидными нанопокрывтиями // *Изв. СПбГТИ (ТУ).* 2010. № 8 (34). С. 40–43.
- [260] *Purniawan A., Pandraud G., Moh T.S. Y., Marthen A., Vakalopoulos K. A., French P. J., Sarro P. M.* Fabrication and optical measurements of a TiO₂-ALD evanescent waveguide sensor // *Sens. Actuators A.* 2012. V. 188. P. 127–132.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.05.037>
- [261] *Śmietana M., Grochowski J., Myśliwiec M., Wachnicki Ł., Godlewski M., Witkowski B. S.* Compact alcohol vapor sensor based on zinc oxide nano-coating deposited by Atomic Layer Deposition method on optical fiber end-face // *Procedia Eng.* 2012. V. 47. P. 1081–1084.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.338>
- [262] *Yebo N.A., Sree S.P., Levrau E., Detavernier C., Hens Z., Martens J.A., Baets R.* Selective and reversible ammonia gas detection with nanoporous film functionalized silicon photonic micro-ring resonator // *Opt. Express.* 2012. V. 20. N 11. P. 11855–11862.
<https://doi.org/10.1364/OE.20.011855>
- [263] *Viter R., Chaaya A.A., Iatsunskiy I., Nowaczyk G., Kovalevskis K., Ertz D., Miele P., Smyntyna V., Bechelany M.* Tuning of ZnO 1D nanostructures by Atomic Layer Deposition and electrospinning for optical gas sensor applications // *Nanotechnology.* 2015. V. 26. N 10. ID 105501.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/10/105501>
- [264] *Karatutlu A.* Atomic layer deposition of zirconium oxide thin film on an optical fiber for cladding light strippers // *Turk. J. Phys.* 2020. V. 44. N 1. P. 49–56.
<https://doi.org/10.3906/fiz-1908-6>
- [265] *Малыгин А.А., Антипов В.В., Кочеткова А.С., Буймистрюк Г.Я.* Синтез методом молекулярного наслаивания и функциональные свойства металлоксидных нанопокрывтий на поверхности кварцевых оптических волокон // *ЖПХ.* 2018. Т. 91. № 1. С. 17–27 [*Malygin A. A., Antipov V. V., Kochetkova A. S., Buimistryuk G. Y.* Synthesis by the Molecular Layering Method and functional properties of metal-oxide nanocoatings on the surface of quartz optical fibers // *Russ. J. Appl. Chem.* 2018. V. 91. N 1. P. 12–22.
<https://doi.org/10.1134/S1070427218010032>].
- [266] *Алесковский В.Б.* Химия надмолекулярных соединений. СПб: СПбГУ, 1996. 252 с.
- [267] *Li J., Liang X., King D. M., Jiang Y.-B., Weimer A. W.* Highly dispersed Pt nanoparticle catalyst prepared by Atomic Layer Deposition // *Appl. Catal. B.* 2010. V. 97. N 1–2. P. 220–226.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.04.003>
- [268] *Feng H., Lu J., Stair P. C., Elam J. W.* Alumina overcoating on Pd nanoparticle catalysts by Atomic Layer Deposition: Enhanced stability and reactivity // *Catal. Lett.* 2011. V. 141. N 4. P. 512–517.
<https://doi.org/10.1007/s10562-011-0548-8>
- [269] *Sun S., Zhang G., Gauquelin N., Chen N., Zhou J., Yang S., Chen W., Meng X., Geng D., Banis M. N., Li R.* Single-atom catalysis using Pt/graphene achieved through Atomic Layer Deposition // *Sci. Rep.* 2013. V. 3. N 1. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1038/srep01775>
- [270] *Lu J., Elam J. W., Stair P. C.* Synthesis and stabilization of supported metal catalysts by Atomic Layer Deposition // *Acc. Chem. Res.* 2013. V. 46. N 8. P. 1806–1815.
<https://doi.org/10.1021/ar300229c>
- [271] *Mackus A. J. M., Weber M. J., Thissen N. F. W., Garcia-Alonso D., Vervuurt R. H. J., Assali S., Bol A. A., Verheijen M. A., Kessels W. M. M.* Atomic Layer Deposition of Pd and Pt nanoparticles for catalysis: On the mechanisms of nanoparticle formation // *Nanotechnology.* 2015. V. 27. N 3. ID 034001.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/3/034001>
- [272] *Singh J.A., Yang N., Liu X., Tsai C., Stone K.H., Johnson B., Koh A.L., Bent S.F.* Understanding the active sites of CO hydrogenation on Pt–Co catalysts prepared using Atomic Layer Deposition // *J. Phys. Chem. C.* 2018. V. 122. N 4. P. 2184–2194.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10541>

- [273] Grillo F., Van Bui H., La Zara D., Aarnink A. A., Kovalgin A. Y., Kooyman P., Kreutzer M. T., van Ommen J. R. From single atoms to nanoparticles: Autocatalysis and metal aggregation in Atomic Layer Deposition of Pt on TiO₂ nanopowder // *Small*. 2018. V. 14. N 23. ID 1800765. <https://doi.org/10.1002/sml.201800765>
- [274] Khalily M. A., Yurderi M., Haider A., Bulut A., Patil B., Zahmakiran M., Uyar T. Atomic Layer Deposition of ruthenium nanoparticles on electrospun carbon nanofibers: A highly efficient nanocatalyst for the hydrolytic dehydrogenation of methylamine borane // *ACS Appl. Mater. & Interfaces*. 2018. V. 10. N 31. P. 26162–26169. <https://doi.org/10.1021/acsmi.8b04822>
- [275] Topuz F., Uyar T. Atomic Layer Deposition of palladium nanoparticles on a functional electrospun poly-cyclodextrin nanoweb as a flexible and reusable heterogeneous nanocatalyst for the reduction of nitroaromatic compounds // *Nanoscale Adv.* 2019. V. 1. N 10. P. 4082–4089. <https://doi.org/10.1039/C9NA00368A>
- [276] Pagán-Torres Y. J., Gallo J. M. R., Wang D., Pham H. N., Libera J. A., Marshall C. L., Elam J. W., Datye A. K., Dumesic J. A. Synthesis of highly ordered hydrothermally stable mesoporous niobia catalysts by Atomic Layer Deposition // *ACS Catal.* 2011. V. 1. N 10. P. 1234–1245. <https://doi.org/10.1021/cs200367t>
- [277] Peters A. W., Li Z., Farha O. K., Hupp J. T. Atomically precise growth of catalytically active cobalt sulfide on flat surfaces and within a metal-organic framework via Atomic Layer Deposition // *ACS Nano*. 2015. V. 9. N 8. P. 8484–8490. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b03429>
- [278] Kim J., Iivonen T., Hämäläinen J., Kemell M., Meinander K., Mizohata K., Beranek R., Leskelä M., Devi A. Low temperature Atomic Layer Deposition of cobalt oxide as an effective catalyst layer for photoelectrochemical water splitting devices // *Chem. Mater.* 2017. V. 29. N 14. P. 5796–5805. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b05346>
- [279] Chen R., Shan B., Liu X., Cao K. Catalysts via Atomic Layer Deposition // *Recent Advances in Nanoparticle Catalysis. Molecular Catalysis. V. 1* / Ed. by P. W. N. M. van Leeuwen, C. Claver. Springer, Cham., 2020. P. 69–105. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45823-2_3
- [280] Grillo F., Van Bui H., Moulijn J. A., Kreutzer M. T., Van Ommen J. R. Understanding and controlling the aggregative growth of platinum nanoparticles in Atomic Layer Deposition: An avenue to size selection // *J. Phys. Chem. Lett.* 2017. V. 8. N 5. P. 975–983. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.6b02978>
- [281] Grillo F., Moulijn J. A., Kreutzer M. T., van Ommen J. R. Nanoparticle sintering in Atomic Layer Deposition of supported catalysts: Kinetic modeling of the size distribution // *Catal. Today*. 2018. V. 316. P. 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.02.020>
- [282] Малков А. А., Соснов Е. А., Малыгин А. А. Температурный фактор в процессах химической сборки поверхностных элементоксидных структур // *Направленный синтез твердых веществ: Межвуз. сб. Вып. 3*. СПб: СПбУ, 1992. С. 10–29.
- [283] Puurunen R. L. Surface chemistry of atomic layer deposition: A case study for the trimethylaluminum / water process // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. N 12. ID 121301. <https://doi.org/10.1063/1.1940727>
- [284] Малков А. А., Соснов Е. А., Малыгин А. А. Влияние температуры на разных стадиях молекулярного наслаивания на фазообразование титаноксидного слоя на поверхности силикагеля // *ЖПХ*. 2010. Т. 83. № 9. С. 1409–1418 [Malkov A. A., Sosnov E. A., Malygin A. A. The effect exerted by temperature on the phase formation of titanium oxide layer on silica surface at different stages of molecular layering // *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83. N 9. P. 1511–1519. <https://doi.org/10.1134/S1070427210090016>].
- [285] Sosnov E. A., Belova S. A., Malygin A. A. AFM application for in situ study of the adsorptions processes // *ФТП*. 2007. Т. 41. № 5. С. 515–517 [Sosnov E. A., Belova S. A., Malygin A. A. AFM application for in situ study of adsorption processes // *Semiconductors*. 2007. V. 41. N 5. P. 495–497. <https://doi.org/10.1134/S1063782607050016>].
- [286] Белова С. А., Захарова Н. В., Соснов Е. А., Малыгин А. А. Цветовой индикатор на основе ванадийсодержащего силикагеля для экспресс контроля газовых сред // *Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: Сб. науч. тр. Минск: Белорус. наука, 2008. С. 304–321.*
- [287] Barry E., Mane A. U., Libera J. A., Elam J. W., Darling S. B. Advanced oil sorbents using sequential infiltration synthesis // *J. Mater. Chem. A*. 2017. V. 5. N 6. P. 2929–2935. <https://doi.org/10.1039/C6TA09014A>
- [288] Lee D. T., Jamir J. D., Peterson G. W., Parsons G. N. Water-stable chemical-protective textiles via euhedral surface-oriented 2D Cu–TCPP metal-organic frameworks // *Small*. 2019. V. 15. N 10. ID 1805133. <https://doi.org/10.1002/sml.201805133>
- [289] Iakovleva E., Sillanpää M., Khan S., Kamwilaisak K., Wang S., Tang W. Z. Synthesis of sorbents from industrial solid wastes by modification with Atomic Layer Deposition (ALD) for mine water treatment // *IMWA 2017. 13th Int. Mine Water Association Congress — Mine Water & Circular Economy: Proceedings*. Lappeenranta, Finland, 2017. V. 1. P. 43–54.

- [290] Zhao J., Gong B., Nunn W. T., Lemaire P. C., Stevens E. C., Sidi F. I., Williams P. S., Oldham C. J., Walls H. J., Shepherd S. D., Browe M. A. Conformal and highly adsorptive metal–organic framework thin films via layer-by-layer growth on ALD-coated fiber mats // *J. Mater. Chem. A*. 2015. V. 3. N 4. P. 1458–1464. <https://doi.org/10.1039/C4TA05501B>
- [291] Leick N., Strange N. A., Schneemann A., Stavila V., Gross K., Washton N., Settle A., Martinez M. B., Gennett T., Christensen S. T. Al₂O₃ Atomic Layer Deposition on nanostructured γ -Mg(BH₄)₂ for H₂ Storage // *ACS Appl. Energy Mater.* 2021. V. 4. N 2. P. 1150–1162. <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02314>
- [292] Пат. RU 2554819 C1 (опубл. 2015). Способ получения биоактивного покрытия на имплантируемом в костную ткань человека титановом имплантате.
- [293] Пат. RU 2566060 C1 (опубл. 2015). Биоактивное покрытие титанового имплантата, вводимого в костную ткань человека.
- [294] Земцова Е.Г., Морозов П.Е., Смирнов В.М. Регулирование рельефа поверхности наноструктурированного титана с помощью метода ML-ALD для создания биоактивных нанопокровов // *Mater. Phys. Mech.* 2015. V. 24. N 4. P. 374–381.
- [295] Liu L., Bhatia R., Webster T. J. Atomic Layer Deposition of nano-TiO₂ thin films with enhanced biocompatibility and antimicrobial activity for orthopedic implants // *Int. J. Nanomed.* 2017. V. 12. P. 8711–8723. <https://doi.org/10.2147/IJN.S148065>
- [296] Nazarov D. V., Smirnov V. M., Zemtsova E. G., Yudincheva N. M., Shevtsov M. A., Valiev R. Z. Enhanced osseointegrative properties of ultra-fine-grained titanium implants modified by Chemical Etching and Atomic Layer Deposition // *ACS Biomater. Sci. Eng.* 2018. V. 4. N 9. P. 3268–3281. <https://doi.org/10.1021/acsbmaterials.8b00342>
- [297] Avila I., Pantchev K., Holopainen J., Ritala M., Tuukkanen J. Adhesion and mechanical properties of nanocrystalline hydroxyapatite coating obtained by conversion of Atomic Layer-Deposited calcium carbonate on titanium substrate // *J. Mater. Sci.: Mater. Med.* 2018. V. 29. N 8. ID 111. <https://doi.org/10.1007/s10856-018-6121-x>
- [298] Мелешко А. А., Толстой В. П., Афиногенов Г. Е., Левшакова А. С., Афиногенова А. Г., Мульдияров В. П., Виссарионов С. В., Линник С. А. Перспективы применения наноматериалов на основе гидроксиапатита, созданных в условиях послойной химической сборки, в травматологии и ортопедии детского возраста // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2020. Т. 8. № 2. С. 217–230. <https://doi.org/10.17816/PTORS33824>
- [299] Frizzera F., Verzola M. H. A., de Molon R. S., de Oliveira G. J. P. L., Giro G., Spolidorio L. C., Pereira R. M. R., Tetradis S., Cirelli J. A., Orrico S. R. P. Evaluation of bone turnover after bisphosphonate withdrawal and its influence on implant osseointegration: An in vivo study in rats // *Clin. Oral Invest.* 2019. V. 23. N 4. P. 1733–1744. <https://doi.org/10.1007/s00784-018-2612-x>
- [300] Амашаев П. Р., Ашурбекова К. Н., Дустова Г. Д., Максумова А. М., Абдулагатов И. М. Приложения Атомно- и молекулярно-слоевого осаждения в медицине // *Актуальные вопросы эндокринологии: Материалы. V Республ. НПК. Махачкала. Махачкала: ДГМУ, 2018. С. 140–154.*
- [301] Абдулагатов А. И., Амашаев П. Р., Максумова А. М., Ашурбекова К. Н., Алиев А. А., Исаяева Р. Х., Рабаданов М. Х., Абдулагатов И. М. Синтезирование и антибактериальные свойства тонких модифицированных нанопленок TiO₂ // *Экологическая медицина*. 2019. Т. 2. № 1. С. 96–106. <https://doi.org/10.34662/EM.2019.2.1.96-106> [Abdulagatov A. I., Amashaev R. R., Maksumova A. M., Ashurbekova K. N., Aliev A. A., Isaeva R. K. H., Rabadanov M. K. H., Abdulagatov I. M. Synthesis and antibacterial properties of modified thin films of TiO₂ // *Ecological Medicine*. 2019. V. 2. N 1. P. 91–100. <https://doi.org/10.34662/2588-0489.2019.2.1.91-100>].
- [302] Ермаков С. С., Николаев К. Г., Толстой В. П. Новые электрохимические сенсоры с электродами на основе мультислоев, синтезированных методом послойной химической сборки, и их аналитические возможности // *Успехи химии*. 2016. Т. 85. № 8. С. 880–900 [Ermakov S. S., Nikolaev K. G., Tolstoy V. P. Novel electrochemical sensors with electrodes based on multilayers fabricated by layer-by-layer synthesis and their analytical potential // *Russ. Chem. Rev.* 2016. V. 85. N 8. P. 880–900. <https://doi.org/10.1070/RCR4605>].
- [303] Tereshchenko A., Bechelany M., Viter R., Khranovskyy V., Smyntyna V., Starodub N., Yakimova R. Optical biosensors based on ZnO nanostructures: Advantages and perspectives. A review // *Sens. Actuators B*. 2016. V. 229. P. 664–677. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.01.099>
- [304] Fahrenkopf N. M., Rice P. Z., Bergkvist M., Deskins N. A., Cady N. C. Immobilization mechanisms of deoxyribonucleic acid (DNA) to hafnium dioxide (HfO₂) surfaces for biosensing applications // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2012. V. 4. N 10. P. 5360–5368. <https://doi.org/10.1021/am3013032>
- [305] Im H., Bantz K. C., Lee S. H., Johnson T. W., Haynes C. L., Oh S. H. Self-assembled plasmonic nanoring cavity arrays for SERS and LSPR biosensing // *Adv. Mater.* 2013. V. 25. N 19. P. 2678–2685. <https://doi.org/10.1002/adma.201204283>
- [306] Archibald M. M., Rizal B., Connolly T., Burns M. J., Naughton M. J., Chiles T. C. A nanocoaxial-based

- electrochemical sensor for the detection of cholera toxin // *Biosens. Bioelectron.* 2015. V. 74. P. 406–410. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.06.069>
- [307] *Lepoitevin M., Bechelany M., Balanzat E., Janot J.M., Balme S.* Non-Fluorescence label protein sensing with track-etched nanopore decorated by avidin/biotin system // *Electrochim. Acta.* 2016. V. 211. P. 611–618. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.06.079>
- [308] *Lee W.I., Shrivastava S., Duy L.T., Kim B.Y., Son Y.M., Lee N.E.* A smartphone imaging-based label-free and dual-wavelength fluorescent biosensor with high sensitivity and accuracy // *Biosens. Bioelectron.* 2017. V. 94. P. 643–650. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.03.061>
- [309] *Lichtenstein A., Havivi E., Shacham R., Hahamy E., Leibovich R., Pevzner A., Krivitsky V., Davivi G., Presman I., Elnathan R., Engel Y., Flaxer E., Patolsky F.* Supersensitive fingerprinting of explosives by chemically modified nanosensors arrays // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. ID 4195. <https://doi.org/10.1038/ncomms5195>
- [310] *Tereshchenko A., Fedorenko V., Smyntyna V., Konup I., Konup A., Eriksson M., Yakimova R., Ramanavicius A., Balme S., Bechelany M.* ZnO films formed by Atomic Layer Deposition as an optical biosensor platform for the detection of Grapevine virus A-type proteins // *Biosens. Bioelectron.* 2017. V. 92. P. 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.09.071>
- [311] *Tipnis R., Vaddiraju S., Jain F., Burgess D.J., Papadimitrakopoulos F.* Layer-by-Layer assembled semipermeable membrane for amperometric glucose sensors // *J. Diabetes Sci. Technol.* 2007. V. 1. N 2. P. 193–200. <https://doi.org/10.1177/193229680700100209>
- [312] *Zhang X., Zhao J., Whitney A.V., Elam J.W., Van Duyne R.P.* Ultrastable substrates for surface-enhanced Raman spectroscopy: Al₂O₃ overlayers fabricated by Atomic Layer Deposition yield improved anthrax biomarker detection // *J. Am. Chem. Soc.* 2006. V. 128. N 31. P. 10304–10309. <https://doi.org/10.1021/ja0638760>
- [313] *Kim Y.W., Sardari S.E., Meyer M.T., Iliadis A.A., Wu H.C., Bentley W.E., Ghodssi R.* An ALD aluminum oxide passivated Surface Acoustic Wave sensor for early biofilm detection // *Sens. Actuators B.* 2012. V. 163. N 1. P. 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.01.021>
- [314] *Cabello-Aguilar S., Balme S., Abou-Chaaya A., Bechelany M., Balanzat E., Janot J.M., Pochat-Bohatier C., Miele P., Dejardin P.* Slow translocation of polynucleotides and their discrimination by α -hemolysin inside a single track-etched nanopore designed by Atomic Layer Deposition // *Nanoscale.* 2013. V. 5. N 20. P. 9582–9586. <https://doi.org/10.1039/C3NR03683A>
- [315] *Balme S., Picaud F., Manghi M., Palmeri J., Bechelany M., Cabello-Aguilar S., Abou-Chaaya A., Miele P., Balanzat E., Janot J.M.* Ionic transport through sub-10 nm diameter hydrophobic high-aspect ratio nanopores: Experiment, theory and simulation // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. N 1. ID 10135. <https://doi.org/10.1038/srep10135>
- [316] *Thangaraj V., Lepoitevin M., Smietana M., Balanzat E., Bechelany M., Janot J.M., Janot J.-M., Vasseur J.-J., Subramanian S., Balme S.* Detection of short ssDNA and dsDNA by current-voltage measurements using conical nanopores coated with Al₂O₃ by Atomic Layer Deposition // *Microchim. Acta.* 2016. V. 183. N 3. P. 1011–1017. <https://doi.org/10.1007/s00604-015-1706-2>
- [317] *Горбук П. П.* Магниточувствительные наноконпози́ты с функциями нанороботов для применений в медицине и биологии // *Поверхность.* 2015. № 7 (22). С. 297–310.
- [318] *Kääriäinen T.O., Kemell M., Vehkamäki M., Kääriäinen M.L., Correia A., Santos H.A., Bimbo L.M., Hirvonen J., Hoppu P., George S.M., Cameron D.C.* Surface modification of acetaminophen particles by Atomic Layer Deposition // *Int. J. Pharm.* 2017. V. 525. N 1. P. 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.04.031>
- [319] *Roeder J.F., Zeberoff A.F., Van Buskirk P.C., Torabi A., Barton J., Willman C., Ghezal-Ayagh H., Huang K.* Behavior of La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.2}O_{3- δ} cathode powders surface modified by Atomic Layer Deposition for solid oxide fuel cells // *ECS Trans.* 2016. V. 75. N 6. P. 195–202. <https://doi.org/10.1149/07506.0195ecst>
- [320] *Guan D., Ma L., Pan D., Li J., Gao X., Xie Y., Qiu M., Yuan C.* Atomic Layer Deposition of alumina coatings onto SnS₂ for Lithium-Ion battery applications // *Electrochim. Acta.* 2017. V. 242. P. 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.05.023>
- [321] *Roeder J.F., Golalikhani M., Zeberoff A.F., Van Buskirk P.C., Torabi A., Barton J., Willman C., Ghezal-Ayagh H., Wen Y., Huang K.* Group IVA oxide surface modification of LSCF cathode powders by Atomic Layer Deposition // *ECS Trans.* 2017. V. 78. N 1. P. 935–942. <https://doi.org/10.1149/07801.0935ecst>
- [322] *Meng X., Wang X., Geng D., Ozgit-Akgun C., Schneider N., Elam J.W.* Atomic Layer Deposition for nanomaterial synthesis and functionalization in energy technology // *Mater. Horiz.* 2017. V. 4. N 2. P. 133–154. <https://doi.org/10.1039/C6MH00521G>
- [323] *Liu Y., Sun Q., Zhao Y., Wang B., Kaghazchi P., Adair K.R., Li R., Zhang C., Liu J., Kuo L.-Y., Hu Y., Sham T.-K., Zhang L., Yang R., Lu S., Song X., Sun X.* Stabilizing the interface of NASICON solid electrolyte against Li metal with Atomic Layer

- Deposition // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018. V. 10. N 37. P. 31240–31248. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b06366>
- [324] *Cao Y., Meng X., Li A.* Atomic Layer Deposition of high-capacity anodes for next-generation lithium-ion batteries and beyond // *Energy Environ. Mater.* 2020. P. 1–29. <https://doi.org/10.1002/eem2.12132>
- [325] *Henderick L., Hamed H., Mattelaer F., Minjauw M., Nisula M., Meersschaut J., Dendooven J., Safari M., Vereecken P., Detavernier C.* Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition of a (nitrogen doped) Ti phosphate coating for improved energy storage in Li-Ion batteries // *J. Power Sources.* 2021. V. 497. ID 229866. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229866>
- [326] *Ou K. S., Lin I. K., Wu P. H., Huang Z. K., Chen K. S., Zhang X.* Mechanical characterization of Atomic Layer Deposited (ALD) alumina for applications in corrosive environments // *MRS Online Proc. Libr.* 2009. V. 1222. ID 214. <https://doi.org/10.1557/PROC-1222-DD02-14>
- [327] *Potts S. E., Schmalz L., Fenker M., Díaz B., Światowska J., Maurice V., Seyeux A., Marcus P., Radnóczy G., Tóth L., Kessels W. M. M.* Ultra-thin aluminium oxide films deposited by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition for corrosion protection // *J. Electrochem. Soc.* 2011. V. 158. N 5. P. C132–C138. <https://doi.org/10.1149/1.3560197>
- [328] *Laskar M. R., Jackson D. H. K., Guan Y., Xu S., Fang S., Dreibelbis M., Mahanthappa M. K., Morgan D., Hamers R. J., Kuech T. F.* Atomic layer deposition of Al₂O₃–Ga₂O₃ alloy coatings for Li[Ni_{0.5}Mn_{0.3}Co_{0.2}]O₂ cathode to improve rate performance in Li-Ion battery // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2016. V. 8. N 16. P. 10572–10580. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b11878>
- [329] *Yang Q., Yuan W., Liu X., Zheng Y., Cui Z., Yang X., Pan H., Wu S.* Atomic Layer Deposited ZrO₂ nanofilm on Mg-Sr alloy for enhanced corrosion resistance and biocompatibility // *Acta Biomater.* 2017. V. 58. P. 515–526. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.06.015>
- [330] *Liu X., Yang Q., Li Z., Yuan W., Zheng Y., Cui Z., Yang X., Yeung K. W. K., Wu S.* A combined coating strategy based on Atomic Layer Deposition for enhancement of corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 434. P. 1101–1111. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.032>
- [331] *Yang F., Chang R., Webster T. J.* Atomic Layer Deposition coating of TiO₂ nano-thin films on magnesium-zinc alloys to enhance cytocompatibility for bioresorbable vascular stents // *Int. J. Nanomed.* 2019. V. 14. P. 9955–9970. <https://doi.org/10.2147/IJN.S199093>
- [332] *Fusco M. A., Oldham C. J., Parsons G. N.* Investigation of the corrosion behavior of Atomic Layer Deposited Al₂O₃/TiO₂ nanolaminate thin films on copper in 0.1 M NaCl // *Materials.* 2019. V. 12. N 4. ID 672. <https://doi.org/10.3390/ma12040672>
- [333] *Duan C. L., Deng Z., Cao K., Yin H. F., Shan B., Chen R.* Surface passivation of Fe₃O₄ nanoparticles with Al₂O₃ via Atomic Layer Deposition in a rotating fluidized bed reactor // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2016. V. 34. N 4. ID 04C103. <https://doi.org/10.1116/1.4952401>
- [334] *Кочеткова А. С., Соснов Е. А., Малков А. А., Антипов В. В., Куликов Н. А., Малыгин А. А.* Влияние термовакuumной обработки и рентгеновского излучения на морфологию и электрофизические свойства титаноксидных нанопокровтий // *ЖПХ.* 2019. Т. 92. № 7. С. 827–836. <https://doi.org/10.1134/S0044461819070028> [*Kochetkova A. S., Sosnov E. A., Malkov A. A., Antipov V. V., Kulikov N. A., Malygin A. A.* Effect of a thermal-vacuum treatment and X-Ray radiation on the morphology and electrical properties of titanium oxide nanocoatings // *Russ. J. Appl. Chem.* 2019. V. 92. N 7. P. 883–892. <https://doi.org/10.1134/S1070427219070024>].
- [335] *Li C., Cauwe M., Yang Y., Schaubroeck D., Mader L., Op de Beeck M.* Ultra-long-term reliable encapsulation using an Atomic Layer Deposited HfO₂/Al₂O₃/HfO₂ triple-interlayer for biomedical implants // *Coatings.* 2019. V. 9. N 9. ID 579. <https://doi.org/10.3390/coatings9090579>
- [336] *Li Y., Xiong Y., Yang H., Cao K., Chen R.* Thin film encapsulation for the organic light-emitting diodes display via Atomic Layer Deposition // *J. Mater. Res.* 2020. V. 35. N 7. P. 681–700. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.331>
- [337] *Paussa L., Guzman L., Marin E., Isomaki N., Fedrizzi L.* Protection of silver surfaces against tarnishing by means of alumina/titania-nanolayers // *Surf. Coat. Technol.* 2011. V. 206. N 5. P. 976–980. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.03.101>
- [338] *Dafinone M. I., Feng G., Brugarolas T., Tettey K. E., Lee D.* Mechanical reinforcement of nanoparticle thin films using Atomic Layer Deposition // *ACS Nano.* 2011. V. 5. N 6. P. 5078–5087. <https://doi.org/10.1021/nn201167j>
- [339] *Цветкова М. Н., Малыгин А. А.* Прочность стеклянных микросфер с ультраотонкими элемент-оксидными покрытиями // *ЖПХ.* 1986. Т. 59. № 11. С. 2472–2475 [*Tsvetkova M. N., Malygin A. A.* Strengths of glass microspheres with ultrathin oxide coatings // *J. Appl. Chem. USSR.* 1986. V. 59. N 11. P. 2279–2281].
- [340] *Jõgiaas T., Zabels R., Tamm A., Merisalu M., Hussainova I., Heikkilä M., Maendar H., Kukli K., Ritala M., Leskelä M.* Mechanical properties of aluminum, zirconium, hafnium and tantalum oxides and their nanolaminates grown by Atomic Layer

- Deposition // Surf. Coat. Technol. 2015. V. 282. P. 36–42.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.10.008>
- [341] Doll G. L., Mensah B. A., Mohseni H., Scharf T. W. Chemical Vapor Deposition and Atomic Layer Deposition of coatings for mechanical applications // J. Therm. Spray Technol. 2010. V. 19. N 1–2. P. 510–516. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9364-8>
- [342] Wang Z., Zhao Q. Z. Friction reduction of steel by laser-induced periodic surface nanostructures with Atomic Layer Deposited TiO₂ coating // Surf. Coat. Technol. 2018. V. 344. P. 269–275.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.036>
- [343] Scharf T. W., Diercks D. R., Gorman B. P., Prasad S. V., Dugger M. T. Atomic Layer Deposition of tungsten disulphide solid lubricant nanocomposite coatings on rolling element bearings // Tribol. Trans. 2009. V. 52. N 3. P. 284–292.
<https://doi.org/10.1080/10402000802369747>
- [344] Kilbury O. J., Barrett K. S., Fu X., Yin J., Dinair D. S., Gump C. J., Weimer A. W., King D. M. Atomic Layer Deposition of solid lubricating coatings on particles // Powder Technol. 2012. V. 221. P. 26–35.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.12.021>
- [345] Tan L. K., Liu B., Teng J. H., Guo S., Low H. Y., Loh K. P. Atomic Layer Deposition of a MoS₂ film // Nanoscale. 2014. V. 6. N 18. P. 10584–10588.
<https://doi.org/10.1039/C4NR02451F>
- [346] Sun Y., Chai Z., Lu X., Lu J. Tribological performance of a tungsten disulfide lubricant film prepared by Atomic Layer Deposition using tungsten hexacarbonyl and hydrogen sulfide as precursors // Tribol. Int. 2017. V. 114. P. 478–484.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.047>
- [347] Guay J. M., Killaire G., Gordon P. G., Barry S. T., Berini P., Weck A. Passivation of plasmonic colors on bulk silver by Atomic Layer Deposition of aluminum oxide // Langmuir. 2018. V. 34. N 17. P. 4998–5010.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00210>
- [348] Lee K., Kim H., Kim J. H., Choi D. Structural color and near-infrared tunability of ruthenium-coated anodic aluminum oxide by Atomic Layer Deposition // Scr. Mater. 2020. V. 187. P. 125–129.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.06.007>
- [349] Khan M. R., Kim H. G., Park J. S., Shin J. W., Nguyen C. T., Lee H. B. R. Tunable color coating of e-textiles by Atomic Layer Deposition of multilayer TiO₂/Al₂O₃ films // Langmuir. 2020. V. 36. N 11. P. 2794–2801.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03988>
- [350] Малков А. А., Малыгин А. А., Трифонов С. А., Егорова И. В., Вихман С. В., Брусиловский Г. Л., Силин В. А., Куликов Н. А. Влияние хромоксидных нанодобавок на термические превращения керамической массы // Изв. СПбГТИ (ТУ). 2009. № 6 (32). С. 33–38.
- [351] Анисимов К. С., Малков А. А., Малыгин А. А. Механизм термоокисления карбида кремния, модифицированного хромоксидными структурами // ЖОХ. 2014. Т. 84. № 12. С. 1954–1961 [Anisimov K. S., Malkov A. A., Malygin A. A. Mechanism of thermal oxidation of silicon carbide modified by chromium oxide structures // Russ. J. Gen. Chem. 2014. V. 84. N 12. P. 2375–2381.
<https://doi.org/10.1134/S1070363214120032>].
- [352] Lichty P., Wirz M., Kreider P., Kilbury O., Dinair D., King D., Steinfeld A., Weimer A. W. Surface modification of graphite particles coated by Atomic Layer Deposition and advances in ceramic composites // Int. J. Appl. Ceram. Technol. 2013. V. 10. N 2. P. 257–265.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2012.02750.x>
- [353] O'Toole R. J., Buur P. J., Gump C. J., Musgrave C. B., Weimer A. W. Solid-state sintering of core-shell ceramic powders fabricated by Particle Atomic Layer Deposition // J. Am. Ceram. Soc. 2020. V. 103. N 8. P. 4101–4109. <https://doi.org/10.1111/jace.17079>
- [354] Земцова Е. Г., Монин А. В., Смирнов В. М., Семенов Б. Н., Морозов Н. Ф. Создание керамических композиционных материалов на основе процессов трехмерного наноструктурирования (армирования) алюмоокислородного каркаса наноструктурами (TiN, SiC) и исследование их механических свойств // Физ. мезомеханика. 2016. Т. 19. № 3. С. 58–68.
- [355] Кочеткова А. С., Ефимов Н. Ю., Соснов Е. А., Малыгин А. А. Влияние химического модифицирования поверхности наполнителя на структуру и проницаемость композитной пленки на основе поливинилхлорида // ЖПХ. 2015. Т. 88. № 1. С. 116–124 [Kochetkova A. S., Efimov N. Yu., Sosnov E. A., Malygin A. A. Effect of the chemical modification of the filler surface on the structure and permeability of a composite film based on polyvinyl chloride // Russ. J. Appl. Chem. 2015. V. 88. N 1. P. 110–117.
<https://doi.org/10.1134/S1070427215010164>].
- [356] Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. М.: Мир, 1988. 245 с. [Grassie N., Scott G. Polymer degradation and stabilisation. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 222 p.].
- [357] Alongi J., Carosio F., Malucelli G. Current emerging techniques to impart flame retardancy to fabrics: An overview // Polym. Degrad. Stab. 2014. V. 106. P. 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.07.012>
- [358] Трифонов С. А., Соснов Е. А., Малыгин А. А. Структура поверхности и термоокислительная деструкция продуктов взаимодействия полиэтилена с парами PCl₃ и VOCl₃ // ЖПХ. 2004. Т. 77. № 11. С. 1872–1876 [Trifonov S. A., Sosnov E. A., Malygin A. A. Surface structure and thermal oxidative

- degradation of the reaction products of polyethylene with PCl_3 and VOCl_3 vapors // *Russ. J. Appl. Chem.* 2004. V. 77. N 11. P. 1854–1858.
<https://doi.org/10.1007/s11167-005-0175-5>].
- [359] *Huang G., Liang H., Wang X., Gao J.* Poly (acrylic acid)/clay thin films assembled by layer-by-layer deposition for improving the flame retardancy properties of cotton // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2012. V. 51. N 38. P. 12299–12309.
<https://doi.org/10.1021/ie300820k>
- [360] *Apaydin K., Laachachi A., Ball V., Jimenez M., Bourbigot S., Toniazzo V., Ruch D.* Polyallylamine–montmorillonite as super flame retardant coating assemblies by layer-by layer deposition on polyamide // *Polym. Degrad. Stab.* 2013. V. 98. N 2. P. 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.11.006>
- [361] *Wang D., Song L., Zhou K., Yu X., Hu Y., Wang J.* Anomalous nano-barrier effects of ultrathin molybdenum disulfide nanosheets for improving the flame retardance of polymer nanocomposites // *J. Mater. Chem. A.* 2015. V. 3. N 27. P. 14307–14317.
<https://doi.org/10.1039/C5TA01720C>
- [362] *Qiu X., Li Z., Li X., Zhang Z.* Flame retardant coatings prepared using layer by layer assembly: A review // *Chem. Eng. J.* 2018. V. 334. P. 108–122.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.194>
- [363] *Дьякова А. К., Трифонов С. А., Соснов Е. А., Малыгин А. А.* Влияние химического модифицирования на структурно-энергетические характеристики поверхности пленок полиэтилена и поливинилхлорида // *ЖПХ.* 2009. Т. 82. № 4. С. 628–634 [*D'yakova A. K., Trifonov S. A., Sosnov E. A., Malygin A. A.* Effect of chemical modification on structural and energy characteristics of the surface of polyethylene and polyvinyl chloride films // *Russ. J. Appl. Chem.* 2009. V. 82. N 4. P. 622–629.
<https://doi.org/10.1134/S107042720904017X>].
- [364] *Feng J., Xiong S., Wang Z., Cui Z., Sun S. P., Wang Y.* Atomic Layer Deposition of metal oxides on carbon nanotube fabrics for robust, hydrophilic ultrafiltration membranes // *J. Membr. Sci.* 2018. V. 550. P. 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.01.003>
- [365] *Huang A., Kan C.-C., Lo S.-C., Chen L.-H., Su D.-Y., Soesanto J.F., Hsu C.-C., Tsai F.-Y., Tung K.-L.* Nanoarchitected design of porous ZnO @copper membranes enabled by atomic-layer-deposition for oil/water separation // *J. Membr. Sci.* 2019. V. 582. P. 120–131.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.093>
- [366] *Singh A. K., Chou W.-F., Jia X., Wang C.-Y., Fuentes-Hernandez C., Kippelen B., Graham S.* Impact of interface materials on side permeation in indirect encapsulation of organic electronics // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2020. V. 38. N 3. ID 033203.
<https://doi.org/10.1116/1.5140665>
- [367] *Трифонов С. А., Соснов Е. А., Белова Ю. С., Малыгин А. А., Разинкова Н. Г., Савкин Г. Г.* Влияние химического модифицирования поверхности полиэтилена галогенидами фосфора, бора, титана, ванадия и кремния на его паропроницаемость // *ЖПХ.* 2007. Т. 80. № 8. С. 1374–1379 [*Trifonov S. A., Sosnov E. A., Belova Yu. S., Malygin A. A., Razinkova N. G., Savkin G. G.* Influence of chemical modification of the surface of polyethylene with phosphorus, boron, titanium, vanadium, and silicon halides on its vapor permeability // *Russ. J. Appl. Chem.* 2007. V. 80. N 8. P. 1413–1418.
<https://doi.org/10.1134/S1070427207080307>].
- [368] *Hirvikorpi T., Vähä-Nissi M., Mustonen T., Iiskola E., Karppinen M.* Atomic Layer Deposited aluminum oxide barrier coatings for packaging materials // *Thin Solid Films.* 2010. V. 518. N 10. P. 2654–2658.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.08.025>
- [369] *Jarvis K. L., Evans P. J., Triani G.* Influence of the polymeric substrate on the water permeation of alumina barrier films deposited by Atomic Layer Deposition // *Surf. Coat. Technol.* 2018. V. 337. P. 44–52.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.12.056>
- [370] *Su D. Y., Hsu C. C., Lai W. H., Tsai F. Y.* Fabrication, mechanisms, and properties of high-performance flexible transparent conductive gas-barrier films based on Ag nanowires and Atomic Layer Deposition // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2019. V. 11. N 37. P. 34212–34221.
<https://doi.org/10.1021/acsami.9b09772>
- [371] *Op de Beeck M., Verplancke R., Schaubroeck D., Li C., Cuypers D., Cauwe M., Vandecasteele B., Mader L., Vanhaverbeke C., O'Callaghan J. Braeken D., Andrei A., Firrincieli A., Ballini M., Kundu A., Fahmy A., Patrick E., Maghari N., Bashirullah R., De Baets J.* FITEP: A Flexible Implantable Thin Electronic Package platform for long term implantation applications, based on polymer and ceramic ALD multilayers // *Adv. Packaging for Medical Microelectronics, 2019 Adv. Technology Workshop, Abstr., Jan. 22–23, 2019. San Diego, California.*
<https://doi.org/hdl.handle.net/1854/LU-8628164>
- [372] *Рычков А. А., Трифонов С. А., Кузнецов А. Е., Соснов Е. А., Рычков Д. А., Малыгин А. А.* Влияние химического модифицирования поверхности полиэтилена высокого давления на его электретные свойства // *ЖПХ.* 2007. Т. 80. № 3. С. 463–467 [*Rychkov A. A., Trifonov S. A., Kuznetsov A. E., Sosnov E. A., Rychkov D. A., Malygin A. A.* Influence of chemical modification of the surface of low-density polyethylene on its electret properties // *Russ. J. Appl. Chem.* 2007. V. 80. N 3. P. 461–465.
<https://doi.org/10.1134/S1070427207030214>].

- [373] Пат. RU 2477540 С2 (опубл. 2013). Способ изготовления пленочного электрета.
- [374] *Радюк Е. А., Соснов Е. А., Малыгин А. А., Рычков А. А., Кузнецов А. Е.* Свойства пленок политетрафторэтилена, модифицированных титан- и фосфороксидными структурами // ЖПХ. 2019. Т. 92. № 8. С. 1036–1942.
<https://doi.org/1134/S0044461819080115>
[*Radyuk E. A., Sosnov E. A., Malygin A. A., Rychkov A. A., Kuznetsov A. E.* Properties of polytetrafluoroethylene films modified with titanium and phosphorus oxide structures // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. N 8. P. 1128–1134.
<https://doi.org/10.1134/S1070427219080111>].
- [375] *Ципанова А. С., Соснов Е. А., Кузнецов А. Е., Рычков А. А., Малыгин А. А.* Влияние состава и строения элементоксидных наноструктур, привитых к поверхности пленки полиэтилена, на электретные характеристики композиции // ЖОХ. 2021. Т. 91. № 6. С. 966–976.
<https://doi.org/10.31857/S0044460X21060147>
[*Tsipanova A. S., Sosnov E. A., Kuznetsov A. E., Rychkov A. A., Malygin A. A.* Effect of composition and structure of element oxide nanostructures grafted at polyethylene film surface on electret characteristics of the polymer // Russ. J. Gen. Chem. 2021. V. 91. N 6. P. 1073–1081.
<https://doi.org/10.1134/S1070363221060141>].
-