

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

Д. А. Полонянкин

**ПРИМЕНЕНИЕ
НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ
В ПРОИЗВОДСТВЕ**

Учебное текстовое электронное издание
локального распространения

*Рекомендовано редакционно-издательским советом
Омского государственного технического университета*

Омск
Издательство ОмГТУ
2023

УДК 620.3(075)
ББК 30.600.3я73
П52

Рецензенты:

С. В. Корнеев, д.т.н., профессор, профессор кафедры
«Автоматизация и энергетическое машиностроение» СибАДИ;

С. Н. Несов, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией
физики наноматериалов для химических источников тока ОНЦ СО РАН

Полонянкин, Д. А. Применение нанотехнологий и наноматериалов в производстве : учеб. пособие / Д. А. Полонянкин ; Минобрнауки России, Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2023. – 1 CD-ROM (3,00 Мб). – Систем. требования: процессор с частотой 800 МГц и выше ; 128 Мб RAM и более ; свободное место на жестком диске 300 Мб и более ; Linux / Windows XP и выше ; MacOS X 10.4 и выше ; CD/DVD-ROM-дисковод ; ПО для просмотра pdf- и mp4-файлов. – Загл. с титул. экрана. – ISBN 978-5-8149-3715-5.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования. Рассмотрена история становления и развития, а также классификация нанотехнологий и наноматериалов по различным признакам и основаниям. Изложены основные направления применения нанотехнологий и наноматериалов в производстве.

Предназначено для обучающихся по направлению «Наноинженерия» (28.03.02, 28.04.02).

Редактор *О. В. Маер*

Компьютерная верстка *Е. В. Макаревиной*

*Для дизайна этикетки использованы материалы
из открытых интернет-источников*

Сводный темплан 2023 г.
Подписано к использованию 08.11.23.
Объем 3,00 Мб.

© ОмГТУ, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ НАНОНАУКИ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ.....	7
2. ОТ НАУКИ О ПОВЕРХНОСТИ К НАНОНАУКЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ.....	25
3. НАНОНАУКА И НАНОМАТЕРИАЛЫ. ТЕРМИНОЛОГИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ.....	43
4. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОПРОИЗВОДСТВО. ТЕРМИНОЛОГИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ.....	65
5. ЦИФРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОПЕЧАТЬ	87
6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА ДВУМЕРНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	99
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-3–2014 на русском языке, их эквиваленты на английском языке	107
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-4–2016 на русском языке, их эквиваленты на английском языке	109
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-5–2014 и ГОСТ ISO/TS 80004-6–2014 на русском языке, их эквиваленты на английском языке	112

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-11–2014 на русском языке, их эквиваленты на английском языке	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 3) на русском языке и их эквиваленты на английском языке	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 6.1) на русском языке и их эквиваленты на английском языке	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 6.2) на русском языке и их эквиваленты на английском языке	122
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 6.3) на русском языке и их эквиваленты на английском языке	124
ПРИЛОЖЕНИЕ К. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 6.5) на русском языке и их эквиваленты на английском языке	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Л. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 6.6) на русском языке и их эквиваленты на английском языке	129
ПРИЛОЖЕНИЕ М. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 7.1) на русском языке и их эквиваленты на английском языке	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Н. Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 7.2) на русском языке и их эквиваленты на английском языке	136

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота;
- МЛЭ – молекулярно-лучевая эпитаксия;
- МНТ – молекулярные нанотехнологии;
- НМ – наноматериал;
- НО – нанообъект;
- НОАА – нанообъекты, их агрегаты и агломераты;
- НП – нанопроизводство;
- НПП – нанолитография погружным пером;
- НС – наносистема;
- НТ – нанотехнология;
- НТП – нанотехнологическое производство;
- НЧ – наночастица;
- ОФИП – осаждение фокусированным ионным пучком;
- ОФЭП – осаждение фокусированным электронным пучком;
- СЗМ – сканирующий зондовый микроскоп;
- СИ – система единиц;
- СТМ – сканирующий туннельный микроскоп;
- УНТ – углеродные нанотрубки;
- ФОГФ – физическое осаждение из газовой фазы;
- ХОГФ – химическое осаждение из газовой фазы;
- ЭМВР – электронная микроскопия высокого разрешения.

ВВЕДЕНИЕ

За период, прошедший с начала XX века до настоящих дней, как в науке в целом, так и в нанонауке в частности, достигнут огромный прогресс. Совершенные за это время фундаментальные изобретения и открытия в области физики и химии, инженерии и биологии, а также материаловедения выступают в качестве *научно-практических основ применения современных нанотехнологий в производстве.*

В учебном пособии рассматривается современный период истории нанотехнологий, включающий, но не ограничивающийся созданием иммерсионного ультрамикроскопа и установлением закономерностей адсорбции, открытием транзисторного эффекта и новых форм углеродных наноматериалов (фуллеренов, углеродных нанотрубок, графена), разработкой лазеров и полупроводниковых материалов на основе гетероструктур, изобретением интегральной микросхемы, а также методов сканирующей туннельной, атомно-силовой и электронной микроскопии.

Научно-технологический прогресс сопровождается перманентным совершенствованием традиционных и разработкой новых, нетрадиционных высокопрецизионных технологий. Повышение технических требований к точности, надежности и функциональности изделий обуславливает их миниатюризацию, *переход от производства на макро- и микроуровне к нанофабрикации.* Современные нанотехнологии являются горизонтально ориентированной *конвергентной технологией*, охватывающей все, в том числе вертикально-интегрированные отрасли промышленности – от аэрокосмической и энергетической отрасли до биомедицины и фармацевтики. Применяемые в производстве нанотехнологии варьируются в широком диапазоне – от молекулярно-лучевой эпитаксии и гетерогенного катализа до нанолитографии, направленной самосборки и экфолиации. Даже стандарты национального и международного уровня не охватывают полностью весь спектр технологий современного нанопроизводства.

В пособии рассматривается классификация наноматериалов, а также процессы нанотехнологического производства в соответствии с группой стандартов ГОСТ ISO/TS 80004.

1. ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ НАНОНАУКИ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В научной литературе обнаруживаются многочисленные примеры эмпирического использования человеком **наноматериалов и нанотехнологий** в различные исторические эпохи. Одним из самых ранних свидетельств такого рода является отбеливание шерстяных изделий с применением нанопористой глины в пятом тысячелетии до н. э. на Кипре. Металлические наночастицы использовались в ходе производства изделий из цветного стекла в Египте в четырнадцатом веке до н. э., а также в Римской империи (датируемый четвертым веком н. э. кубок Ликурга). Углеродные нанотрубки и цементитные нанопроволоки обнаружены в микроструктуре стали, изготовленной в VI веке до н. э. в Древней Индии (сталь «Вутца», также известная как серная сталь). Однако вплоть до XX века ученые не обладали технической возможностью систематического экспериментального исследования и проектирования наноразмерных объектов, что принципиально ограничивало возможности их использования в промышленном производстве. От древних времен перейдем к рассмотрению современной истории нанотехнологий XX и начала XXI века.

Рихард Зигмонди. Важно отметить, что впервые термин «**нанометр**» был использован непосредственно для описания характерных размеров коллоидных частиц в 1914 г. Рихардом Зигмонди, выдающимся ученым в области коллоидной химии (Гёттингенский университет, Германия), изобретателем щелевого темнопольного ультрамикроскопа (в 1902 г. совместно с Генри Зидентопфом). В 1925 г. Зигмонди стал лауреатом Нобелевской премии по химии «за доказательство гетерогенной природы коллоидных растворов и за использование методов, которые заложили основы современной коллоидной химии». Более того, по мнению ряда авторов [1], изобретение Рихардом Зигмонди в 1912 г. иммерсионного ультрамикроскопа, обеспечившего возможность идентификации размеров коллоидных наночастиц, фактически ознаменовало начало эры современных нанотехнологий.

Ирвинг Ленгмюр. Значительный вклад в становление нанотехнологии как науки внес Ирвинг Ленгмюр, входящий в плеяду выдающихся физиков и химиков первой половины XX века.

В 1903 г. Ленгмюр окончил Горный институт Колумбийского университета (США) и получил диплом инженера-металлурга, а затем продолжил обучение в Гёттингенском университете (Германия) под руководством Вальтера Нернста, обладателя Нобелевской премии 1920 г. за работы в области термохимии. Получив в 1906 г. докторскую степень за исследование взаимодействия инертных газов с изготовленными из благородных металлов проводниками, Ленгмюр вернулся в США и вскоре стал научным сотрудником, а в 1932 г. и руководителем научно-исследовательской лаборатории в компании «Дженерал электрик», в которой работал на протяжении 37 лет.

Перечень многочисленных изобретений Ленгмюра включает, но не ограничивается следующими разработками:

- высоковакуумная электронная трубка (которая позже широко использовалась в электронной промышленности – радиосвязи, теле- и радиовещании);

- лампа накаливания в ее современном виде (вольфрамовая нить в форме спирали в среде азота или аргона);

- ртутный высоковакуумный насос;

- открытие диссоциации молекулярного водорода и применение атомарного водорода для дуговой автоматической плазменной сварки металлов (атомно-водородная сварка, горелка Ленгмюра). Необходимо отметить, что Ленгмюр изобрел термин «плазма» и предложил его использование для обозначения области пространства, обладающей уникальными электрическими и магнитными свойствами и содержащей приблизительно одинаковое количество ионов и электронов (ионизированный газ, особое агрегатное состояние вещества);

- электрод для измерения температуры и плотности плазмы (термоионный зонд Ленгмюра), ввел понятия ионной плотности и электронной температуры.

Вместе с тем научному сообществу Ирвинг Ленгмюр в большей степени известен благодаря своим фундаментальным работам в области химии поверхности и границ раздела твердых, жидких и газообразных сред. Так, в период с 1916 по 1928 г. Ленгмюр разработал теорию адсорбции молекул газа на поверхности твердых тел и жидкостей в виде монослоя (слой адсорбированных частиц толщиной в один атом или молекулу), которая в своем первоначальном виде до сих пор является одной из основ современной физики и химии поверхности.

Изучение закономерностей адсорбции молекул газа с учетом совокупного действия как физических, так и химических сил привело ученого к разработке способа оценки размеров, формы и ориентации молекул на границе раздела фаз, а также к выводу уравнения изотермы адсорбции, известного в настоящее время как уравнение Ленгмюра.

В 1932 г. Ирвинг Ленгмюр стал первым неакадемическим ученым-производителем, удостоенным Нобелевской премии «за открытия и исследования в области химии поверхностных явлений».

В 1930-е гг. в ходе сотрудничества со своей ученицей Кэтрин Блуджетт ученый разработал метод нанесения моно- и мультимолекулярных слоев на поверхности твердого тела (пленки Ленгмюра – Блуджетт) посредством последовательного переноса мономолекулярных пленок (в том числе органического происхождения, например амфифильных) с поверхности жидкостей или в ходе адсорбции из газовой фазы. Прошло более сорока лет после проделанной Ленгмюром и Блуджетт новаторской работы, прежде чем мировое научное сообщество оценило практическую значимость данного уникального подхода к формированию наноразмерных ультратонких пленок с требуемыми свойствами и архитектурой, а также потенциальные возможности применения самосборки молекулярных монослоев в промышленном производстве молекулярно-электронных и биоэлектронных устройств.

Во время мировых войн Ирвинг Ленгмюр принимал участие в создании устройств обнаружения подводных лодок (что обеспечило возможность значительного повышения качества музыкальной записи в послево-

енные годы); занимался разработкой генераторов дымовых завес, использовавшихся для защиты от воздушных налетов; внес вклад во внедрение систем, предотвращающих обледенение обшивки самолётов. Изучение Ленгмюром гидрометеорологических явлений в 1950 г. воплотилось в решении проблемы регулирования количества атмосферных осадков (повышение облачности и вероятности выпадения дождя и, напротив, рассеивания дождевых облаков).

Николай Басов, Александр Прохоров, Чарльз Таунс. В 1916 г. Альбертом Эйнштейном было предсказано явление вынужденного (индуцированного) излучения возбужденных атомов в условиях внешних воздействий. Вынужденное излучение является краеугольным понятием квантовой электроники и лежит в основе функционирования «лазеров» – устройств, генерирующих электромагнитное излучение с пространственно-временной когерентностью. Термин «лазер» представляет собой анаграмму, образованный от английского *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER*, и переводится на русский язык как «усиление света посредством вынужденного излучения».

В середине 1950-х гг. достоянием научной общественности стало изобретение Николаем Басовым, Александром Прохоровым и Чарльзом Таунсом квантовых генераторов радио-, а затем и оптического диапазона волн электромагнитного спектра. В 1960 г. Теодором Майманом впервые был сконструирован твердотельный лазер на искусственном рубине (оксид алюминия Al_2O_3) с примесью хрома.

В 1964 г. Таунсу, Басову и Прохорову была присуждена Нобелевская премия по физике «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей, основанных на принципе мазера–лазера», чем обеспечили беспрецедентные возможности становления и развития нанонауки и нанотехнологий.

Преимуществами лазерных нанотехнологий (синтез наноматериалов методом лазерной абляции, термообработка твердотельных полупроводниковых наноструктур, нанотекстурирование методом лазерной интерференционной литографии и т. д.) являются сравнительно низкая себестои-

мость, высокая производительность, возможность использования лазерного излучения как в вакууме, так и в различных средах. К важным особенностям применения лазерной наноинженерии в производстве также относятся воспроизводимость функциональных и эксплуатационных характеристик изделий, прототипов и устройств. В настоящее время к перспективным направлениям развития лазерных нанотехнологий относятся атомная инженерия (локализация атомов посредством лазерного охлаждения, атомная литография), гетеролазеры на основе наноструктур с квантовыми точками и т. д.

Джек Килби, Жорес Алфёров, Герберт Крёмер. Историю становления и развития нанонауки сложно представить без открытия транзисторного эффекта, изобретения интегральной (микро)схемы и разработки электронных устройств на твердотельных полупроводниковых гетероструктурах, благодаря их повсеместному и непосредственному использованию в современных (нано)технологиях.

Изобретения в 1947 г. сотрудниками Bell Telephone Laboratories Уильямом Шокли, Джоном Бардиным и Уолтером Браттейном первого транзистора (точечный контактный триод), а также в 1958 г. Джеком Килби из Texas Instruments интегральной микросхемы стали эпохальными событиями в сфере кремниевой полупроводниковой электроники. Уже в 1956 г. Шокли, Бардину и Браттейну была вручена Нобелевская премия по физике «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта».

Достигнутый в последующие годы прогресс в миниатюризации электронных приборов и устройств обусловлен технологическим переходом от электронно-вакуумных к полупроводниковым компонентам, интегрированным в единую электрическую схему («чип»).

Изобретение микрочипа и дальнейшее совершенствование интегральных микросхем обеспечили всестороннюю трансформацию в электронике: снижение себестоимости производства, оптимизация процесса сборки, перманентная миниатюризация изделий, повышение их эксплуатационных характеристик (надежности и долговечности).

Развитие твердотельной электроники происходит в том числе благодаря разработке новых полупроводниковых материалов (классические и квантоворазмерные гетероструктуры) и технологических процессов (газофазная эпитаксия из паров металлоорганических соединений и молекулярно-лучевая эпитаксия), которые становятся основой нанопроизводства быстродействующей электроники, оптоэлектроники, фотоники.

Нобелевская премия по физике 2000 года присуждена с общей формулировкой «за фундаментальные работы в области информационно-коммуникационных технологий»: Жоресу Алфёрову, Герберту Крёмеру («за разработку полупроводниковых гетероструктур для высокоскоростной и оптоэлектроники») и Джеку Килби («за вклад в изобретение интегральной микросхемы»).

Ричард Фейнман. Большинство ученых отождествляет начало **эры нанотехнологий** с выступлением Ричарда Фейнмана на ежегодном заседании Американского физического общества (American Physical Society, APS) 29 декабря 1959 года в Калифорнийском технологическом институте с лекцией «Внизу еще много места: Приглашение в новый мир физики» (There's plenty of room at the bottom: An invitation to enter a new field of physics).

Опубликованная в февральском номере журнала Engineering and Science за 1960 г. статья [2] фактически представляет собой стенограмму вышеназванной лекции и является знаковой для современной нанонауки и нанотехнологий, несмотря на отсутствие в ней соответствующей терминологии (понятие «**нанотехнологии**» впервые будет вербализировано Норрио Танигути только в 1974 г.). Таким образом, в конце 1959 г. Фейнман сформулировал ряд концептуальных предположений (в том числе идею о возможности манипуляции отдельными атомами и молекулами, контроля их состояния и свойств), предвосхитив становление и развитие широкого спектра научных областей, а также предугадав многие направления технического прогресса, технологические способы и средства современного нанопроизводства.

Важно отметить, что большинство идей, озвученных Ричардом Фейнманом в 1959 г., обладали настолько революционным характером, что оказались практически невостребованными в науке вплоть до начала 90-х гг. XX в. Так, за первые два десятилетия, прошедшие с момента публикации лекции «Внизу еще много места...», она была процитирована всего лишь семь раз, из которых тематика только одной работы была опосредованно связана с нанотехнологиями!

Разработка в 80-х и 90-х годах прошлого века новых экспериментальных методов (сканирующего туннельного микроскопа, атомно-силового микроскопа, нанолитографии) визуализации и управления атомами с беспрецедентной точностью обусловила интенсивное развитие нанонауки и нанотехнологий и, как следствие, способствовала значительному росту внимания научного сообщества к истории их возникновения. Для сравнения, общее количество публикаций, сославшихся на рассматриваемую лекцию Фейнмана за аналогичный период XXI в. (с 2003 по 2023 г.), превышает 5 300 работ, среди которых статьи по ионно- и электронно-лучевому производству, молекулярно-лучевой эпитаксии, наноимпринтингу, проекционной электронной микроскопии, самосборке молекул и атомов, электронике на квантовых эффектах, спинтронике и наномеханическим системам и т. д.

В научном сообществе Фейнман широко известен благодаря своим новаторским трудам по теории квантовой механики и электродинамики, работам в области физики сверхтекучести жидкого гелия, а также физики элементарных частиц.

Помимо прочего, Фейнман предложил способ интегрирования по траекториям в квантовой механике (интегралы Фейнмана), а также разработал схему графического представления математических выражений (диаграммы Фейнмана), в упрощенном виде наглядно описывающих поведение элементарных частиц в квантовой теории поля (например, графическая интерпретация аннигиляции электрона и позитрона).

В 1965 г. Ричард Фейнман стал лауреатом Нобелевской премии по физике (совместно с Син-Итиро Томонагой и Юлианом Швингером)

«за фундаментальные работы в области квантовой электродинамики, обеспечившие значительное развитие физики элементарных частиц».

Стоит отметить, что в 1993 г. институтом Форсайта (основатель Эрик Дрекслер) учреждена премия Фейнмана, которая присуждается за новаторские работы теоретического и экспериментального характера в области нанотехнологий.

Норио Танигути. Как было упомянуто выше, термин «нанотехнология» впервые сформулировал японский ученый Норио Танигути в 1974 г. [3] применительно к высокопрецизионной финишной обработке и контролю качества поверхностей материалов с использованием электрических разрядов, микроволнового или лазерного излучения. Нанотехнологии (nanotechnology) по Танигути – это процесс формирования (разделения, объединения и деформирования) полупроводниковых структур с атомарным разрешением посредством применения сфокусированных ионных или электронных пучков, осаждения тонких пленок с точностью порядка одного нанометра [4].

Герберт Глейтер. Важно отметить, что термин «нанокристаллические материалы» введен в общенаучную лексику в 1981 г. Гербертом Глейтером [5], а использование научного понятия «наноструктурированные материалы» впервые предложено Робертом Кохом в 1990 г. [6]. Наноструктурированные материалы по Глейтеру – это твердые тела, состоящие из структурных элементов (в основном кристаллитов или нанокристаллитов) с характерным размером (по крайней мере, в одном измерении) в несколько нанометров.

Эрик Дрекслер. Концептуальное предположение Ричарда Фейнмана о возможности манипуляции атомами и молекулам становится краеугольным камнем научной и общественной деятельности Эрика Дрекслера в области нанотехнологий. В своих научных и научно-популярных работах Дрекслер выступает последователем идей Фейнмана и активно их развивает, особенно в части молекулярной нанотехнологии (МНТ) и «молекулярного нанопроизводства».

Так, в 1981 г. выходит в свет первая работа Дрекслера из цикла его публикаций в сфере МНТ [7], которая начинается с обсуждения предложенного Фейнманом подхода к миниатюризации объектов и устройств с точностью до отдельного атома или молекулы.

В 1986 г. Дрекслер становится соучредителем института Форсайт, основанного для содействия развитию нанотехнологий (The Foresight Institute, Калифорния), а также публикует монографию «Машины создания. Грядущая эра нанотехнологий» [8], выступая в качестве непосредственного и активного популяризатора наносистем и нанотехнологий в научном сообществе, а также идеолога «молекулярного ассемблера», «атомарно-точного производства» и молекулярного нанопроизводства.

Ряд событий, произошедших в науке в 80-е гг. прошлого века, оказал значительное влияние на развитие нанотехнологий. Важнейшими результатами в области нанонауки, достигнутыми в этот период и обеспечившими ее дальнейший прогресс, являются изобретение сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии, а также открытие новых аллотропных форм углерода – **фуллеренов** (семейство высокосимметричных молекул, состоящих из различного количества атомов углерода) и **углеродных нанотрубок** (полая структура, образованная коаксиально ориентированными одномерными слоями графита цилиндрической формы).

Герд Бинниг, Генрих Рорер, Эрнст Руска. В 1981 г. в лаборатории IBM (International Business Machines) в Цюрихе (Швейцария) Герд Бинниг и Генрих Рорер впервые разработали и сконструировали сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), обеспечивший возможность получения трехмерного топографического изображения поверхности материалов с атомарным разрешением благодаря явлению локального квантово-механического туннелирования электронов между атомами наконечника зонда и атомами поверхности вещества [9].

Герд Бинниг не ограничился изобретением СТМ и в 1985 г. совместно с коллегами Кельвином Куэйтом (Стэнфордский университет, Калифорния) и Кристофом Гербером (лаборатория IBM, Калифорния) разработал атомно-силовой микроскоп, позволяющий в бесконтактном режиме про-

водить изучение топографии, физико-химических и механических свойств поверхности анализируемого материала вне зависимости от типа его электропроводности [10].

В 1986 г. Нобелевской премии по физике были удостоены Герд Бинниг и Генрих Рорер «за изобретение сканирующего туннельного микроскопа», а также Эрнст Руска «за основополагающие работы в электронной оптике и за разработку первого электронного микроскопа». Совместное использование конденсаторов и катушек в качестве основных конструктивных элементов системы электромагнитных линз обеспечило Руске возможность разработать модуль управления и фокусировки пучка электронов. В 1933 г. Руска изготовил первый действующий просвечивающий электронный микроскоп.

Роберт Керл, Гарольд Крото, Ричард Смолли. В 1985 г. Керлом, Крото и Смолли в ходе экспериментов по лазерной абляции твердых образцов графита в атмосфере гелия была впервые синтезирована новая аллотропная форма углерода – фуллерены – симметричные молекулы с углеродными каркасами [11]. Прототипом этих углеродных структур является фуллерен C_{60} – наиболее распространенный и устойчивый кластер диаметром порядка 1 нм, состоящий из 60 атомов углерода в форме усеченного икосаэдра (многоугольник с 60 вершинами, 12 пятиугольными и 20 шестиугольными гранями). В фуллерене C_{60} атомы углерода расположены на поверхности полой сферы, напоминающей два соединенных геодезических купола или футбольный мяч. Фуллерен C_{60} – бакминстерфуллерен, сокращенно «бакибол» – назван авторами в честь архитектора Бакминстера Фуллера, активно использовавшего в своих прогрессивных дизайнерских проектах геодезические купола (конструкции в форме многогранников, поверхность несущей сетчатой оболочки которых близка к сферической). В общем случае понятие «фуллерен» используется для обозначения большого класса родственных углеродных структур – нано-кластеров, состоящих из различного количества атомов углерода, низших (например, C_{20} или C_{30}) или высших (например, C_{70} или C_{540}) фуллеренов.

В 1996 г. Роберту Керлу, Гарольду Крото и Ричарду Смолли была присуждена Нобелевская премия по химии «за открытие фуллеренов».

Сумио Иидзима. В период с 1977 по 1990 г. японский ученый Сумио Иидзима опубликовал цикл статей, посвященных изучению локального распределения атомов углерода методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения в следующих наноструктурах:

- в однослойных и многослойных аморфных и частично графитизированных проводящих углеродных слоях;
- тонких углеродсодержащих пленках;
- алмазоподобных пленках, полученных методом химического осаждения из газовой фазы.

Сообщение об открытии в 1985 г. фуллеренов придало новый импульс исследованиям Иидзимы, который уже в 1987 г. опубликовал изображение содержащего 60 атомов углерода нанокластера, полученного методом вакуумно-дугового распыления. Квинтэссенцией работ Сумио Иидзимы стало открытие им в 1991 г. еще одного вида углеродных наноматериалов – углеродных нанотрубок (УНТ) [12].

Чад Миркин. К знаковым событиям в области нанотехнологий относится открытие в 1999 г. Чадом Миркиным (лауреат премии Фейнмана за 2002 г.) **наноитографии погружным пером (НПП)** [13], обеспечившей стремительное развитие технологий молекулярной нанопечати и наноэлектроники.

Уникальность реализуемых с применением НПП технологий высокоточного нанопроизводства (латеральное разрешение составляет менее 50 нм) обусловлена их масштабируемостью и возможностью непосредственного локального формирования химически чистых наноструктур в автоматизированном режиме. К основным достоинствам НПП относится отсутствие необходимости в физико-химической обработке, предваряющей нанесение мягких и твердых наноматериалов (органических молекул, неорганических коллоидных и биологических наночастиц) в виде стабильных функциональных наноконплексов и наномассивов на практически любые поверхности.

Чад Миркин также внес значительный вклад в разработку нанотехнологий рациональной двумерной и трехмерной воспроизводимой сборки и самосборки неорганических наночастиц и молекулярных комплексов (ДНК, синтетические олигонуклеотиды) в мезо- и макроскопические структуры и агрегаты для получения новых биоматериалов, наноструктурированных материалов, а также детектирования ДНК [14].

Андрей Гейм, Константин Новоселов. Совершенные в конце XX в. открытия углеродных нанотрубок и фуллеренов – неизвестных ранее аллотропных форм углерода – получили продолжение в начале XXI в. В 2004 г. Андрей Гейм и Константин Новоселов (университет Манчестера) с соавторами в журнале Science опубликовали результаты исследования электронной структуры слоев графена (углеродных пленок атомарной толщины), полученных методом эксфолиации высокоориентированного пиролитического графита, и продемонстрировали принципиальную возможность его применения в нанoeлектронике [15].

Стоит отметить, что до 2003 г. возглавляемый Геймом коллектив не работал с материалами даже отдаленно связанными с графеном, а вышеупомянутая статья «Действие электрического поля в тонких углеродных пленках атомарной толщины» 2004 г. является первой! публикацией Гейма, содержащей термины «графит», «углерод» и «графен», что является уникальным, неординарным событием в сфере нанонауки.

Необходимо отметить, что термин «**графен**» впервые был введен в 1986 г. немецким химиком Хансом-Питером Бёмом (совместно с коллегами Ральфом Сеттоном и Эберхардом Штумпом): «для обозначения монослоя углерода следует использовать термин «графеновый слой». Термин «графен» представляет собой комбинацию слова «graphite» (графит как упорядоченная кристаллическая форма углерода) и суффикса «-ene», используемого для обозначения полициклических ароматических углеводородов, в которых атомы углерода образуют гексагональную или шестигранную кольцевую структуру.

В более широком смысле графен представляет собой наглядный пример истинно двумерной монокристаллической структуры, относящейся

к концептуально новому классу материалов атомарной толщины. А. Гейм и К. Новоселов впервые экспериментально продемонстрировали, что отдельные атомные плоскости углерода обладают электропроводностью и сохраняют свою целостность в свободном состоянии при комнатной температуре. Уникальность энергетического спектра графена обусловила появление парадигмы «релятивистской» физики конденсированного вещества, предусматривающей возможность имитации и лабораторных исследований некоторых релятивистских квантово-механических эффектов, ранее не получивших однозначного экспериментального подтверждения в физике высоких энергий в рамках контролируемого эксперимента (например, квантовый эффект Холла, туннелирование Клейна, осцилляции Шубникова – де Гааза) [16].

В 2010 г. Андрей Гейм и Константин Новоселов становятся лауреатами Нобелевской премии по физике «за новаторские эксперименты с двумерным материалом – графеном».

В завершение экскурса в историю нанонауки следует отметить, что в настоящее время в научном сообществе отсутствует консолидированное мнение о конкретном историческом моменте зарождения нанотехнологии как науки. Как было упомянуто выше, у некоторых исследователей эта дата ассоциируется с изобретением Рихардом Зигмонди в 1912 г. иммерсионного ультрамикроскопа, другие отождествляют наступление эпохи нанотехнологий с именем Ричарда Фейнмана и его концепцией «Внизу еще много места...» (лекция 29 декабря 1959 года в Калифорнийском университете). Отдельные ученые и вовсе называют «отцом нанотехнологий» Эрика Дрекслера после выхода в 1986 г. его монографии «Машины создания. Грядущая эра нанотехнологий».

По всей видимости, подобная неоднозначность мнений связана с тем, что нанонаука, наноинженерия и нанотехнология все еще находятся в стадии формирования и развития, а перечень ключевых изобретений и открытий, равно как и совершивших их ученых (рис. 1.1, 1.2), продолжает расширяться.

На рис. 1.1 представлены удостоенные Нобелевской премии по физике и химии ученые, открытия которых внесли основной вклад в эволюцию нанонауки и нанотехнологии в XX и начале XXI в.



Рис. 1.1. Нобелевские лауреаты по физике и химии, внесшие основной вклад в становление и развитие нанонауки и нанотехнологий в XX в. и начале XXI в.

На рис. 1.2 представлены изобретатели и ученые, имена которых неразрывно связаны с историей нанотехнологий. Совершенные ими фундаментальные изобретения (сканирующий туннельный и просвечивающий микроскопы, интегральная микросхема, нанолитография погружным пером и т. д.) и открытия (принцип лазера–мазера, транзисторный эффект, графен, фуллерены, углеродные нанотрубки и т. д.) сформировали научно-практические основы перехода от производства на макро- и микроуровне к нанофабрикации.



Рис. 1.2. Изобретатели и ученые, имена которых неразрывно связаны с историей становления и развития нанотехнологий в XX и начале XXI в.

Задание для самостоятельного выполнения

Задание 1.1. Используя релевантные ссылки из библиографического списка к разделу «История становления и развития нанотехнологий», а также сведения из открытых электронных библиотек научных публикаций, в виде отчета выполните обобщение данных о ключевом вкладе ученого в современные нанотехнологии (табл. 1.1).

Отчет о выполнении задания должен содержать следующие обязательные элементы: биографические сведения об ученом; иллюстративный материал, демонстрирующий его вклад в нанотехнологии; перечень основных публикаций ученого, соответствующих рассматриваемой тематике; список наиболее значимых цитирований работ ученого из высокорейтинговых журналов.

Таблица 1.1

Фамилии ученых по вариантам

Номер варианта	1	2	3	4
Фамилия	Зигмонди	Ленгмюр	Басов	Прохоров
Номер варианта	5	6	7	8
Фамилия	Таунс	Майман	Килби	Алфёров
Номер варианта	9	10	11	12
Фамилия	Фейнман	Танигути	Глейтер	Дрекслер
Номер варианта	13	14	15	16
Фамилия	Бинниг	Рорер	Руска	Куэйт
Номер варианта	17	18	19	20
Фамилия	Гербер	Керл	Крото	Смолли
Номер варианта	21	22	23	24
Фамилия	Иидзима	Миркин	Гейм	Новоселов

Контрольные вопросы

1. Приведите исторический пример эмпирического использования человеком наноматериалов или нанотехнологий.
2. Назовите ученого, впервые использовавшего термин «нанометр», укажите контекст и год, в котором произошло это событие.
3. Назовите ученого, впервые использовавшего термин «плазма», и укажите, в каком году он был введен в общенаучную лексику.
4. Назовите типы устройств, теоретической основой нанопроизводства которых выступает явление самосборки молекулярных монослоев.
5. Объясните, как расшифровывается англоязычный анакроним *laser*, уточните смысловое значение русскоязычного термина «лазер».
6. Назовите ученого, сконструировавшего первый лазер на искусственном рубине, и укажите, в каком году произошло это событие.
7. Перечислите основные сравнительные преимущества лазерных нанотехнологий.
8. Назовите открытие, предшествовавшее изобретению интегральной микросхемы и оказавшее на него непосредственное влияние.
9. Перечислите основные преимущества перехода от производства электронно-вакуумной техники к твердотельной электронике.
10. Назовите основные способы нанопроизводства твердотельных гетероструктур.
11. Назовите основную концепцию Р. Фейнмана, реализованную в современном нанопроизводстве; поясните ее физический смысл.
12. Перечислите разработанные в конце XX в. экспериментальные методы визуализации и управления атомами, обеспечившие интенсивное развитие нанонауки и нанотехнологий.
13. Назовите ученого, впервые использовавшего термин «нанотехнология», укажите контекст и год, в котором произошло это событие.
14. Назовите ученого, впервые использовавшего в своей работе термин «нанокристаллические материалы», укажите, в каком году произошло это событие.

15. Назовите ученого, впервые использовавшего термин «наноструктурированные материалы», укажите, в каком году произошло это событие.

16. Назовите сферу современного нанопроизводства, развитию и популяризации которой посвящено наибольшее количество работ Э. Дрекслера.

17. Назовите явление, которое лежит в основе принципа действия сканирующего туннельного микроскопа, и поясните его физический смысл.

18. Назовите явление, которое лежит в основе принципа действия атомно-силового микроскопа, и поясните его физический смысл.

19. Назовите явление, которое лежит в основе принципа действия просвечивающего электронного микроскопа, и поясните его физический смысл.

20. Перечислите наноразмерные аллотропные формы углерода.

21. Назовите в хронологической последовательности научные открытия наноразмерных аллотропных форм углерода и перечислите ученых, совершивших эти открытия.

22. Перечислите способы получения углеродных наноматериалов, рассмотренные в текущем разделе.

23. Перечислите технологии нанопроизводства, развитию которых способствовало изобретение нанолитографии погружным пером.

24. Назовите метод получения графена, впервые обеспечивший возможность изучения его электрических и оптических свойств, поясните его физический смысл.

25. Назовите ученого, впервые использовавшего термин «графен», укажите контекст и год, в котором произошло это событие.

2. ОТ НАУКИ О ПОВЕРХНОСТИ К НАНОНАУКЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Приставка «нано» используется в международной системе единиц (СИ) для удобства обозначения характерных размеров объектов (частиц, кластеров, молекулярных комплексов и т. д.), измеряемых в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$, 1 nm). Для справки, лингвистическая форма приставки «нано» происходит от латинского слова «nanus» или древнегреческого понятия «па(п)ос», означающих «гном» или «карлик», другими словами – «крайне маленький», «крошечный» [17]. В этой связи стоит отметить, что на профессиональном сленге нанонаука иногда именуется как «**миниатюрная наука**», а термин «нанотехнологии» иногда заменяют интегрированным понятием «**нанотех**».

Длина нескольких расположенных друг за другом атомов (от двух до двадцати в зависимости от их типа) составляет приблизительно 1 нм, а молекула ДНК обладает шириной порядка 2,5 нм [18]. Например, расположенные вплотную друг к другу три с половиной атома золота образуют ряд, протяженность которого равна одному нанометру. Поскольку радиус атома золота (ковалентный радиус воображаемой «твердой сферы») составляет приблизительно 0,144 нм, линейный размер системы из трех с половиной атомов золота эквивалентен длине линейки, визуализированной на рис. 2.1.

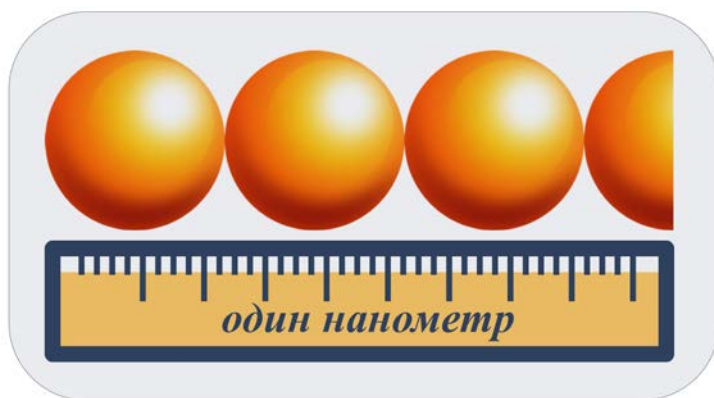


Рис. 2.1. Ряд из трех с половиной атомов золота и линейка длиной 1 нм [19]

Для наглядности на рис. 2.2 также схематично представлена **область наномасштаба** и частицы различных характерных размеров [20].

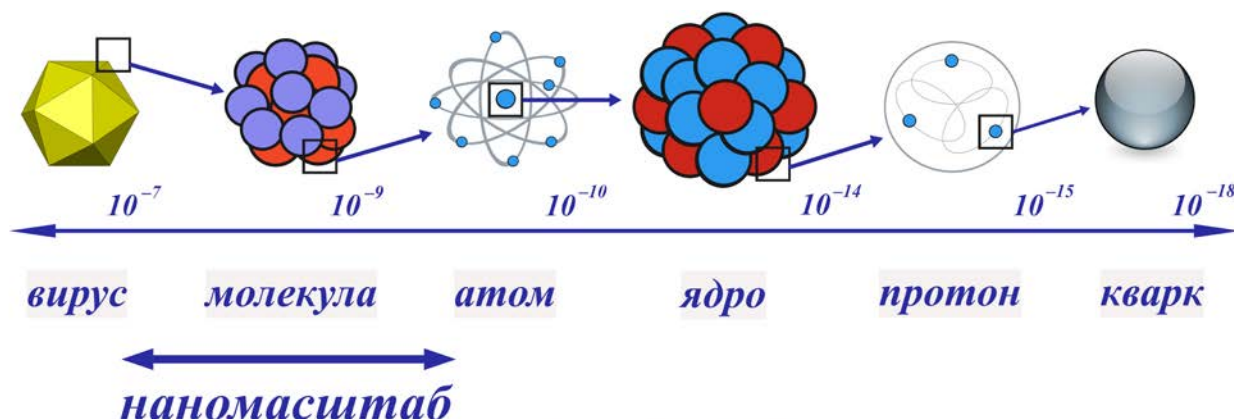


Рис. 2.2. Область наномасштаба на шкале характерных размеров различных частиц

Важно отметить, что у **наномасштабного диапазона (нанодиапазона)** отсутствуют строгие границы: начало отсчета находится в области частиц субмикронных размеров (~ 100 нм), а область частиц атомарной величины выступает нижним пределом размеров нанообъектов (наноразмерных материалов). На рис. 2.3 схематично показаны нанообъекты (нанокластеры и нанокристаллиты), а также их структурные элементы – атомы и молекулы.

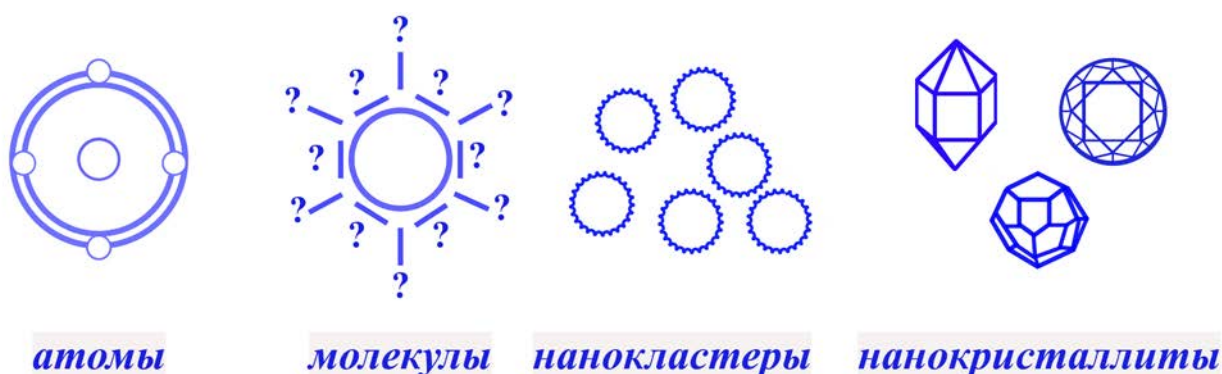


Рис. 2.3. Схематичное представление различных структурных состояний вещества в области наномасштаба [21]

Основное различие между кристаллическими наноструктурами и аморфными наночастицами заключается в их размерах, а также во взаимном расположении атомов друг относительно друга. Традиционная классификация твердых веществ по степени кристалличности применяется и в наномасштабе; более того, наноматериалы обнаружены во всех семи основных типах кристаллических систем. На рис. 2.4 представлена взаимная пространственная конфигурация атомов, соответствующая структурной организации аморфных, поли- и монокристаллических наноматериалов.

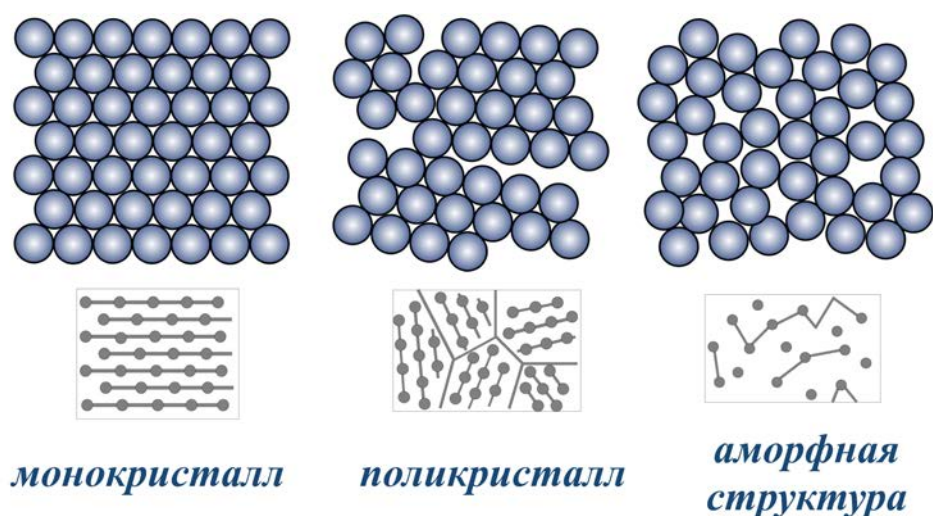


Рис. 2.4. Схематическое изображение основных форм твердого агрегатного состояния вещества в зависимости от степени кристалличности [21]

Аморфная (нано)структура характеризуется отсутствием дальнего порядка (например, наностекла, получаемые консолидацией аморфных наночастиц) и наличием некоторого ближнего порядка в расположении атомов в зависимости от типа химической связи.

Поликристаллические (нано)материалы состоят из большого количества доменов (областей) различного размера и ориентации. Ориентация доменов, которые также иногда называют *нанокристаллитами* или *нанозернами*, может не иметь каких-либо предпочтительных направлений, при этом говорят, что домены образуют произвольную (разупорядоченную) текстуру.

Структура **монокристаллических (нано)материалов** характеризуется наличием высокого дальнего порядка в расположении атомов. Фактически, монокристалл представляет собой одиночный расширенный домен, состоящий из однонаправленно ориентированных нанокристаллитов, образующих непрерывную кристаллическую решетку.

При рассмотрении физико-химических свойств различных веществ в области наномасштаба обнаруживается их значительное несоответствие характеристикам объемных материалов идентичного химического состава; в некоторых случаях наблюдаются кардинальные различия этих свойств. В нанокристаллических системах, средняя величина кристаллита которых не превышает 100 нм, с уменьшением размеров структурных элементов значительно возрастает количество **поверхностей раздела** [22], возникают **наноразмерные эффекты**.

Размерные эффекты подразделяются на внутренние и внешние, а также на классические и квантовые. Под *внутренними (интринсивными) размерными эффектами* понимается изменение специфических свойств (нано)частиц (например, параметры решетки, температура плавления, ширина запрещенной зоны, химическая активность и т. д.), возникающее вне зависимости от внешних воздействий. *Внешние размерные эффекты* неминуемо появляются при различных взаимодействиях полей и веществ благодаря уменьшению размеров их (нано)структурных элементов (частиц, кристаллитов, доменов) до некоторых критических величин, сопоставимых с характеристическими параметрами физико-химических процессов (длина свободного пробега, длина когерентности, диффузионная длина, радиус экранирования, длина волны излучения, уровень энергии и длина волны Ферми, длина волны де Бройля и т. д.). В отличие от размерных эффектов, рассматриваемых в классической теории твердого тела, квантово-механические явления (квантовое ограничение, баллистический транспорт, квантовое туннелирование, квантовая интерференция и т. д.) обусловлены дискретизацией энергетических состояний в низкоразмерных наноструктурах.

Возникновение размерных эффектов при уменьшении размера структурных элементов обуславливает необходимость изучения влияния геометрических характеристик нанобъектов (нанокластеров, нанокристаллитов, наночастиц, нанопор) на их физико-химические и функциональные свойства. Наноразмерные структурные элементы обладают большим количеством **границ (поверхностей) раздела**, **высокой удельной площадью поверхности** и **ограниченными размерами** (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Ключевые особенности наноразмерных структурных элементов, определяющие основные свойства наноструктур [20]

Для анализа зависимости функциональных характеристик нанобъектов от их размеров, как правило, используется **масштабный фактор** – отношение площади поверхности к объему (S/V), во многом определяющее физико-химические свойства нанобъектов. На рис. 2.6 представлена зависимость величины S/V от объема частицы кубической формы, обладающая обратно пропорциональным характером: с увеличением размеров нанобъекта (ростом количества базовых структурных элементов) отношение общей площади поверхности к его объему нелинейно уменьшается (рис. 2.7).

Например, в случае, когда число сторон (количество базовых структурных элементов) нанобъекта достигает шести, площадь поверхности по абсолютной величине совпадает с его объемом, а масштабный фактор принимает единичное значение. По определению отношение площади поверхно-

сти к объему в СИ измеряется в обратных метрах ($[S/V] = \text{м}^{-1}$), однако масштабный фактор используется, как правило, в виде безразмерного параметра.

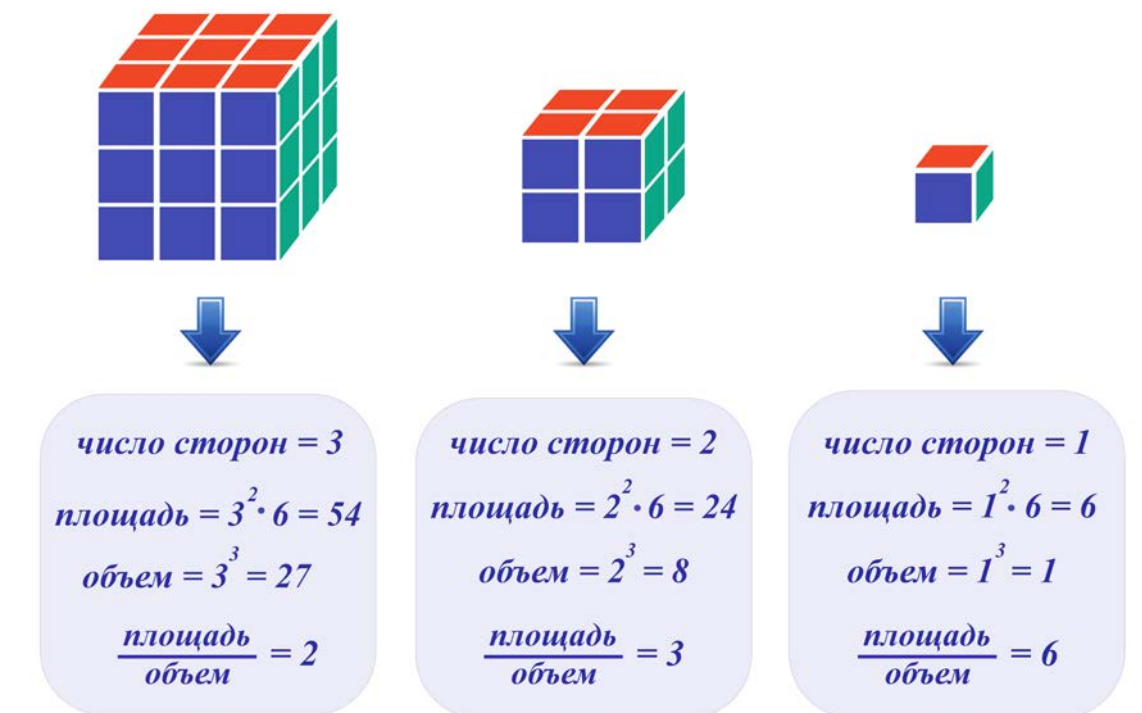


Рис. 2.6. Демонстрация понятия «масштабный фактор» (отношение площади поверхности к размеру, S/V) на примере нанообъекта кубической формы [19]

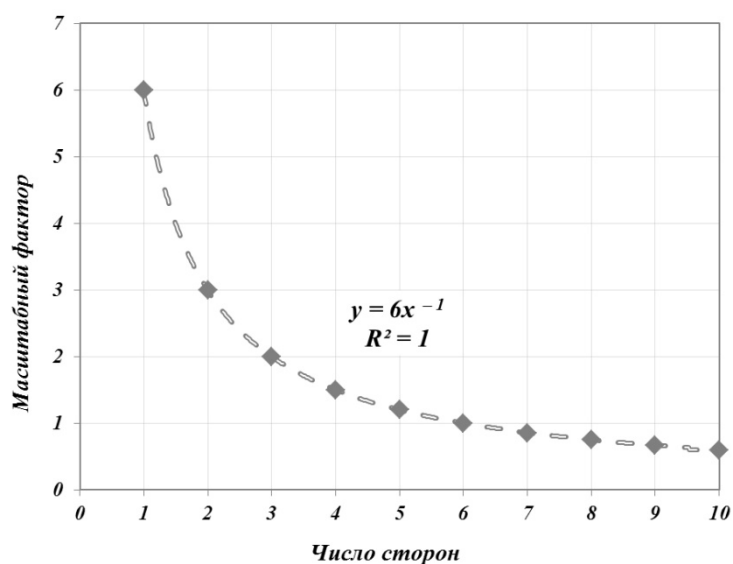


Рис. 2.7. Зависимость масштабного фактора (S/V) от числа сторон (количества базовых структурных элементов) нанообъекта

В отличие от характеристик объемных материалов, масштабный фактор применяется для описания свойств отдельных нанообъектов – наночастиц, нанопор.

В табл. 2.1 представлен набор величин, свидетельствующих о прогрессирующем росте общей площади поверхности частиц кубической формы, полученных последовательным делением исходного куба ($N = 1$, $S = 6 \text{ м}^2$) на различное количество базовых структурных элементов ($N = 1, 2, 4, \dots 1\,000\,000\,000$).

Таблица 2.1

**Взаимосвязь числа базовых структурных элементов
и общей площади поверхности**

Число сторон N	Количество базовых структурных элементов на 1 м^3	Длина стороны отдельного элемента $l, \text{ м}$	Площадь поверхности отдельного элемента $S_1, \text{ м}^2$	Общая площадь поверхности всех элементов $S, \text{ м}^2$
1	1	1	6	6
2	8	0,5	1,5	12
...
4	64	0,25	0,375	24
...
1 000	10^9	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-6}$	6 000
...
1 000 000	10^{18}	10^{-6}	$6 \cdot 10^{-12}$	6 000 000
...
1 000 000 000	10^{27}	10^{-9}	$6 \cdot 10^{-18}$	6 000 000 000

Так, разбиение исходного куба на 1 000 одинаковых кубиков приводит к увеличению общей площади поверхности частиц до 6 000 м^2 . Деление сторон исходного куба объемом 1 м^3 на 1 000 000 000 одинаковых

принимается равным $r = 0,144$ нм [23]. Выполняется оценка количества краевых атомов золота (число атомов, расположенных вплотную друг к другу и образующих ряд, протяженностью один метр, N_1) по формуле

$$N_1 = \frac{1}{2r} = \frac{1}{0,288 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 3,47 \cdot 10^9. \quad (2.2)$$

Проводится расчет количества атомов золота, содержащегося в одном кубическом метре (N_{V1}), а также числа атомов, расположенных на поверхности этого куба (N_{S1}). Далее устанавливается соответствующая доля поверхностных атомов, являющаяся эквивалентом отношения площади поверхности к объему куба (масштабного фактора):

$$N_{V1} = (3,47 \cdot 10^9)^3 = 4,19 \cdot 10^{28}; \quad (2.3)$$

$$N_{S1} = 6 \cdot (3,47 \cdot 10^9)^2 = 7,22 \cdot 10^{19}; \quad (2.4)$$

$$\frac{S}{V} = \frac{S_{1 \text{ м}^3}}{V_{1 \text{ м}^3}} = \frac{N_{S1}}{N_{V1}} = \frac{7,22 \cdot 10^{19}}{4,19 \cdot 10^{28}} = 1,72 \cdot 10^{-9}. \quad (2.5)$$

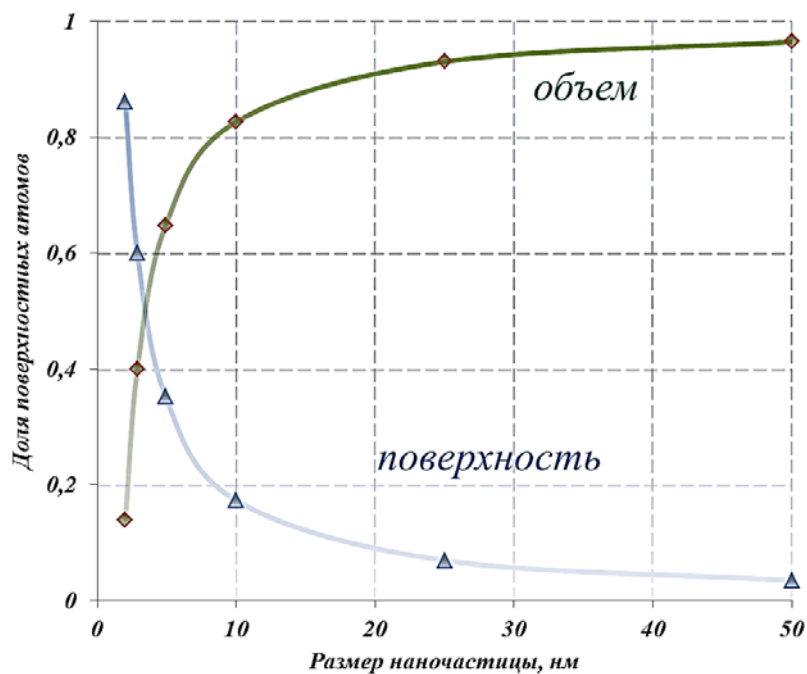


Рис. 2.8. Зависимость доли поверхностных атомов от размера наночастиц

В результате аналогичных расчетов для частиц размерами 50; 25; 10; 4,9; 2,88 и 2,02 нм обнаруживается обратно пропорциональная зависимость доли поверхностных атомов от размера наночастиц (рис. 2.8).

Как свидетельствует рис. 2.8, доля поверхностных атомов в наночастице размером 25 нм составляет приблизительно 7 % от общего количества образующих ее атомов золота, тогда как для наночастицы размером 2,02 нм соответствующая величина достигает значения 86 %! Таким образом, относительная доля поверхностных атомов быстро возрастает по мере уменьшения размеров наночастиц. Другими словами, некоторые наноматериалы представляют собой функциональные поверхности, у которых относительная доля поверхностных атомов стремится к единице.

Одной из важных особенностей строения объемных кристаллических наноструктур является наличие в них большого количества **поверхностей раздела** – межкристаллитных (межфазных) границ и тройных стыков (поверхностей сопряжения трех различно ориентированных нанокристаллитов). Общая доля поверхностей раздела $V_{п.р}$ в таких наноструктурах составляет

$$V_{п.р} = 1 - \left[\frac{L - S}{L} \right]^3 = 1 - \left[1 - \frac{S}{L} \right]^3 \approx 1 - \left[1 - \frac{S}{L} \right] \approx \frac{3S}{L}, \quad (2.6)$$

где L – размер нанокристаллита; S – ширина границы (приграничной области).

Доля межкристаллитных границ $V_{м.гр}$ рассчитывается по формуле

$$V_{м.гр} \approx \frac{3S(L - S)^2}{L^3}. \quad (2.7)$$

Доля тройных стыков $V_{т.ст}$ оценивается как разность между общей долей поверхностей раздела и долей межкристаллитных границ:

$$V_{т.ст} = V_{п.р} - V_{м.гр}. \quad (2.8)$$

Например, при $S = 1$ нм, $L = 12$ нм:

$$V_{\text{п.р}} = \frac{3S}{L} = \frac{3 \cdot 10^{-9}}{12 \cdot 10^{-9}} = 0,25;$$

$$V_{\text{м.гр}} = \frac{3S(L - S)^2}{L^3} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 10^{-9} (12 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-9})^2}{(12 \cdot 10^{-9})^3} = 0,21;$$

$$V_{\text{т.ст}} = V_{\text{п.р}} - V_{\text{м.гр}} = 0,2500 - 0,14063 \approx 0,04 = 4 \%$$

Отметим, что в случае, когда средний размер кристаллитов составляет порядка 6 нм, доля поверхностей раздела в наноструктуре достигает уже ~50 %.

Как свидетельствуют приведенные примеры, значительная часть атомов располагается как на **внешних**, так и **внутренних поверхностях** нанообъектов. Внешние наноповерхности состоят из краевых и поверхностных атомов. К наноматериалам с внешними поверхностями относятся, например, металлические и полупроводниковые нанокластеры, а также коллоидные наночастицы. Внутренние поверхности представляют собой поверхности нанопор, наноканалов и нанополостей, а также поверхности раздела – межфазные границы в поликристаллических наноматериалах и межкристаллитные границы в монокристаллических наноматериалах. Примерами внутренних поверхностей являются неорганические пористые наноксиды, содержащиеся в природных и синтетических цеолитах, аморфных углеродах и кремнеземах.

Вне зависимости от своего состояния (объемное или наноразмерное, аморфное или кристаллическое) все твердотельные вещества содержат поверхности (границы) раздела, природа и протяженность которых оказывают значительное влияние на физические и химические характеристики (нано)материалов. Адгезия и адсорбция, каталитическая активность и работа выхода – вот лишь некоторые примеры явлений и свойств (нано)материалов непосредственно зависящих от размера, состава и структуры их

поверхности. В данном контексте в своем современном состоянии нанонаука во многом представляет собой этап эволюции «науки о поверхности»; аналогичным образом нанотехнологии могут рассматриваться как результат развития «прикладной науки о поверхности» [24].

Поскольку прикладная наука о поверхности возникла в результате изобретения транзистора (У. Шокли, Дж. Бардин, У. Браттейн), производственная необходимость в его миниатюризации, повышении надежности и долговечности выступила краеугольным технологическим драйвером эволюции науки о поверхности в направлении современных нанотехнологий. Непосредственное влияние науки о поверхности на развитие нанотехнологии схематично показано на рис. 2.9.

Отмеченный на рис. 2.9 (а, б) период времени отсчитывается в хронологической последовательности с середины XX в. и охватывает порядка пятидесяти лет. Обозначенная термином «комплексность» ось ординат отражает доминирующие в науке о поверхности тенденции к увеличению разнообразия и повышению сложности рассматриваемых поверхностных свойств, эффектов и явлений, а также используемых для их анализа научных направлений и технических средств.

На центральной стрелке перечислены основные объекты исследования в науке о поверхности в последовательности, соответствующей постепенному усложнению рассматриваемых (нано)систем: от поверхностей раздела (твердое тело – сверхвысокий вакуум) к агломератам, агрегатам и кластерам, от покрытий и тонких пленок к сверхрешеткам, от наноструктур к нанобиоинтерфейсам.

Вскоре после изобретения транзистора было установлено, что неконтролируемое загрязнение поверхности препятствует получению воспроизводимых характеристик. Научно-исследовательские работы в сфере освоения космоса внесли значительный вклад в вакуумную технологию, развитие методов контроля ключевых характеристик функциональных поверхностей.



Рис. 2.9. Нанотехнологии как результат эволюции науки о поверхности:
 а – технологические драйверы и научные дисциплины;
 б – свойства, эффекты, явления и технические средства [24]

Как показывает рис. 2.9 (а, б), перечень достижений, обеспечивших развитие науки о поверхности, с ее последующей трансформацией в отдельное направление в нанонауке, а также широкую диверсификацию отрасли промышленного производства твердотельных наноматериалов, включает, но не ограничивается этим:

- открытие гетерогенного катализа с использованием кластерных металлокомплексных катализаторов;
- развитие методов формирования тонких пленок (в том числе молекулярно-лучевая эпитаксия),
- разработку электронных устройств на полупроводниковых гетероструктурах (в том числе лазеров на сверхрешетках).

Сложно переоценить вклад в развитие науки о поверхности и, следовательно, в прогресс нанотехнологии, разработку и совершенствование аналитического оборудования (растровой и просвечивающей электронной, зондовой и туннельной микроскопии, рентгеновской, электронной и фотоэлектронной дифрактометрии и т. д.). Невозможно представить достижения современной нанотехнологии без использования вычислительных методов (и мощностей), обеспечивающих возможность моделирования наноструктур на основе первых принципов.

Задания для самостоятельного выполнения

Задание 2.1. В соответствии с вариантом из табл. 2.2 определите удельную площадь поверхности частиц сферической формы диаметром, варьируемым в диапазоне от 10 до 50 нм с шагом в 10 нм. Используйте приведенную на с. 32 формулу (2.1) и пример расчета.

Постройте графическую зависимость удельной площади поверхности от радиуса частиц сферической формы, сформулируйте вывод.

Задание 2.2. Определите количество объемных и поверхностных атомов наночастицы в соответствии с вариантом из табл. 2.2. Используйте приведенные на с. 33 формулы (2.2)–(2.5) и пример расчета.

Постройте графическую зависимость доли поверхностных атомов от размеров наночастиц, сформулируйте выводы.

Таблица 2.2

**Химические элементы периодической таблицы Менделеева
и ковалентные радиусы их атомов по вариантам**

Номер варианта	Элемент	Радиус атома, Å	Номер варианта	Элемент	Радиус атома, Å	Номер варианта	Элемент	Радиус атома, Å
1	Cu	1,28	9	Zr	1,59	17	Mn	1,37
2	Ag	1,44	10	Hf	1,56	18	Tc	12,35
3	Zn	1,33	11	V	1,31	19	Re	1,37
4	Cd	1,49	12	Nb	1,43	20	Fe	1,24
5	Hg	1,50	13	Ta	14,3	21	Co	1,25
6	Sc	1,61	14	Cr	1,25	22	Ni	1,25
7	Y	1,78	15	Mo	1,36	23	Pd	1,38
8	Ti	1,45	16	W	1,37	24	Pt	1,39

Задание 2.3. Определите общую долю поверхностей раздела, долю межкристаллитных границ и долю тройных стыков в соответствии с вариантом из табл. 2.3, сформулируйте выводы. Используйте приведенные на с. 34 формулы (2.6)–(2.8) и пример расчета.

Таблица 2.3

**Характеристики наноструктур – размеры нанокристаллитов
и ширина межкристаллитных границ**

Вариант	Размер кристаллита L , нм	Ширина границы S , нм	Вариант	Размер кристаллита L , нм	Ширина границы S , нм	Вариант	Размер кристаллита L , нм	Ширина границы S , нм
1	12	1	9	30	4	17	32	8
2	15	1	10	25	5	18	36	9
3	12	2	11	50	5	19	40	9
4	15	2	12	24	6	20	40	10
5	10	3	13	30	6	21	50	10
6	15	3	14	28	7	22	55	11
7	30	3	15	30	7	23	40	12
8	24	4	16	30	8	24	48	12

Задание 2.4. Используйте рис. 2.9 (а, б) и сведения раздела «История становления и развития нанонауки и нанотехнологий», в соответствии с вариантом из табл. 2.4 сделайте обоснованный выбор технологических драйверов и научных дисциплин, а также свойств, эффектов, явлений и технических средств, соответствующий вкладу ученого в науку о поверхности, нанонауку и современные нанотехнологии. Сформулируйте выводы.

Таблица 2.4

Фамилии ученых по вариантам

Номер варианта	1	2	3	4
Фамилия	Зигмонди	Ленгмюр	Басов	Прохоров
Номер варианта	5	6	7	8
Фамилия	Таунс	Майман	Килби	Алфёров
Номер варианта	9	10	11	12
Фамилия	Фейнман	Танигути	Глейтер	Дрекслер
Номер варианта	13	14	15	16
Фамилия	Бинниг	Рорер	Руска	Куэйт
Номер варианта	17	18	19	20
Фамилия	Гербер	Керл	Крото	Смолли
Номер варианта	21	22	23	24
Фамилия	Иидзима	Миркин	Гейм	Новоселов

Контрольные вопросы

1. Объясните происхождение и значение приставки «нано».
2. Поясните, какое количество расположенных друг за другом в ряд атомов соответствует расстоянию в один нанометр, приведите пример.
3. Поясните, какое положение занимает область наномасштаба на шкале характерных размеров различных частиц (вирусов, молекул, атомов, ядер, протонов, кварков).

4. Приведите сведения о границах наномасштабного диапазона (нанодиапазона).

5. Перечислите известные типы структурной организации наноматериалов.

6. Поясните, в чем заключается принципиальное различие аморфной и кристаллической наноструктуры.

7. Назовите термины, альтернативные понятию «нанокристаллит».

8. Поясните, что понимается под термином «размерные эффекты».

9. Поясните, что понимается под термином «внутренние размерные эффекты».

10. Поясните, что понимается под термином «внешние размерные эффекты».

11. Приведите примеры характеристических параметров физико-химических процессов.

12. Перечислите квантово-механические явления, возникающие в низкоразмерных наноструктурах.

13. Сформулируйте определение понятия «масштабный фактор».

14. Поясните, каков характер зависимости масштабного фактора от количества базовых структурных элементов нанообъекта.

15. Сформулируйте определение понятия «удельная площадь поверхности».

16. Поясните, каков характер зависимости удельной площади поверхности от размеров наночастицы сферической формы.

17. Приведите примеры, в каких случаях применение параметра «удельная площадь поверхности» является обязательным, обоснуйте эту необходимость.

18. Поясните, что понимается под терминами «поверхностный атом», «доля поверхностных атомов».

19. Поясните, что понимается под терминами «объемный атом», «доля объемных атомов».

20. Поясните, что означает термин «поверхность раздела».

21. Объясните смысл понятия «внешние наноповерхности», приведите примеры нанобъектов данного типа.

22. Объясните смысл понятия «внутренние наноповерхности», приведите примеры нанобъектов данного типа.

23. Приведите примеры явлений и свойств (нано)материалов, непосредственно зависящих от размера, состава и структуры их поверхности.

24. Укажите временной период возникновения «науки о поверхности», охарактеризуйте ее взаимосвязь с нанонаукой и нанотехнологией.

25. Перечислите общеизвестные достижения «науки о поверхности», обеспечившие ее развитие и последующую трансформацию в отдельное направление в нанонауке.

3. НАНОНАУКА И НАНОМАТЕРИАЛЫ. ТЕРМИНОЛОГИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Образованное от латинского слова *scientia* (знание) понятие «**наука**» представляет собой совокупность объективных знаний о реальной действительности, а также деятельность, ориентированную на установление и обоснование истинных закономерностей эволюции процессов, явлений и систем. Этимологическое происхождение понятия «**технология**» связано с греческим словом *teknikos* (искусство, мастерство) и латинским *logia* (знание, учение). Таким образом, технология – это искусство применения научных знаний для решения практических задач воспроизводимым способом в определенной сфере производства [19]. Как известно, главными инструментами науки являются теория и эксперимент, к обязательным составляющим технологии относятся разработка и выпуск востребованного на рынке продукта. Между наукой и технологией существует неразрывная взаимосвязь, наука составляет основу технологии, которая, в свою очередь, во многом определяет направления и содержание научного поиска.

В данном контексте необходимо отметить, что понятие «**производство**», образованное от латинского слова *manufactus* («сделано вручную»), претерпело несколько трансформаций: ручной труд сменился массовой (конвейерной), а затем и бережливой фабрикацией. Только за последние три столетия неоднократно происходила смена технологических парадигм развития производства: механизация, автоматизация, компьютеризация. С точки зрения технологии целью производства является эффективное преобразование исходного материала (сырья) в конечный продукт с использованием материальных и нематериальных ресурсов.

В широком смысле слова современная интерпретация понятия «**производство**» охватывает дизайн, техпроцессы, средства контроля, обеспечение качества, а также оценку жизненного цикла продукта – от концепции до реализации, а затем от эксплуатации до вторичной переработки или утилизации.

Научно-технологический прогресс сопровождается постоянным совершенствованием традиционных и разработкой новых, нетрадиционных высокопрецизионных технологий; повышение технических требований к точности, надежности и функциональности изделий обуславливает их миниатюризацию, переход от производства на макро- и микроуровне к **нанофабрикации**. Рис. 3.1 демонстрирует взаимосвязь между современной наукой и технологией.



Рис. 3.1. Иллюстрация взаимосвязи современной науки и технологии [19]

Научной основой разработки и совершенствования технологий получения наноматериалов, а также применения их в производстве является нанонаука. Фактически **нанонаука** представляет собой систематизированное знание о механизмах и закономерностях функционирования, а также о специфических свойствах материалов в **нанометровом масштабе размеров**, или, совсем кратко, это наука о **наноразмерных материалах** (наноматериалах). При этом под **наноразмерами (наномасштабом, нанодиапазоном)** понимается диапазон линейных размеров величиной приблизительно от 1 до 100 нанометров (1–100 нм), в пределах которого у нанообъектов преимущественно проявляются уникальные свойства. Стоит отметить, что термин «**нанонаука**» не имеет универсального

определения, по-разному трактуется в специализированной литературе. Это объясняется текущим состоянием системы научных знаний о наноматериалах и технологиях их производства, которая находится в стадии интенсивного формирования.

Нанонаука обладает междисциплинарным характером, ее основой являются физика, химия, инженерия и биология [19] и, в первую очередь, те разделы вышеперечисленных дисциплин, в которых рассматриваются объекты, состоящие из конечного числа атомов или молекул. Для таких объектов характерна высокая корреляционная зависимость свойств от размеров, дискретная атомно-молекулярная структура вещества, квантовые закономерности его поведения.

В настоящее время (2023 г.) в области наноматериалов и нанотехнологий в нашей стране действует ряд государственных стандартов, идентичных документам, разработанным **техническим комитетом по стандартизации ISO/TC 229 «Нанотехнологии»** Международной организации по стандартизации (the **International Organization for Standardization, ISO**). В табл. 3.1 приведены обобщенные сведения об основных стандартах и технических отчетах, действующих в области наноматериалов, нанотехнологий и нанопроизводства, русскоязычные документы перечислены в соответствии с эквивалентными оригинальными документами, опубликованными на английском языке. Анализ данных из табл. 3.1 позволяет сформулировать следующие выводы:

- отечественные ГОСТы в области наноматериалов и нанотехнологий фактически представляют собой переводные версии соответствующих англоязычных документов (для всех стандартов степень соответствия указывается как «идентичный» оригиналу);

- в стандартах серии ISO/TS 80004 термины расположены в систематизированном порядке, отражающем систему основных понятий в области (нано)материалов, технологий и производства;

- термин «нанодиапазон» упоминается во всех стандартах (табл. 3.1);

- ряд терминов, например, «нанообъект» и «наночастица», многократно дублируется и приводится в подавляющем большинстве стандартов (табл. 3.1).

Стандарты в области наноматериалов и нанотехнологий

Стандарт		Ссылка
на английском языке	на русском языке	
ISO/TS 80004-1:2015. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core terms	ГОСТ ISO/TS 80004-1-2017. Нанотехнологии. Часть 1. Основные термины и определения	[25]
ISO/TS 80004-2:2015. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 2: Nano-objects	ГОСТ ISO/TS 80004-2-2017. Нанотехнологии. Часть 2. Нанообъекты. Термины и определения	[26]
ISO/TS 80004-3:2020 Nanotechnologies – Vocabulary – Part 3: Carbon nano-objects	ГОСТ ISO/TS 80004-3-2014. Нанотехнологии. Часть 3. Нанообъекты углеродные. Термины и определения	[27]
ISO/TS 80004-4:2011. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 4: Nanostructured materials	ГОСТ ISO/TS 80004-4-2016. Нанотехнологии. Часть 4. Материалы наноструктурированные. Термины и определения	[28]
ISO/TS 80004-5:2011. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 5: Nano/bio interface	ГОСТ ISO/TS 80004-5-2014. Нанотехнологии. Часть 5. Нано-/биоинтерфейс. Термины и определения	[29]
ISO/TS 80004-6:2021. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 6: Nano-object characterization	ГОСТ ISO/TS 80004-6-2016. Нанотехнологии. Часть 6. Характеристики нанообъектов и методы их определения. Термины и определения	[30]
ISO/TS 80004-8:2020. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 8: Nanomanufacturing processes	ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016. Нанотехнологии. Часть 8. Процессы нанотехнологического производства. Термины и определения	[31]
ISO/TS 80004-11:2017. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 11: Nanolayer, nanocoating nanofilm, and related terms	ГОСТ ISO/TS 80004-11:2017. Нанотехнологии. Словарь. Часть 11. Нанослой, нанопокрывание, нанопленка и связанные с ними термины	[32]
ISO/TS 12805:2011 Nanotechnologies – Materials specifications – Guidance on specifying nano-objects	ГОСТ Р 55723-2013. Нанотехнологии. Руководство по определению характеристик промышленных нанообъектов	[33]
ISO 80004-1:2023. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core vocabulary	Отсутствует русскоязычная версия стандарта	[34]

Начиная с 2010 г. ряд стандартов был подвергнут пересмотру, причем некоторые стандарты повторно утверждались в неизменном виде (например, отчет ISO/TS 12805:2011), а в некоторые документы были внесены коррективы. Так, в 2023 г. технические отчеты ISO/TS 80004-1:2015, ISO/TS 80004-2:2015, ISO/TS 80004-4:2011 и ISO/TS 80004-11:2017 были отозваны, а в результате их пересмотра и обобщения опубликован стандарт ISO 80004-1:2023 «Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core vocabulary» [34], что, по всей видимости, повлечет обновление и переиздание соответствующих русскоязычных ГОСТов.

В стандартах серии ISO/TS 80004 большинство определений терминов сформулировано таким образом, чтобы в дальнейшем на их основе было возможно разработать оптимальную структуру терминологических систем и сами терминологические системы в области нанотехнологий с иерархически взаимосвязанными терминами. Так, в документе ISO 80004-1:2023 по сравнению с ISO/TS 80004-1:2015 пересмотрен термин «**наноструктура**». Трансформация понятия «наноструктура», произошедшая с введением стандарта ISO 80004-1:2023 (табл. 3.2), является одним из наглядных примеров уточнения терминов и определений с целью выработки оптимальной терминологической системы в сфере нанотехнологий. Таким образом, в ISO/TS 80004-1:2015 (ГОСТ ISO/TS 80004-1–2017) в формулировке термина «наноструктура» делается акцент на взаимосвязи размеров, границ и свойств наноструктурных элементов, тогда как в ISO 80004-1:2023 смысл соответствующего понятия смещается в сторону идентификации их пространственного расположения.

Важно отметить, что термины и определения в стандартах ISO 80004-1:2023, ГОСТ ISO/TS 80004-1–2017 и ГОСТ ISO/TS 80004-2–2017 сформулированы с учетом форм и размеров нанообъектов. Помимо размера и формы нанообъектам присущи иные параметры (состав, морфология поверхности, кристаллическая структура), оказывающие значительное влия-

ние на электрические, магнитные, оптические, каталитические и другие ключевые свойства нанообъектов. Также отметим, что при возникновении соответствующей необходимости стандартами ГОСТ ISO/TS 80004-1–2017 и ГОСТ ISO/TS 80004-2–2017 допускается трансформация включенных в них терминов без искажения содержания и уменьшения объема формулировок: «Приведенные определения можно при необходимости изменять, вводя в них произвольные признаки, раскрывая значения используемых в них терминов, указывая объекты, относящиеся к определенному понятию. Изменения не должны нарушать объем и содержание понятий, определенных в настоящем стандарте» [25, 26].

Таблица 3.2

**Понятие «наноструктура»
по ISO/TS 80004-1:2015 и ISO 80004-1:2023**

ISO/TS 80004-1:2015	ISO 80004-1:2023
<p>Наноструктура – композиция из взаимосвязанных составных частей различных веществ, одна или несколько из которых имеют линейные размеры в нанодиапазоне.</p> <p><i>Примечание:</i> граница между составными частями определяется границей прекращения свойств</p>	<p>Наноструктура – это поверхностный или внутренний элемент с одним или несколькими измерениями в нанодиапазоне.</p> <p><i>Примечание:</i> наноструктурные элементы включают нанообъекты, структуры, морфологии или другие идентифицируемые области наноразмерной величины, но не ограничиваются этим. Наноструктура может представлять собой нанопору или стабильный элемент на поверхности объекта</p>

В стандарте ISO 80004-1:2023 [34] впервые вводится термин «**нанообъекты, их агрегаты и агломераты**» (НОАА), определяемый как «материал, содержащий нанообъекты, их агрегаты и агломераты». В данном стандарте отмечается, что **НОАА** включают объекты с одним, двумя или тремя внешними измерениями в наномасштабе (сферы, волокна, трубки и т. д.) в качестве первичных структур. **НОАА** также могут состоять из

отдельных первичных наноструктур и агрегированных или агломерированных систем, включая структуры с размерами более 100 нм.

В стандартах ISO 80004-1:2023 и ГОСТ ISO/TS 80004-1–2017 отмечается:

– «важным инструментом для обеспечения единого понимания и согласованного применения нанотехнологий в прикладных областях является стандартизация терминов и определений»;

– «по мере появления новых знаний возникает потребность в разработке устойчивой терминологии, основанной не только на геометрических размерах и формах наноматериалов, но и на технических и эксплуатационных характеристиках преднамеренно изготавливаемых нанообъектов и наноструктурированных материалов»;

– «существует необходимость в обеспечении промышленности и исследовательских организаций соответствующими нормативными техническими инструментами, содействующими разработке и применению **НТ**, а также обмену информацией между специалистами»;

– «всегда остается проблема определить сложные понятия так, чтобы они имели смысл и практическое значение для заинтересованных сторон в области исследований, промышленного применения и государственного регулирования»;

– «как и нанотехнологии, термины и определения понятий в этой области развиваются, становясь все более конкретными и точными».

Таким образом, данные стандарты предназначены для обеспечения взаимодействия между организациями и отдельными специалистами, осуществляющими свою деятельность в области **НТ** и **НМ**, в том числе при их применении в производстве. В табл. 3.3, 3.4 приводятся основные термины в области **НМ** по ISO 80004-1:2023, ГОСТ ISO/TS 80004-1–2017 и ГОСТ ISO/TS 80004-2–2017 на русском языке, а также их эквиваленты на английском языке.

**Стандартизованные термины и определения из стандартов
ISO 80004-1:2023 и ГОСТ ISO/TS 80004-1–2017 на русском языке,
а также их эквиваленты на английском языке**

Термины и определения на русском языке	Англо-язычный эквивалент
<p>Нанодиапазон – диапазон линейных размеров приблизительно от 1 до 100 нм (1÷100 нм). <i>Примечание:</i> уникальные свойства нанобъектов проявляются преимущественно в пределах данного диапазона</p>	Nanoscale
<p>Научные основы нанотехнологий – система знаний о материи, в которой размерные и структурные свойства и явления проявляются в нанодиапазоне и отличаются от тех, которые присущи отдельным атомам, молекулам или объектам размерами, превышающими нанодиапазон</p>	Nanoscience
<p>Наноматериал – твердый или жидкий материал, полностью или частично состоящий из структурных элементов, размеры которых хотя бы по одному измерению находятся в нанодиапазоне. <i>Примечание:</i> наноматериал является общим термином для таких понятий, как «совокупность нанобъектов» и «наноструктурированный материал»</p>	Nanomaterial
<p>Нанобъект – дискретная часть материала, линейные размеры которой по одному, двум или трем измерениям находятся в нанодиапазоне. <i>Примечание:</i> внешние линейные размеры нанобъекта определяют по трем измерениям</p>	Nanoobject
<p>Наноструктура – композиция из взаимосвязанных составных частей различных веществ, одна или несколько из которых имеют линейные размеры в нанодиапазоне. <i>Примечание:</i> граница между составными частями определяется границей прекращения свойств</p>	Nano-structure
<p>Наноструктурированный материал – материал, имеющий внутреннюю или поверхностную наноструктуру. <i>Примечание:</i> настоящее определение не исключает наличия у нанобъекта внутренней или поверхностной структуры. Рекомендуется применять термин «нанобъект» к элементу наноструктурированного материала, если его линейные размеры по одному, двум или трем измерениям находятся в нанодиапазоне</p>	Nano-structured material

Термины и определения на русском языке	Англо-язычный эквивалент
Наноразмерный эффект – эффект, возникающий вследствие наличия нанобъектов или участков размерами в нанодиапазоне	Nanoscale phenomenon
Наноразмерное свойство – характеристика объекта или участка в нанодиапазоне	Nanoscale property

Таблица 3.4

**Стандартизованные термины и определения из стандартов
ISO 80004-1:2023 и ГОСТ ISO/TS 80004-2–2017 на русском языке,
а также их эквиваленты на английском языке**

Термины и определения на русском языке	Англо-язычный эквивалент
Частица – мельчайшая часть вещества с определенными физическими границами. <i>Примечания:</i> 1) физическая граница может также быть описана как межфазная область взаимодействия (интерфейс); 2) частица может перемещаться как единое целое; 3) настоящее определение частицы применимо к нанобъектам	Particle
Наночастица – нанобъект, линейные размеры которого по всем трем измерениям находятся в нанодиапазоне, а размеры длин в направлении самой короткой и самой длинной из осей не имеют существенных отличий. <i>Примечание:</i> если по одному или двум измерениям размеры нанобъекта значительно больше, чем по третьему измерению (как правило, более чем в три раза), то вместо термина «наночастица» можно использовать термины «нановолокно» или «нанопластина»	Nanoparticle
Первичная частица – исходная частица для формирования агломератов, агрегатов или их смеси. <i>Примечания:</i> 1) частицы-компоненты агломератов и агрегатов обычно являются агрегатами, но иногда могут быть отнесены к первичным частицам; 2) агломераты и агрегаты относят к вторичным частицам	Primary particle

Термины и определения на русском языке	Англо-язычный эквивалент
<p>Частица-компонент – частица, являющаяся неотъемлемой частью более крупной частицы.</p> <p><i>Примечание:</i> в структуру частицы-компонента могут входить первичные или вторичные частицы</p>	Constituent particle
<p>Агломерат – совокупность слабо- или среднесвязанных между собой частиц, площадь внешней поверхности которой равна сумме площадей внешних поверхностей ее отдельных компонентов.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) силы, скрепляющие агломерат в одно целое, являются слабыми и обусловленными, например, силами взаимодействия Ван-дер-Ваальса или простым физическим переплетением частиц друг с другом; 2) агломераты также называют «вторичными частицами», а составляющие их исходные частицы – «первичными частицами»</p>	Agglomerate
<p>Агрегат – совокупность сильно связанных между собой или сплавленных частиц, общая площадь внешней поверхности которой значительно меньше суммы площадей поверхностей ее отдельных компонентов.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) силы, удерживающие частицы в составе агрегата, являются прочными и обусловлены, например, ковалентными или ионными связями, или образованы в результате спекания, или сложного физического переплетения частиц друг с другом, или другим способом объединения первичных частиц; 2) агрегаты также называют «вторичными частицами», а составляющие их исходные частицы – «первичными частицами»</p>	Aggregate
<p>Нановолокно – нанообъект, линейные размеры которого по двум измерениям находятся в нанодиапазоне, а по третьему измерению значительно больше.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) наибольший линейный размер может находиться вне нанодиапазона; 2) допускается применять термины синонимы «нанофибрилла» или «нанонить»</p>	Nanofibre
<p>Нанопластина – нанообъект, линейные размеры которого по одному измерению находятся в нанодиапазоне, а размеры по двум другим измерениям значительно больше.</p> <p><i>Примечание:</i> наибольшие линейные размеры могут находиться вне нанодиапазона</p>	Nanoplate

Термины и определения на русском языке	Англо-язычный эквивалент
Наностержень , нанопруток – жесткое сплошное нановолокно	Nanorod
Нанотрубка – полое нановолокно	Nanotube
Нанопроволока – нановолокно, являющееся проводником или полупроводником электрического тока	Nanowire
Нанолента – нанопластина, у которой один из наибольших линейных размеров существенно превышает другой	Nanoribbon, nanotape
Наносфера , сферический нанобъект – нанобъект, имеющий шарообразную форму. <i>Примечание:</i> для наименования полых биологических нанобъектов применяют термин «нанокапсула»	Nanosphere
Нанолуковица – наночастица, образованная несколькими сфероподобными концентрическими оболочками	Nanoonion
Наноконус – нановолокно или наночастица, имеющее конусообразную форму	Nanocone
Нанокристалл – нанобъект, имеющий кристаллическую структуру	Nanocrystal
Наночастица «ядро-оболочка» – наночастица, состоящая из ядра и одной или нескольких оболочек. <i>Примечание:</i> у наночастицы «ядро-оболочка» наибольший внешний линейный размер (включающий размеры диаметра ядра и толщины оболочки) находится в нанодиапазоне. У сферических наночастиц «ядро-оболочка» наибольшим внешним линейным размером является размер наружного диаметра	Core-shell

В стандарте ISO 80004-1:2023, равно как и в его предшественнике ISO/TS 80004-1:2015, демонстрируется пример взаимосвязи определений понятий «наноматериал», «нанобъект» и «наноструктурированный материал». В данном стандарте также рассматриваются три основных нанобъекта (наночастица, нановолокно и нанопластина), в подавляющем большинстве случаев идентифицируемых не в виде изолированных или обособленных образований, а в укрупненном состоянии благодаря высо-

кой площади поверхности (а значит, и поверхностной энергии), которая обуславливает интенсивные взаимодействия между ними. Отметим, что иерархическая взаимосвязь (рис. 3.2) не исключает наличия у нанообъекта внутренней или поверхностной наноструктуры.



Рис. 3.2. Схематическое представление иерархии терминов «наноматериал», «нанообъект» и «наноструктурированный материал» [34]

В стандарте ISO 80004-1:2023 поясняется, что как таковые особенности кристаллического строения веществ (трехмерное расположение атомов или молекул, образующих кристаллит; ближний порядок атомов в аморфной или квазиаморфной фазах; границы зерен и межфазные гра-

ницы раздела, дислокации и т. д.) не являются достаточными для их рассмотрения как наноструктурированных материалов.

Необходимыми и достаточными признаками для подобной классификации материалов следует считать их структурно-фазовый состав: наличие зерен (нанокристаллов, нанокристаллитов), значительная доля которых обладает соответствующими наномасштабу размерами; присутствие пустот и пор или преципитатов в наноразмерном масштабе (т. е. нанообъекты в твердой матрице). Аналогично на поверхностях почти всех материалов содержатся морфологические и химические неоднородности в наноразмерном масштабе, однако далеко не все они могут считаться наноструктурированными. Только подвергнутые *направленному модифицированию или текстурированию* материалы, поверхности которых содержат морфологические или химические неоднородности в наноразмерном масштабе, являются *наноструктурированными*.

Как показывает рис. 3.2, взаимосвязанные понятия «нанопокрытие», «нанослой» и «нанопленка» относятся к нанообъектам, поскольку их внешний размер (толщина) находится в нанодиапазоне. Соответствие характерных размеров элементов внутренней структуры наноструктурированных слоев, покрытий и пленок нанодиапазону выступает основанием для их рассмотрения в качестве наноструктурированных материалов (например, наноструктурированные покрытия, нанокомпозитные покрытия, дисперсионные покрытия с дисперсными нанообъектами). Следует отметить, что такие нанообъекты, как нанослои, нанопокрытия и нанопленки могут являться элементами или отдельными частями более крупных наноструктурированных материалов.

Рис. 3.3 иллюстрирует понятийное содержание терминов «нанообъект» (частица–компонент), «агрегат» и «агломерат», содержащихся в ГОСТ ISO/TS 80004-2–2017 [26] и представленных в табл. 3.4.

В ходе анализа наноматериалов с дисперсным составом большинство наночастиц из-за их геометрических размеров относят к ультрамелким частицам (*ultrafine particle*), эквивалентный диаметр которых не превышает 0,1 мкм. В случае, когда размеры нанообъекта в одном или двух направ-

лениях значительно превышают аналогичный параметр в третьем направлении (как правило, более чем в три раза), вместо термина «наночастица» рекомендуется использовать термины «нановолокно» или «нанопластина» (рис. 3.2).

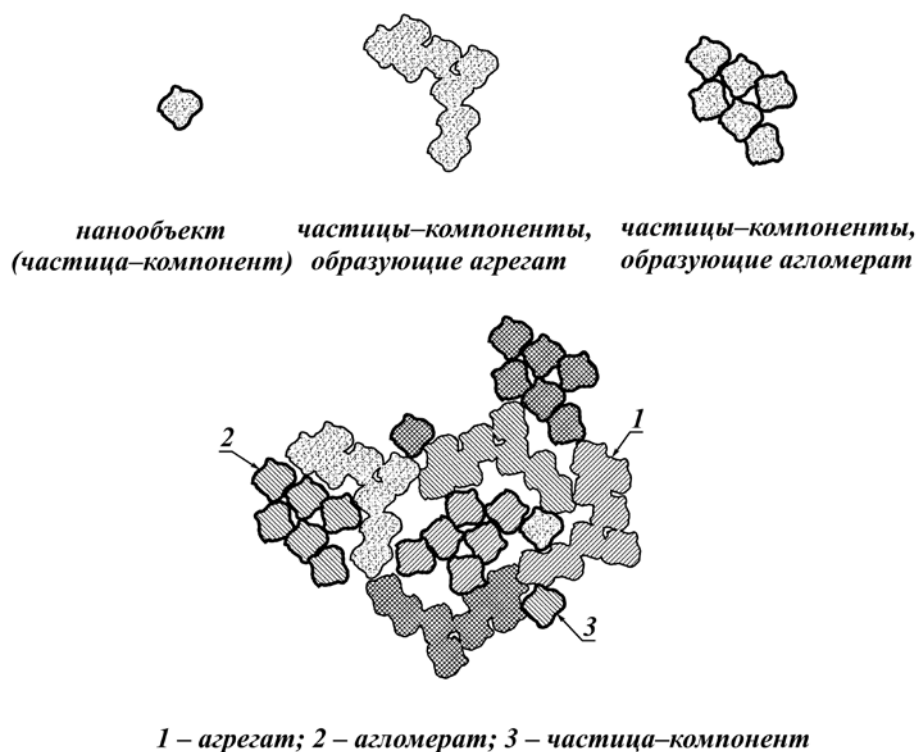


Рис. 3.3. Схематические изображения отдельного нанобъекта (частицы-компонента) и частиц-компонентов, образующих агрегаты и агломераты [26]

Ввиду многочисленности ассоциированных с областью наноматериалов понятий в *прил. А, Б, В и Г* вынесены стандартизованные термины и определения на русском языке, а также их эквиваленты на английском языке из следующих ГОСТов:

- ГОСТ ISO/TS 80004-3-2014. Нанотехнологии. Часть 3. Нанобъекты углеродные. Термины и определения – *прил. А*;
- ГОСТ ISO/TS 80004-4-2016. Нанотехнологии. Словарь. Часть 4. Наноструктурированные материалы – *прил. Б*;
- ГОСТ ISO/TS 80004-5-2014. Нанотехнологии. Часть 5. Нано-/био-интерфейс. Термины и определения – *прил. В*;

– ГОСТ ISO/TS 80004-6–2014. Нанотехнологии. Часть 6. Характеристики нанообъектов и методы их определения. Термины и определения – *прил. В*;

– ГОСТ ISO/TS 80004-11–2014. Нанотехнологии. Словарь. Часть 11. Нанослой, нанопокрывание, нанопленка и связанные с ними термины – *прил. Г*.

От анализа определений и формулировок на понятийном уровне перейдем к классификации наноматериалов по различным основаниям и признакам. В настоящее время основным действующим документом, регламентирующим классификацию и категоризацию наноматериалов по различным признакам и основаниям, является технический отчет ISO/TR 11360:2010. *Nanotechnologies – Methodology for the classification and categorization of nanomaterials* [35] (Нанотехнологии. Методология классификации и категоризации наноматериалов), разработанный профильным техническим комитетом (ISO/TC 229 «Нанотехнологии») Международной организации по стандартизации.

Отчет ISO/TR 11360:2010 содержит систему классификации, обеспечивающую принципиальную возможность категоризации широкого диапазона базисных наноматериалов (нанообъектов, наноструктур и нанокompозитов), обладающих широким разнообразием различных физических, химических, магнитных и биологических характеристик. Представленная в Техническом отчёте ISO/TR 11360:2010 система классификации называется «**нанодерево**»; она не обладает универсальным характером и подлежит дальнейшей переработке, поскольку не охватывает полностью весь диапазон существующих и перспективных наноматериалов.

Вместе с тем, используемые в отчёте ISO/TR 11360:2010 размерный и системно-иерархический подходы могут рассматриваться в качестве методологии научных исследований, а также содействовать разработке технологических процессов в промышленном производстве и коммерциализации нанотехнологий. «Нанодерево» образовано из четырех основных категорий (размерность, внутренняя / внешняя структура и тип наноматериала, химическая природа / идентичность и свойства / поведение); осно-

ваниями для описания взаимосвязей и различий между наноматериалами выступают их размеры и ключевые функциональные характеристики (рис. 3.4).

На рис. 3.5 представлена классификация наноматериалов по размерности «C1», а также по внутренней и внешней структуре «C2». В отчете ISO/TR 11360:2010 по размерности наноматериалы подразделяются на три основные категории: одно- (*1D*), дву- (*2D*) и трехмерные (*3D*). С точки зрения внутренней или внешней структуры наноматериал может быть отнесен к одно- или мультикомпонентным нанобъектам, либо к наноструктурированным материалам.



Рис. 3.4. Схематическое представление системы классификации наноматериалов «нанодерево» [35]

На рис. 3.5 в дополнительной колонке, обозначенной «C2C» (тип материала), приводятся примеры основных достаточно хорошо изученных к настоящему времени наноматериалов, а также выделено место для потенциального расширения «нанодерева» благодаря будущим разработкам. Определения всех представленных на рис. 3.5 наноматериалов содержатся в основном тексте данного пособия либо приводятся в одном из приложений.

Согласно рис. 3.6 наноматериалы могут классифицироваться по своей идентичности и химической природе. Подобная дифференциация отражает влияние химической природы или типа связи на физико-механические свойства наноматериалов, которые необходимо учитывать. Следует отметить, что композитные наноматериалы могут содержать, по крайней мере, две или более компоненты из колонки C3. Например, дисперсия двумерного диоксида титана может рассматриваться как ансамбль керамических наночастиц, распределенных в органической матрице (*2D*-нанокompозит).

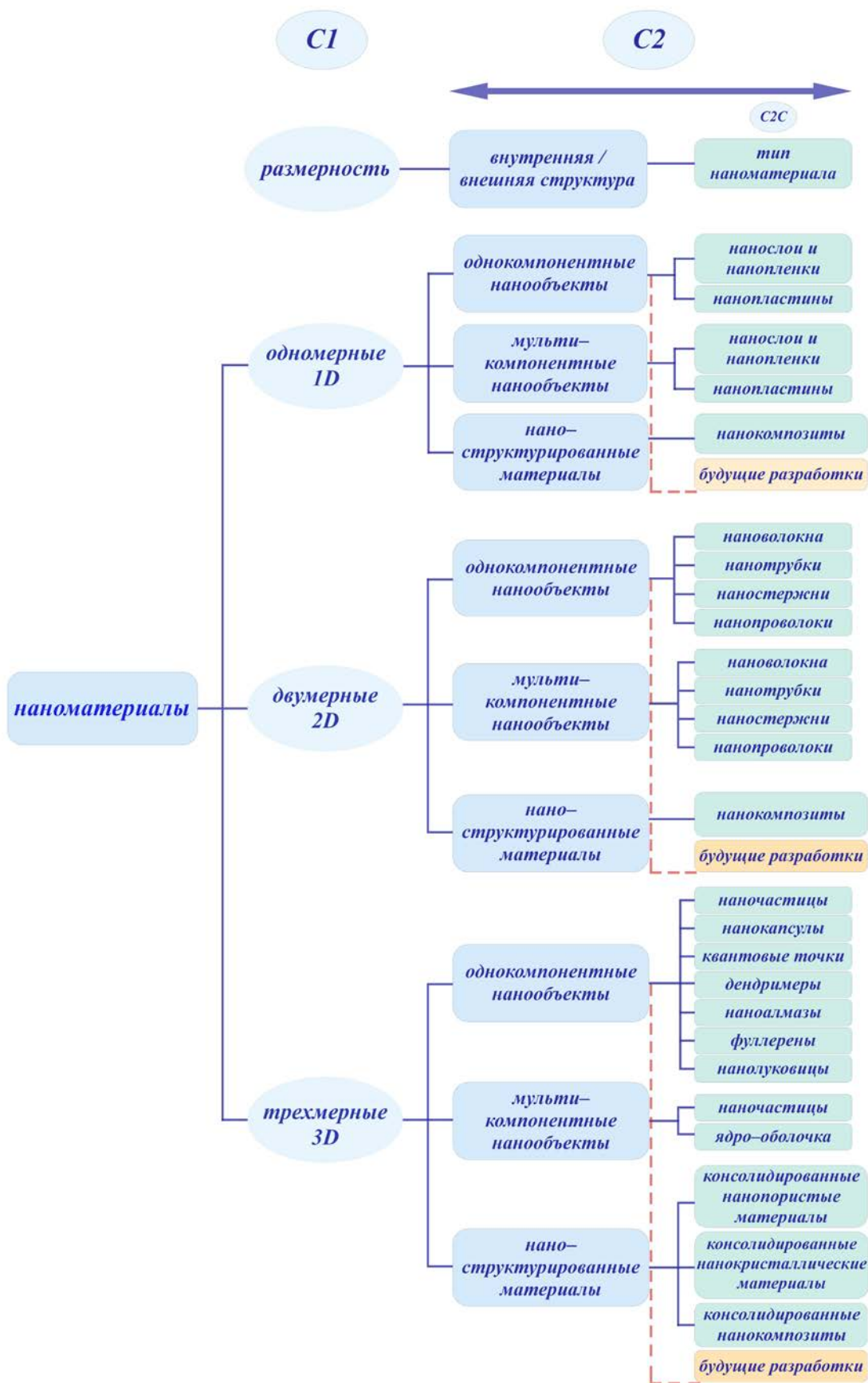


Рис. 3.5. Классификация НМ по размерности, по внутренней и внешней структуре [35]



Рис. 3.6. Классификация **НМ** по химической природе (идентичности) [35]

На рис. 3.7 показан завершающий систему классификации «нанодерево» столбец *C4*, использующийся для отображения ключевых свойств и характеристик наноматериалов – физических, механических, химических, биологических, а также их комбинаций.



Рис. 3.7. Классификация **НМ** по свойствам и характеристикам [35]

Перечисленные на рис. 3.7 свойства наноматериалов выступают основаниями для классификации конкретного нанообъекта и(или) наноструктуры. Например, к физическим свойствам относятся электрические, магнитные, оптические, тепловые и акустические характеристики.

Кроме того, в ходе классификации наноматериалов необходимо также учитывать следующие комбинированные свойства: магнитооптические, электрооптические, пьезоэлектрические, пироэлектрические, термоэлектрические и электромагнитные. Вышеупомянутые свойства в свою очередь дополнительно дифференцируются на подкатегории на основе различных измеряемых характеристик и параметров наноматериалов.

Таким образом, классификация «нанодерево» отражает существующее в науке понимание структуры **НМ** и взаимосвязей между ними, а также обеспечивает принципиальную возможность для классификации наноматериалов по размерам и ключевым функциональным свойствам.

Задания для самостоятельного выполнения

Задание 3.1. Выполните литературный поиск и приведите примеры трех различных наноматериалов (нанообъектов) в соответствии с вариантом из табл. 3.5. Используйте для этого теоретические сведения из текущего раздела.

Таблица 3.5

Наноматериал или нанообъект по вариантам

Номер варианта	1	2	3	4
Наноматериал (нанообъект)	Нановолокно	Наносфера	Нанопена	Нанолента
Номер варианта	5	6	7	8
Наноматериал (нанообъект)	Наностержень	Нанолуковица	Наноаэрозоль	Нанокompозит
Номер варианта	9	10	11	12
Наноматериал (нанообъект)	Нанопленка	Наноконус	Нанофольга	Наноэмульсия

Номер варианта	13	14	15	16
Нanomатериал (нанобъект)	Нанотрубка	Наночешуйка	Наносуспензия	Нанопокрытие
Номер варианта	17	18	19	20
Нanomатериал (нанобъект)	Наномембрана	Наночастица «ядро-оболочка»	Квантовая точка	Нано-провода
Номер варианта	21	22	23	24
Нanomатериал (нанобъект)	Наноструктурированный порошок	Наноструктурированный агломерат	Наноструктурированная капсула	Наноструктурированная частица «ядро-оболочка»

Отчет о выполнении задания должен содержать таблицу с данными: 1) о размерах, 2) функциональном назначении и 3) направлениях практического применения каждого наноматериала (нанобъекта), а также 4) об используемых для их получения (синтеза) нанотехнологиях. Сформулируйте выводы.

Задание 3.2. Проведите классификацию наноматериалов (нанобъектов) по следующим основаниям: 1) по размерности; 2) внутренней и внешней структуре; 3) химической природе (идентичности); 4) свойствам и основным характеристикам. Используйте для этого результаты литературного поиска, полученные в ходе выполнения задания 3.1, в соответствии с вариантом из табл. 3.5. Сформулируйте выводы.

Контрольные вопросы

1. Поясните этимологию понятий «наука», «технология» и «производство».

2. Охарактеризуйте взаимосвязь между современной наукой и технологией, поясните ее специфику.

3. Сформулируйте определение термина «нанонаука», поясните специфику данного термина.

4. Сформулируйте определение термина «нанометровый масштаб» (наномасштаб, нанодиапазон).

5. Сформулируйте выводы по результатам анализа действующих в области наноматериалов и нанотехнологий стандартов.

6. Объясните, в чем заключаются различия в трактовках понятия «наноструктура» в действующем стандарте и стандарте-предшественнике.

7. Перечислите подходы к формулировке терминов и определений нанообъектов в действующих в области наноматериалов и нанотехнологий стандартах.

8. Перечислите параметры, оказывающие значительное влияние на ключевые свойства нанообъектов.

9. Сформулируйте определение термина «научные основы нанотехнологий».

10. Сформулируйте определение термина «наноматериал».

11. Сформулируйте определение терминов «нанообъект» и «частица-компонент».

12. Сформулируйте определение терминов «наноструктура» и «наноструктурированный материал».

13. Сформулируйте определение терминов «наноразмерный эффект» и «наноразмерное свойство».

14. Сформулируйте определение термина «наночастица».

15. Сформулируйте определение терминов «первичная частица», «вторичная частица».

16. Сформулируйте определение термина «агломерат», «агрегат».

17. Сформулируйте определение термина «нанообъекты, их агрегаты и агломераты».

18. Сформулируйте определение термина «нановолокно».

19. Сформулируйте определение терминов «нанопластина» и «наностержень».

20. Сформулируйте определение терминов «нанотрубка» и «нанопро-волока».
21. Сформулируйте определение терминов «нанолента», «наносфера».
22. Сформулируйте определение терминов «нанолуковица» и «нано-частица „ядро-оболочка”».
23. Сформулируйте определение терминов «нанокристалл» и «нано-конус».
24. Объясните, в чем заключаются особенности иерархической си-стемы определений терминов «наноматериал», «нанообъект» и «нано-структурированный материал».
25. Сформулируйте определение терминов «нанопокрытие», «нано-слой» и «нанопленка».
26. Объясните, каковы особенности взаимосвязи между понятиями «нанопокрытие», «нанослой» и «нанопленка».
27. Объясните принципы и особенности системы классификации «нанодерево».

4. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОПРОИЗВОДСТВО. ТЕРМИНОЛОГИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

В таблице 3.1 (Стандарты в области наноматериалов и нанотехнологий) приводятся ссылки на ГОСТ ISO/TS 80004-1–2017, ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016, ГОСТ Р 55723-2013, а также не имеющий в настоящее время русскоязычного эквивалента стандарт ISO 80004-1:2023, в которых содержатся не рассмотренные в предыдущем разделе термины и определения, непосредственно связанные с нанотехнологическим производством и нанопродукцией. Таким образом, понятия, термины и определения, касающиеся промышленных наноматериалов, а также нанотехнологий и нанопроизводства, представлены в текущем разделе.

Сформулированное в вышеназванных стандартах определение термина «нанотехнология» (табл. 4.1) не является однозначным, всеобъемлющим и окончательным; ряд понятийных аспектов (естественно-научный, синергетический, феноменологический, функциональный, экономический и т. д.) в нем не затрагивается, рассматривается недостаточно подробно либо неявно. Более того, на структурно-организационном уровне содержание термина «нанотехнология» по ISO 80004-1:2023 и ГОСТ ISO/TS 80004-1–2017 входит в противоречие с альтернативными формулировками, например: «нанотехнология – это возможность создания материалов, устройств и систем с атомарной точностью», «...способность работать на молекулярном уровне, атом за атомом формируя более крупные структуры с принципиально новой молекулярной организацией и свойствами для получения эффективно функционирующих и контролируемых на атомарном, молекулярном и супрамолекулярном уровнях устройств с их последующим применением» [36, 19]. Или в более краткой форме: «нанотехнологии – это искусство и наука манипулирования материей на атомарном и молекулярном уровне» [37]. Различия в смысловом содержании данных формулировок с приведенными в стандартах ISO 80004-1:2023 и ГОСТ

ISO/TS 80004-1–2017 определениями свидетельствуют о развивающемся характере нанонауки и нанотехнологий.

На рис. 4.1 отражена взаимосвязь различных областей научного знания, являющихся основами нанотехнологии.



Рис. 4.1. Области научного знания, являющиеся основами нанотехнологии [38]

В соответствии с рис. 4.1 к фундаментальным наукам, являющимся основой нанотехнологии, относятся **физика, химия, инженерия и биология**. Синергетический характер нанотехнологии также отражает следующее определение: «нанотехнология – это сочетание научных, инженерных и технологических факторов на наноуровне» [39].

Феноменологический аспект рассматриваемого понятия наиболее полно отражен в следующей формулировке: «нанотехнология – это технология создания функциональных материалов, устройств и систем посредством управления веществом в нанометровом масштабе, а также использования новых явлений и свойств (физических, химических, биологических) в этом размерном диапазоне» [24].

С точки зрения прикладного, производственно-технологического аспекта **нанотехнология** – это:

– применение нанонауки в промышленном производстве для достижения целевых показателей коммерческой деятельности (обеспечения экономической эффективности) предприятия;

– технологии развития традиционных, а также инновационных отраслей промышленности от электроники, энергетики и биомедицины до аэрокосмической промышленности, способствующие формированию эффективной и рентабельной экономики и обеспечивающие значительный вклад в устойчивый экономический рост.

С точки зрения реализуемых функций нанотехнологии представляют собой совокупность методов и средств, позволяющих контролируемым образом создавать наноматериалы, а также оперировать ими, т. е. применять по тому или иному назначению. В общем случае нанотехнологии обеспечивают решение трех взаимосвязанных задач:

- 1) получение наноматериалов с заданной структурой и свойствами;
- 2) применение наноматериалов по определенному назначению с учетом их структуры и свойств;
- 3) контроль (исследование) структуры и свойств наноматериалов в ходе их применения и получения.

Сравнительный анализ понятий «**нанонаука**» и «**нанотехнология**» приводит к выводу о существовании между ними неразрывной взаимосвязи, которая реализуется посредством **наноматериалов** (материалов, структурные элементы которых обладают соответствующей нанодиапазону размерностью в одном или нескольких измерениях).

В табл. 4.1 и 4.2 приводятся основные термины в области нанотехнологий и нанотехнологического производства по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 и по ГОСТ ISO/TS 80004-2–2017 на русском языке, а также их эквиваленты на английском языке по стандартам ISO/TS 80004-8:2020 и ISO 80004-1:2023.

**Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8–2016,
а также их эквиваленты на английском языке**

Термины и определения на русском языке	Англо-язычный эквивалент
<p>Нанотехнология – применение научных знаний для изучения, проектирования, производства и управления строением материальных объектов преимущественно в нанодиапазоне с использованием зависящих от размера и структуры свойств этих объектов или присущих им явлений, которые могут отсутствовать у отдельных атомов и молекул или аналогичных макрообъектов.</p> <p><i>Примечание:</i> производство и управление строением включают в себя синтез и обработку материалов</p>	Nano-technology
<p>Технический наноматериал – наноматериал, изготовленный для конкретного применения или реализации заданной функции</p>	Engineered nanomaterial
<p>Промышленный наноматериал – наноматериал, преднамеренно изготовленный с заданными свойствами и/или составом</p>	Manufactured nanomaterial
<p>Побочный наноматериал – наноматериал, непреднамеренно образующийся в ходе процесса.</p> <p><i>Примечание:</i> к понятию «процесс» относят технологические, биотехнологические и иные процессы</p>	Incidental nanomaterial
<p>Нанотехнологическое изготовление – совокупность действий, направленных на преднамеренное изготовление объектов, устройств или их элементов, размеры которых находятся в нанодиапазоне, в коммерческих целях</p>	Nano-fabrication
<p>Нанотехнологическое производство – преднамеренный синтез, изготовление или управление свойствами наноматериалов или отдельные этапы процесса изготовления в нанодиапазоне в коммерческих целях</p>	Nano-manufacturing
<p>Процесс нанотехнологического производства – совокупность мероприятий, направленных на преднамеренный синтез, изготовление или управление свойствами наноматериалов, или отдельные этапы процесса изготовления в нанодиапазоне в коммерческих целях</p>	Nano-manufacturing process

Термины и определения на русском языке	Англо-язычный эквивалент
Нанотехнологическая продукция – продукция, уникальные эксплуатационные и функциональные характеристики которой получены с применением нанотехнологий	Nano-enabled
Наноулучшенная продукция – продукция, изготовленная с применением нанотехнологий, обеспечивающих улучшение заданных эксплуатационных и функциональных характеристик продукции	Nano-enhanced

Таблица 4.2

**Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-2–2017
на русском языке, их эквиваленты на английском языке**

Термины и определения на русском языке	Англо-язычный эквивалент
Технический нанообъект – нанообъект, изготовленный для конкретного применения или реализации заданной функции. <i>Примечание:</i> наименование и определение термина аналогичны наименованию и определению термина «технический наноматериал» в ISO/TS 80004-1	Engineered nanoobject
Промышленный нанообъект – нанообъект, преднамеренно изготовленный с заданными свойствами и/или составом. <i>Примечание:</i> наименование и определение термина аналогичны наименованию и определению термина «промышленный наноматериал» в ISO/TS 80004-1	Manufactured nanoobject
Побочный нанообъект – нанообъект, непреднамеренно образующийся в ходе процесса. <i>Примечания:</i> 1) наименование и определение термина изложены по аналогии с термином «побочный наноматериал» и его определением, установленными в ISO/TS 80004-1–2017; 2) к понятию «процесс» относят технологические, биотехнологические и иные процессы	Incidental nanoobject

В стандартах ISO/TS 80004-8:2020 и ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 [31] содержится ряд следующих ключевых для области нанотехнологий и нанотехнологического производства понятий и положений:

– в рамках **нанотехнологического производства (НТП)** научные открытия и новые знания внедряются в область нанотехнологий для **изготовления продукции наноиндустрии**;

– коммерциализация нанотехнологий, разработанных в научно-исследовательских лабораториях, их масштабирование в массовое производство должны выполняться с учетом результатов системного анализа и оценки всех стадий жизненного цикла продукции наноиндустрии. Разработка продукции и подготовка к серийному производству, управление, контроль качества и надежности технологических процессов, а также утилизация продукции наноиндустрии должны обеспечивать безопасность сотрудникам предприятий, потребителям и окружающей среде;

– в рамках нанотехнологического производства осуществляется освоение в промышленных масштабах процессов самосборки и направленной самосборки, синтеза наноматериалов, а также производства продукции на их основе;

– в нанотехнологическом производстве применяют технологии «сверху вниз» и «снизу вверх», обеспечивающие возможность изготовления нанообъектов или систем нанообъектов на молекулярном уровне с последующим их встраиванием в более крупные объекты или системы;

– характеристики конечной продукции наноиндустрии определяются совокупностью свойств нанообъектов и наноматериалов, используемых при ее изготовлении с применением нанотехнологий;

– понятия «нанотехнологическое производство» и «наноизготовление» не являются тождественными. Понятие «нанотехнологическое производство» является более широким, поскольку включает не только способы изготовления наноматериалов (в том числе синтез), но и методы их обработки;

– наноматериалы представляют собой продукцию производственно-технического назначения, изготавливаемую для выпуска конечной продукции (например, наноматериалы применяют при производстве композитов или в качестве компонентов различных систем или устройств);

– стандартизация терминов в области процессов нанотехнологического производства призвана обеспечить взаимопонимание между организациями и отдельными специалистами из разных стран, должна способствовать скорейшему масштабированию нанотехнологий из научных лабораторий к серийному выпуску и коммерциализации продукции nanoиндустрии.

Необходимо отметить, что в представленных в табл. 4.1 определениях «нанотехнологическое производство» и «процесс нанотехнологического производства» делается акцент на синтезе, изготовлении или контроле наноматериалов, а в определении «нанотехнологическое изготовление» – на объектах, устройствах или их элементах».

Итак, в широком смысле слова понятия «нанотехнология» и «нанотехнологическое производство» ассоциируются с разработкой и выпуском востребованного на рынке конечного продукта (нанотехнологической продукции, наноулучшенной продукции) в промышленных масштабах. В соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 процессы нанотехнологического производства являются большой и разнообразной группой производственных процессов, применяемых в различных вертикально ориентированных сферах промышленности – от аэрокосмической и энергетической отрасли до биомедицины и фармацевтики (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Отрасли промышленного производства нанотехнологической продукции [31]

На рис. 4.2 представлены отрасли промышленного производства **нанотехнологической (наноулучшенной) продукции** в соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016. Анализ рис. 4.2 приводит к выводу о том, что нанотехнология – это горизонтально ориентированная конвергентная технология, охватывающая все, в том числе вертикально-интегрированные отрасли промышленности [19].

Важно отметить, что при условии возникновения соответствующей необходимости стандартами [26, 31, 34] допускается видоизменение содержащихся в них определений посредством добавления к последним произвольных дополнительных признаков, но без нарушения объема и содержания исходных понятий. Однако, с одной стороны, далеко не все формулировки удовлетворяют данным требованиям. Например, в работе [40] приводится альтернативное упрощенное определение понятия «**нанопроизводство**», которое трактуется как производство материалов и структур, обладающих характерными размерами от 1 до 100 нм, по крайней мере, в одном из пространственных измерений. Вместе с тем, представленная в ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 стандартизация нанотехнологического производства в соответствии с принципами «*сверху вниз*» и «*снизу вверх*», напротив, представляет собой излишне упрощенный подход и не отражает все многообразие и сложность современного нанопроизводства, классификация которого должна быть дополнена категорией **комбинированных (гибридных) технологий** [40]. Важно отметить, что в ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 фигурирует термин «**иерархическая сборка**» (hierarchical assembly), под которым понимается технология применения более одного процесса нанотехнологического производства для управления сборкой объекта, осуществляемой в любой последовательности. В данном контексте *иерархическая сборка* может косвенно рассматриваться в качестве аналога *гибридных нанотехнологий*.

Концептуальная схема, соответствующая представленным в ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 принципам изготовления наноматериалов «сверху вниз» и «снизу вверх», показана на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Концептуальная схема способов изготовления наноматериалов по принципу «сверху вниз» и «снизу вверх» [17]

При этом технологии получения нанообъектов из макроскопических объектов (объемных материалов) представляют собой нанотехнологическое производство по принципу «сверху вниз», а технологии использования в качестве исходного материала атомов, молекул и(или) нанообъектов для формирования более крупных и функционально сложных структур или конструкций относятся к нанотехнологическому производству по принципу «снизу вверх» (рис. 4.4).

В соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 и рис. 4.4 процессы нанотехнологического производства, организованного по принципу «**снизу вверх**», включают пять укрупненных категорий, из которых *соосаждение, направленная сборка и самосборка* в свою очередь подразделяются на различные нанотехнологические процессы. Вместе с тем процессы нанотехнологического производства, организованного по принципу «**сверху вниз**», в ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 в явном виде не выделены.

Определения всех представленных на рис. 4.4 процессов нанотехнологического производства по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 приводятся в прил. Д.

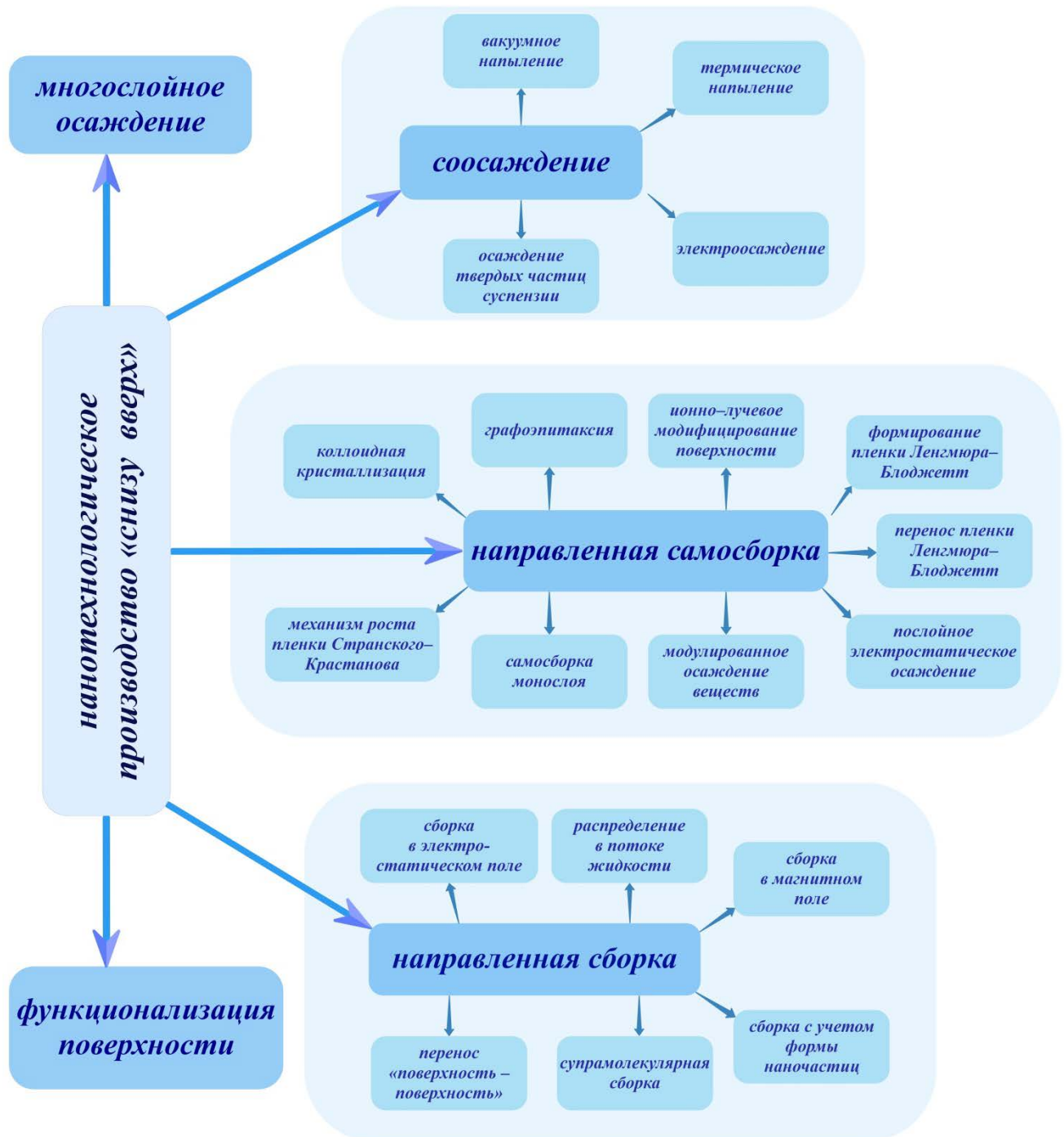


Рис. 4.4. Процессы НТП по принципу «снизу вверх» [31]

В ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 также представлена обширная группа терминов и понятий, ассоциированных с процессами синтеза наноматериалов, классификация которых выполняется в зависимости от агрегатного состояния фазы (газовая, жидкая или твердая фаза), в которой реализуется синтез, а также характера (физический, химический) нанотехнологического процесса (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Методология классификации процессов синтеза наноматериалов в зависимости от агрегатного состояния фазы и характера процесса [31]

Представленная на рис. 4.5 классификация процессов синтеза наноматериалов выполнена в зависимости от агрегатного состояния фазы и характера нанотехнологического процесса.

Физическое осаждение из газовой фазы (ФОГФ). Под физическим осаждением из газовой фазы (*physical vapour deposition, PVD*) понимается процесс нанесения покрытия испарением исходного материала с последующей его конденсацией на подложке в условиях вакуума. На рис. 4.6

демонстрируется классификация методов ФОГФ, используемых для синтеза наноматериалов. Определения всех представленных на рис. 4.6 методов по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 приводятся в *прил. Е*.



Рис. 4.6. Методы физического осаждения из газовой фазы, используемые для синтеза наноматериалов

Химическое осаждение из газовой фазы (ХОГФ). Под химическим осаждением из газовой фазы (*chemical vapor deposition, CVD*) понимается процесс получения пленок или порошков в результате термических реакций разложения и(или) взаимодействия одного или нескольких исходных газообразных веществ на подложке. На рис. 4.7 в обобщенном виде показана классификация методов ХОГФ, используемых для синтеза наноматериалов. Определения всех представленных на рис. 4.7 методов по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 приводятся в *прил. Ж*.

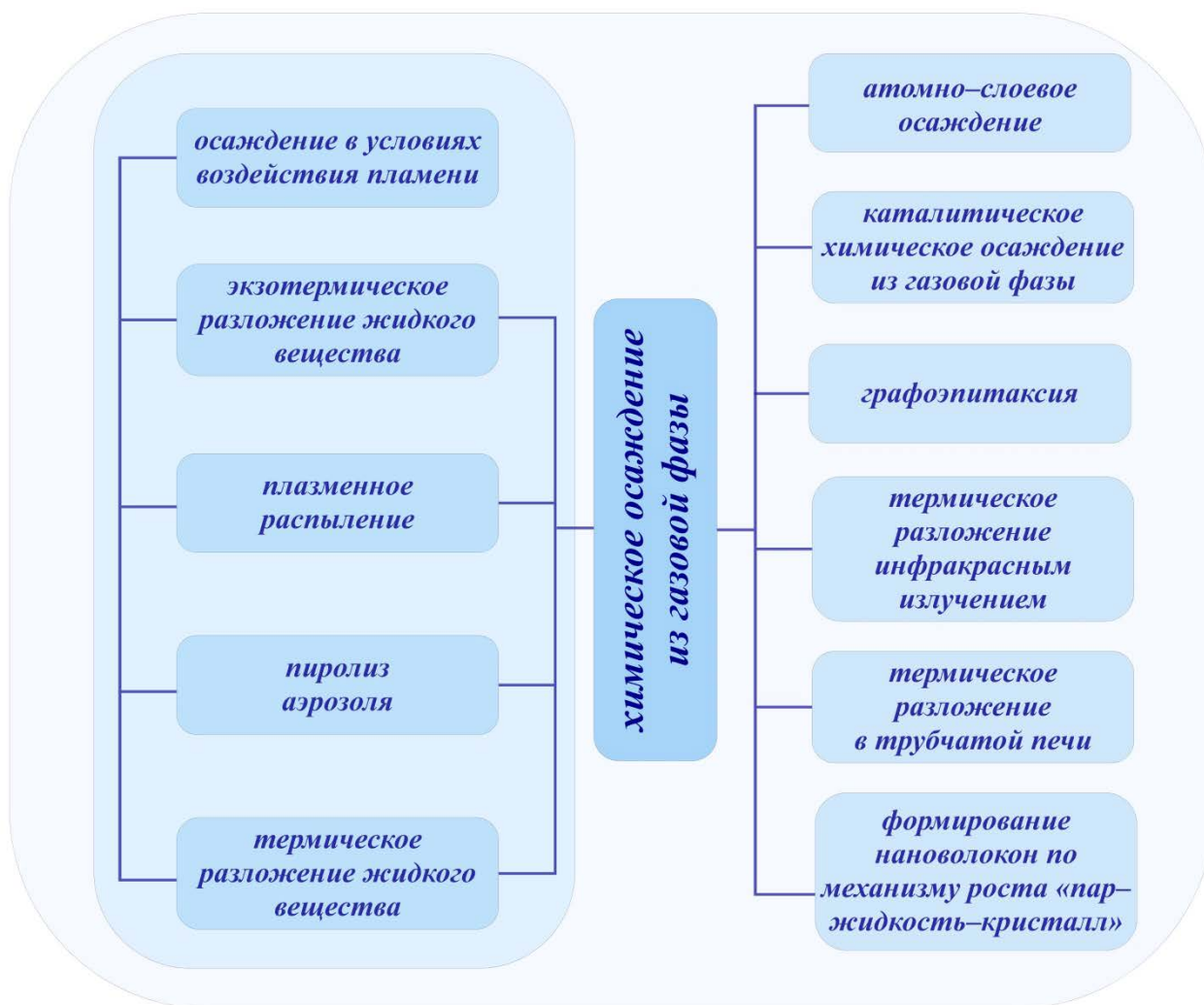


Рис. 4.7. Методы химического осаждения из газовой фазы, используемые для синтеза наноматериалов

Анализ представленных на рис. 4.6 и 4.7 процессов свидетельствует об энергоемкости большинства методов физического и химического осаждения из газовой фазы, а также о широком использовании процессов испарения, напыления и распыления для получения НМ. Стоит отметить, что метод термического разложения ИК-излучением может быть реализован как при ФОГФ, так и при ХОГФ.

Процессы синтеза в жидкой фазе являются менее распространенными по сравнению с осаждением из газовой фазы или синтезом в твердой фазе. На рис. 4.8 представлены физические и химические методы синтеза в жидкой фазе.

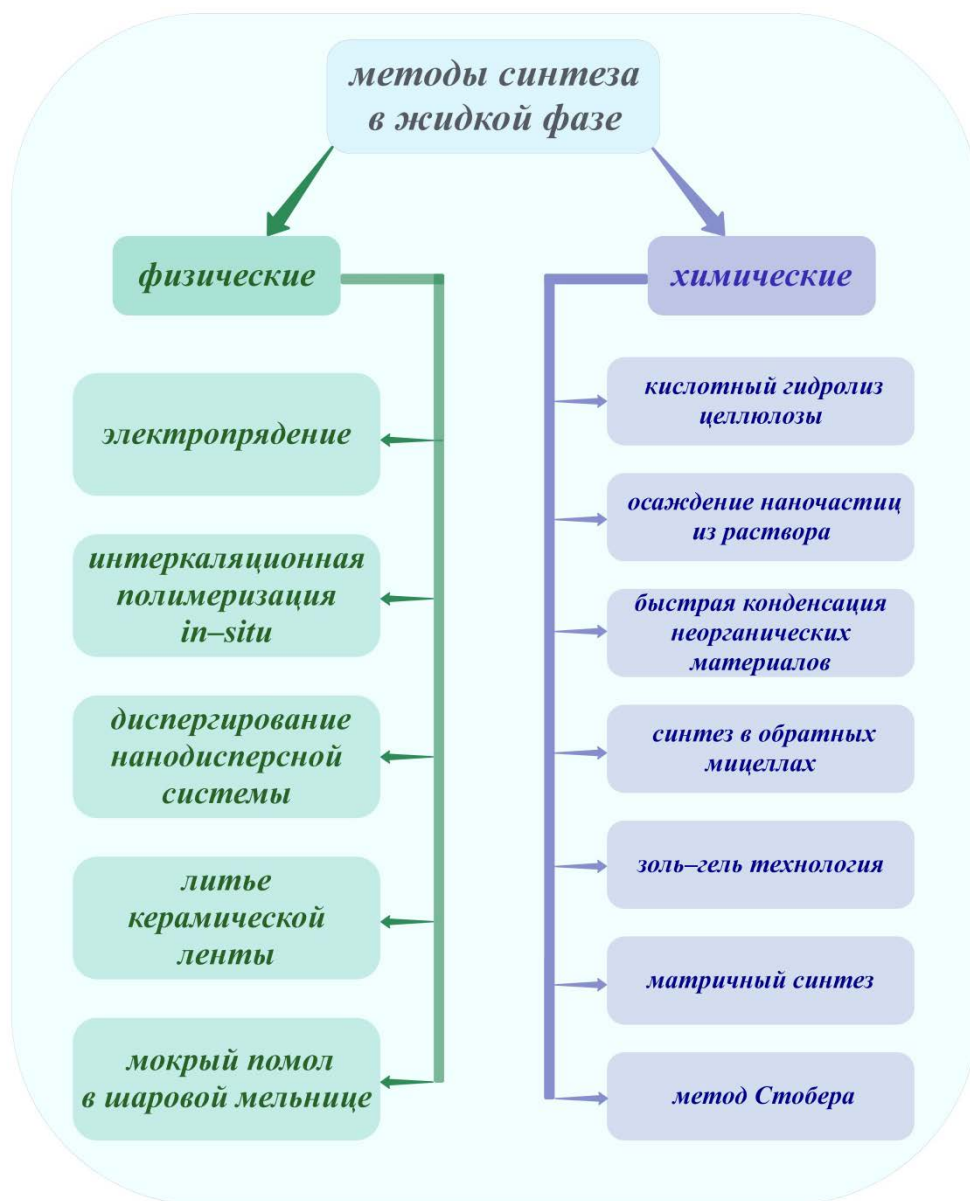


Рис. 4.8. Физические и химические жидкофазные методы, используемые для синтеза наноматериалов

Определения всех представленных на рис. 4.8 физических и химических методов синтеза в жидкой фазе в соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 приводятся в *прил. И*.

Из всех нанотехнологических процессов и методов твердофазный синтез исторически является самым разработанным научно-технологическим направлением, а соответствующие данной категории физические и химические методы получения НМ являются наиболее распространенными в современном нанотехнологическом производстве. На рис. 4.9 де-

монстрируются используемые для получения наноматериалов физические и химические методы синтеза в твердой фазе по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

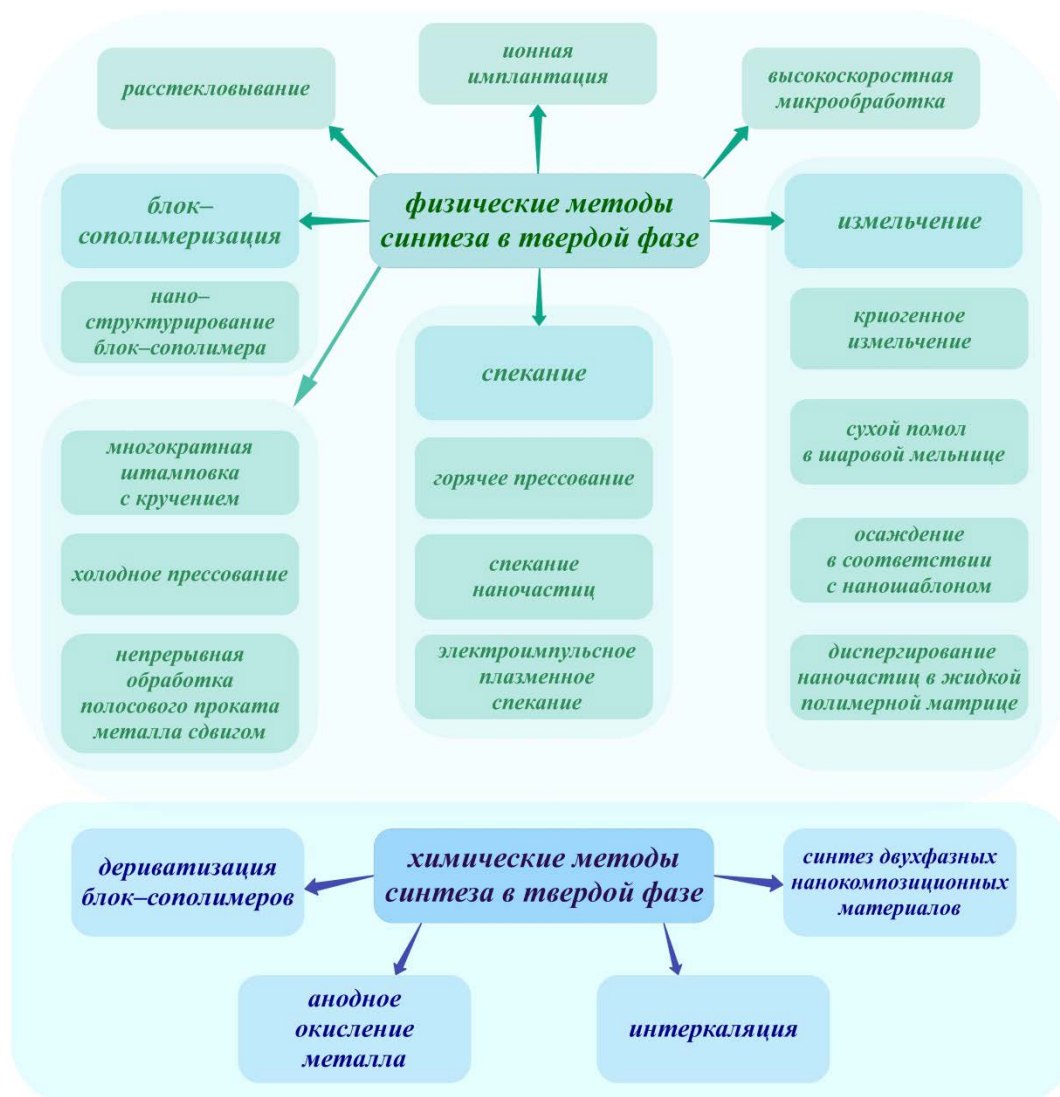


Рис. 4.9. Физические и химические методы синтеза в твердой фазе, используемые для получения наноматериалов

В прил. К приводятся определения всех представленных на рис. 4.9 физических методов синтеза в твердой фазе в соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016. Следует отметить, что многократная штамповка с кручением, холодное прессование и непрерывная обработка полосового проката металла сдвигом относятся к группе методов интенсивного пластического деформирования, применяемых на различных этапах произ-

водственного процесса. Определения всех представленных на рис. 4.9 химических методов синтеза в твердой фазе в соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 приводятся в *прил. Л*.

На рис. 4.10 перечислены процессы осаждения, применяемые для изготовления наноулучшенной продукции. Определения процессов осаждения, приведенных на рис. 4.10 и не упомянутых ранее, представлены в соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 в *прил. М*.

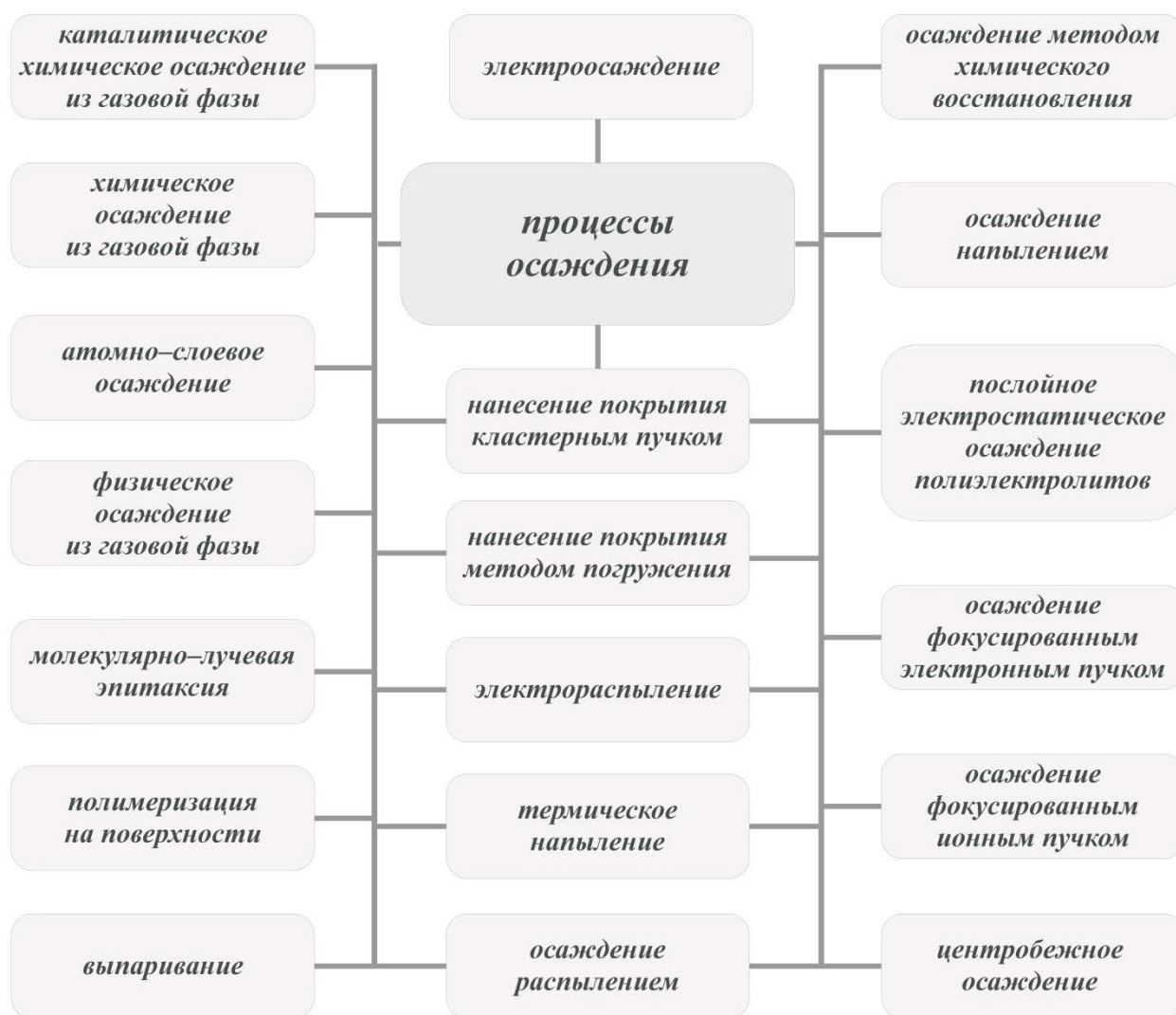


Рис. 4.10. Процессы осаждения, применяемые для изготовления наноулучшенной продукции

На рис. 4.11 представлены процессы нанолитографии, используемые для изготовления наноулучшенной продукции. Определения всех пред-

ставленных на рис. 4.10 нанолитографических процессов, применяемых для изготовления наноулучшенной продукции, приводятся в соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 в *прил. Н*.

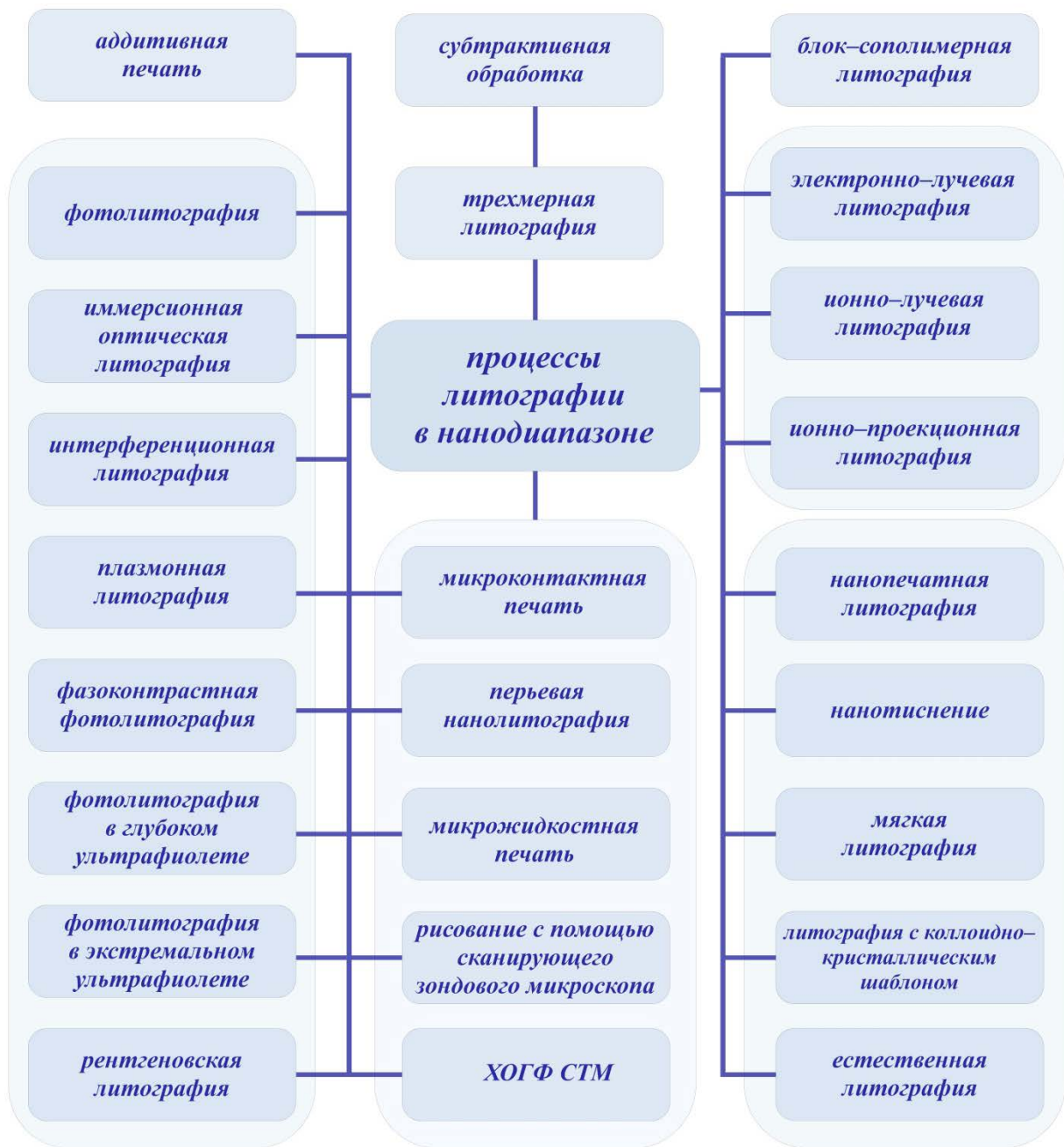


Рис. 4.11. Процессы нанолитографии, применяемые для изготовления наноулучшенной продукции

Помимо процессов осаждения и нанолитографии, отличающихся разнообразием и широким применением для изготовления наноулучшенной

продукции, в ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 также детерминированы определения нанотехнологических методов, относящихся к процессам печати, нанесения покрытий и травления. В группу терминов и определений понятий, относящихся к процессам печати и нанесения покрытий, включены *тиснение или импринтинг* (embossing, imprinting), *формирование многослойной пленки* (multilayer film process), *осаждение нановолокон* (nanofibre precipitation) и *напыление наночастиц* (nanoparticle spray coating). При этом под импринтингом понимается процесс получения рельефного изображения посредством вдавливания шаблона с заданным рисунком в слой обрабатываемого материала. Соединение нескольких отдельных пленок на подложке посредством вальцовки обеспечивает возможность формирования многослойной пленки. Осаждение нановолокон – это процесс получения покрытия или структуры объекта осаждением нановолокон из раствора на подложку или ее заданные участки. Наконец, процесс получения покрытия напылением наночастиц реализуется в ходе соударения НЧ с подложкой, с их последующим соединением благодаря применению распыляемого раствора, плазмы, кластерного пучка или другого источника наночастиц.

Применяемые на отдельных этапах нанотехнологического процесса методы травления характеризуются широкой вариативностью, классифицируются по характеру воздействия (физическое, химическое), используемому в качестве травителя веществу или типу энергетического воздействия (плазма, ионный пучок, оптическое, лазерное или рентгеновское излучение), а также по степени пространственной однородности формируемых у наноструктуры свойств (изотропное, анизотропное и кристаллографическое травление). Широкое распространение в нанотехнологическом производстве получили *селективное лазерное травление* (selective etching) и лазерная абляция (*laser ablation*), соответственно обеспечивающие возможность управляемого удаления ионным пучком поверхностного слоя материала с подложки с различной скоростью на разных участках поверхности, а также формирования наноразмерных неоднородностей лазерным импульсом.

Задания для самостоятельного выполнения

Задание 4.1. Выполните литературный обзор не менее 5 публикаций из высокорейтинговых журналов, посвященных синтезу наноматериалов и(или) получению наноулучшенной продукции с применением соответствующего варианту из табл. 4.1 процесса синтеза или нанотехнологического процесса. Используйте теоретические сведения из текущего раздела.

Таблица 4.1

Наименование процесса синтеза или НТП по вариантам

Номер варианта	1	2	3	4
Процесс синтеза или НТП	Направленная сборка	Направленная самосборка	Много-слойное осаждение	Графо-эпитаксия
Номер варианта	5	6	7	8
Процесс синтеза или НТП	Распределе-ние в потоке жидкости	Сборка в магнитном поле	Сборка с уче-том формы наночастиц	Супра-молекулярная сборка
Номер варианта	9	10	11	12
Процесс синтеза или НТП	Перенос «по-верхность – поверхность»	Коллоидная кристаллиза-ция	Сборка в электроста-тическом поле	Модулирован-ное осаждение веществ
Номер варианта	13	14	15	16
Процесс синтеза или НТП	Ионнолуче-вое модифи-цирование поверхности	Формирова-ние пленки Ленгмюра – Блоджетт	Перенос пленки Ленгмюра – Блоджетт	Послойное электро-статическое осаждение
Номер варианта	17	18	19	20
Процесс синтеза или НТП	Механизм роста пленки Странского – Крастанова	Холодное газодинами-ческое напыление	Термическое разложение инфракрасным излучением	Электронно-лучевое испарение
Номер варианта	21	22	23	24
Процесс синтеза или НТП	Самосборка монослоя	Электро-искровое осаждение	Сублима-ционная сушка	Распыли-тельная сушка

Отчет о выполнении задания должен содержать: 1) изображение и описание схемы (схем) процесса (метода синтеза); 2) описание преимуществ и недостатков процесса (метода синтеза); 3) перечень функциональных наноматериалов и(или) устройств, для изготовления которых применяется рассматриваемый процесс (метод синтеза), а также примеров их практического применения.

Задание 4.2. Выполните литературный обзор не менее 5 публикаций из высокорейтинговых журналов, посвященных синтезу наноматериалов и(или) получению наноулучшенной продукции с применением соответствующего варианту из табл. 4.2 процесса синтеза или нанотехнологического процесса. Используя теоретические сведения из текущего раздела.

Таблица 4.2

Наименование процесса синтеза или НТП по вариантам

Номер варианта	1	2	3	4
Процесс синтеза или НТП	Электрический взрыв проволоки	Плазменное распыление	Пиролиз аэрозоля	Атомно-слоевое осаждение
Номер варианта	5	6	7	8
Процесс синтеза или НТП	Электропрядение	Золь–гель технология	Матричный синтез	Метод Стобера
Номер варианта	9	10	11	12
Процесс синтеза или НТП	Блок-сополимеризация	Ионная имплантация	Криогенное измельчение	Спекание наночастиц
Номер варианта	13	14	15	16
Процесс синтеза или НТП	Трехмерная литография	Аддитивная печать	Ионно-лучевая литография	Рентгеновская литография
Номер варианта	17	18	19	20
Процесс синтеза или НТП	Перьевая нанолитография	Нанопечатная литография	Нанотиснение	Электроосаждение
Номер варианта	21	22	23	24
Процесс синтеза или НТП	Электро-распыление	ОФЭП	ОФИП	МЛЭ

Содержание отчета о выполнении задания должно соответствовать требованиям, перечисленным в задании 4.1.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение понятия «нанотехнология» по ГОСТ ISO/TS 80004-8–2016.

2. Приведите альтернативные формулировки понятия «нанотехнология».

3. Перечислите области научного знания, являющиеся основами нанотехнологии.

4. Сформулируйте взаимосвязанные задачи, решение которых обеспечивает применение нанотехнологий.

5. Сформулируйте определение понятия «нанотехнологическое производство» в соответствии с ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

6. Сформулируйте определение понятия «нанотехнологическое изготовление» по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

7. Прокомментируйте содержательные различия понятий «нанотехнологическое производство» и «нанотехнологическое изготовление».

8. Сформулируйте основные цели, достигаемые благодаря стандартизации терминов и понятий в области процессов нанотехнологического производства.

9. Сформулируйте определение понятия «процесс нанотехнологического производства» по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

10. Сформулируйте определение понятия «нанотехнологическая продукция» по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

11. Сформулируйте определение понятия «наноулучшенная продукция» по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

12. Сформулируйте определение понятия «технический нанообъект» по ГОСТ ISO/TS 80004-2-2017.

13. Сформулируйте определение понятия «промышленный нанообъект» по ГОСТ ISO/TS 80004-2-2017.

14. Сформулируйте определение понятия «побочный нанообъект» по ГОСТ ISO/TS 80004-2-2017.

15. Перечислите основные отрасли промышленного производства нанотехнологической продукции по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

16. Сформулируйте определение понятия «иерархическая сборка» по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

17. Перечислите принципы стандартизации нанотехнологического производства по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016, поясните их смысл.

18. Выполните классификацию процессов нанотехнологического производства по принципу «снизу вверх».

19. Объясните сущность методологии классификации процессов синтеза наноматериалов.

20. Сформулируйте определение понятия «физическое осаждение из газовой фазы» по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

21. Сформулируйте определение понятия «химическое осаждение из газовой фазы» по ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016.

22. Перечислите основные методы физического осаждения из газовой фазы, используемые для синтеза наноматериалов.

23. Перечислите основные методы химического осаждения из газовой фазы, используемые для синтеза наноматериалов.

24. Перечислите основные физические и химические жидкофазные методы, используемые для синтеза наноматериалов.

25. Перечислите основные физические и химические методы синтеза в твердой фазе, используемые для получения наноматериалов.

26. Перечислите основные процессы осаждения, применяемые для изготовления наноулучшенной продукции.

27. Перечислите основные нанолитографические процессы, применяемые для изготовления наноулучшенной продукции.

28. Перечислите основные процессы печати и нанесения покрытий, применяемые для изготовления наноулучшенной продукции.

29. Перечислите основные процессы травления, применяемые для изготовления наноулучшенной продукции.

30. Сформулируйте определение селективного травления и лазерной абляции.

5. ЦИФРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОПЕЧАТЬ

Стремительное развитие нанотехнологий обуславливает актуальность разработки и внедрения рациональных подходов к проектированию и производству современных функциональных наноматериалов.

Традиционные технологии, несмотря на повсеместное применение в различных отраслях производства, обладают рядом значительных недостатков: 1) ограниченность возможностей изготовления изделий неправильной геометрической формы, 2) сложность проектирования материалов на наноуровне и 3) необходимость оптимизации отходов, а также снижения стоимости производства. К одной из проблем современного производства также относится разнообразие потребительского спроса, рыночный запрос на индивидуализацию изделий.

В зависимости от способа трансформации формы и размеров обрабатываемых материалов традиционные технологии подразделяются на **субтрактивное** и **аддитивное** производство (рис. 5.1).

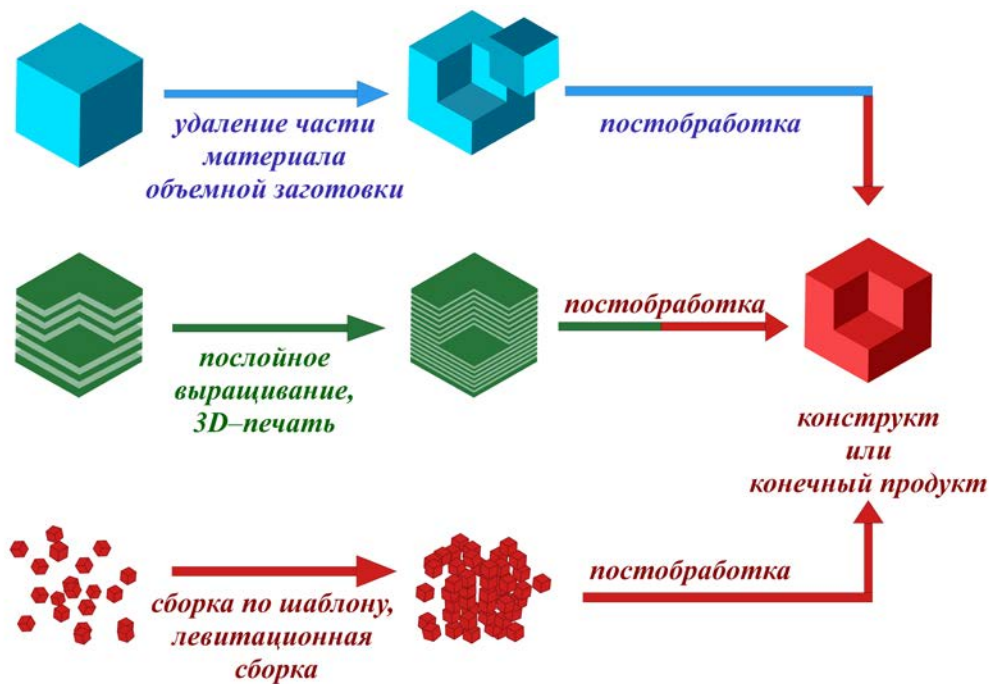


Рис. 5.1. Схематическое изображение субтрактивного, аддитивного и формативного способов производства [41]

К субтрактивному производству преимущественно относятся технологии механической обработки резанием (фрезерование, точение, сверление и т. д.), обеспечивающие изменение геометрических параметров изделий или полуфабрикатов посредством удаления определенной части материала в ходе обработки. Традиционные технологии формативного производства (гибка, литье,ковка и т. д.) реализуются за счет внешних деформационных и (или) термических воздействий на обрабатываемые материалы, способствуя трансформации их формы и размеров. В отличие от традиционных технологий в современном **формативном нанопроизводстве** для создания желаемой конструкции используется физический молд – форма, шаблон или матрица.

Цифровое проектирование и управление производственным процессом является одним из многообещающих подходов к решению проблем, сопутствующих традиционным технологиям производства. **Аддитивное производство**, также известное как **3D-печать**, представляет собой интенсивно развивающуюся технологию цифрового производства, заключающуюся в послойном изготовлении материалов произвольной формы и размеров. К аддитивным технологиям, реализуемым на основе цифровизации производственного процесса, относятся **стереолитография, сплавление в псевдооживленном слое, струйная печать, направленное энергетическое осаждение, селективное лазерное спекание**. Вместе с тем, огромное разнообразие существующих материалов обуславливает необходимость совершенствования технологий аддитивной печати с одной стороны для расширения номенклатуры материалов, используемых в производстве, с другой – для повышения производительности технологического процесса и миниатюризации выпускаемых изделий.

По сравнению с традиционными технологиями производства изготовление материалов, организованное на основе цифрового контроля их морфологии, состава и структуры, обладает высокоинтеграционным и универсальным характером. Вместе с тем, как свидетельствуют последние достижения в области науки, именно миниатюризация является ключевой проблемой технологий цифрового аддитивного производства, поскольку

свойства объемных материалов и наноматериалов значительно различаются. В настоящее время на основе цифрового подхода активно разрабатываются способы разрешения проблемы миниатюризации изделий посредством консолидации наночастиц различной природы, размеров и форм в монолитную структуру с морфологией, заданной в цифровом формате.

К технологиям наноструктурирования и наносборки материалов относятся оптическая нанопечать, реализующая цифровое управление лазерным лучом для изготовления 2D и 3D наноразмерных изделий методом послойного выращивания (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Перспективные направления цифрового производства НМ [42]

В технологиях оптической нанопечати в качестве исходного строительного материала используются коллоидные наночастицы различного химического состава, размеров и форм. Цифровое управление выполняется на этапе имитационного компьютерного моделирования исходного положения наночастиц или внешних силовых и энергетических воздействий на них и обеспечивает возможность направленного формирования 2D- и 3D-ансамблей коллоидных наноразмерных частиц.

Принципы иерархической сборки реализуются в ходе комбинирования процессов ассемблинга с методами печати функциональных устройств на основе наночастиц с уникальными фотоэлектрическими, механическими, магнитными и химическими свойствами (рис. 5.3).

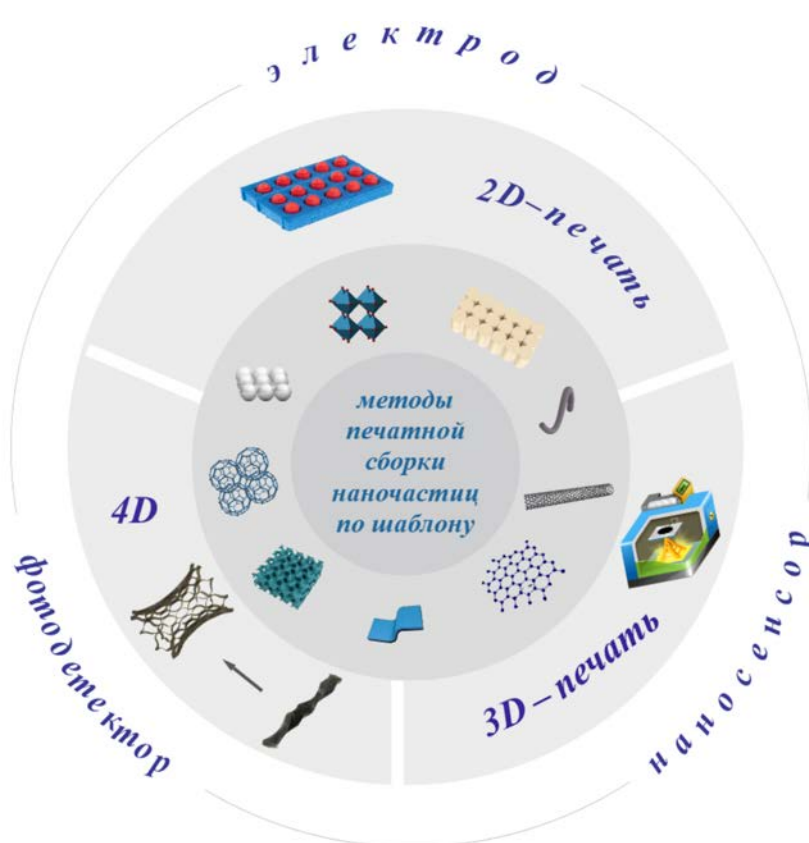


Рис. 5.3. Методы печатной сборки наночастиц по шаблону [43]

В наносенсорике, нанозлектронике и нанокатализе востребованы нанообъекты, их агрегаты и агломераты, а не отдельные наночастицы. Вместе с тем преобразование функциональных НОАА в масштабируемые, управляемые и коммерчески доступные функциональные устройства на сегодняшний день все еще остается перспективной задачей. Технологии нанопечати являются многообещающим направлением аддитивного производства для изготовления устройств из НОАА благодаря возможностям быстрого прототипирования и универсального многофункционального производства, основанного на сочетании технологий самосборки и нанопечати, включая 2D-, 3D- и 4D-печать.

Задание для самостоятельного выполнения

Задание 5.1. Выполните литературный поиск и приведите описание не менее трех различных примеров цифрового производства наноматериалов в соответствии с вариантом из табл. 5.1. Используйте для этого сведения из текущего раздела. Сформулируйте выводы.

Таблица 5.1

Наименование наноматериала или нанобъекта по вариантам

Номер варианта	1	2	3	4
Наноматериал (нанообъект)	Нановолокно	Наносфера	Нанопена	Нанолента
Номер варианта	5	6	7	8
Наноматериал (нанообъект)	Наностержень	Нанолуковица	Наноаэрозоль	Нанокompозит
Номер варианта	9	10	11	12
Наноматериал (нанообъект)	Нанопленка	Наноконус	Нанофольга	Наноэмульсия
Номер варианта	13	14	15	16
Наноматериал (нанообъект)	Нанотрубка	Наночешуйка	Наносуспензия	Нанопокрытие
Номер варианта	17	18	19	20
Наноматериал (нанообъект)	Наномембрана	Наночастица «ядро-оболочка»	Квантовая точка	Нанопрово́лока
Номер варианта	21	22	23	24
Наноматериал (нанообъект)	Наноструктурированный порошок	Наноструктурированный агломерат	Наноструктурированная капсула	Наноструктурированная частица «ядро-оболочка»

Отчет о выполнении задания должен содержать обоснование получения НМ с применением технологий цифрового производства, а также принципиальную схему каждого рассматриваемого НТП. Отчет о выполнении задания также должен содержать библиографическое описание использованных для его выполнения литературных источников.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные недостатки традиционных технологий производства.
2. Сформулируйте ключевую проблему, обуславливающую востребованность ручного труда в современном производстве.
3. Перечислите основные признаки, используемые для классификации современных производственных технологий.
4. Перечислите основные способы трансформации формы и размеров обрабатываемых материалов.
5. Назовите технологическую операцию, применяемую во всех существующих способах производства.
6. Сформулируйте определение традиционных технологий субтрактивного производства.
7. Приведите примеры традиционных технологий субтрактивного производства.
8. Назовите главное отличие формативного нанопроизводства от традиционных производственных технологий.
9. Назовите способ управления производственным процессом, обеспечивающий устранение недостатков, сопутствующих традиционным технологиям производства.
10. Сформулируйте определение аддитивного производства.
11. Перечислите основные технологии аддитивного производства.
12. Объясните, в чем заключается ключевая проблема технологий цифрового аддитивного производства.
13. Поясните, к какому типу нанотехнологий относится оптическая нанопечать, перечислите ее преимущества и объясните, каким образом реализуется этот технологический процесс.
14. Объясните, в чем заключаются основные принципы иерархической сборки функциональных нанообъектов.
15. Перечислите основные методы печатной сборки наночастиц по шаблону, приведите соответствующие примеры.

6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА ДВУМЕРНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Несмотря на обширный перечень процессов синтеза и НТП, представленных в ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016, данный стандарт не охватывает весь спектр нанотехнологий, применяемых в современном производстве.

Такие двумерные материалы, как графен, гексагональный нитрид бора, дихалькогениды переходных металлов (дисульфид молибдена и дисульфид вольфрама) обладают многочисленными уникальными свойствами, однако их коммерческое применение ограничивается недостаточной разработанностью масштабируемых процессов синтеза. ФОГФ и ХОГФ обеспечивают возможность получения двумерных материалов с низкодефектной структурой, вместе с тем высокая себестоимость и трудоемкость процессов не способствуют их внедрению в промышленное производство малослойных и однослойных 2D-материалов. На рис. 6.1 демонстрируются основные способы эксфолиации, применяемые для получения малослойных и однослойных двумерных НМ, – электрохимическая и сдвиговая эксфолиация, микромеханическое расслоение и ультразвуковое диспергирование, а также измельчение в планетарной мельнице.



Рис. 6.1. Наиболее распространенные способы эксфолиации малослойных и однослойных наноматериалов [44]

Наиболее близким к высокоэнергетическому измельчению в планетарной мельнице является единственный стандартизированный в ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 способ эксфолиации – сухой помол в шаровой мельнице.

В большинстве макроскопических материалов со слоистой структурой (графит, дисульфид молибдена или гексагональный нитрид бора) отдельные слои соединяются ориентированным в направлении (001) слабым вандерваальсовым взаимодействием, величина которого варьируется в диапазоне (0,4–4,0) кДж/моль, а длина связи составляет от 0,3 до 0,6 нм в зависимости от материала. При этом внутри отдельных слоев в направлениях (100) и (010) действуют значительно более прочные ковалентные связи (345 кДж/моль и 0,154 нм для углерод–углеродной связи). Сравнительно слабое механическое, химическое или электрохимическое воздействие, приложенное в кристаллографическом направлении (001), обеспечивает нарушение вандерваальсова взаимодействия и выделение слоев нанометровой толщины, обладающих особыми физическими, химическими и механическими свойствами, отсутствующими в их объемных аналогах. Например, уникальные электрические свойства графена (амбиполярное электрическое поле и возможность изменения концентрации носителей заряда при комнатной температуре), а также очень высокое значение масштабного фактора обуславливают применение графена в производстве высокоэффективных аккумуляторов и суперконденсаторов, для которых требуются высокая электропроводность и большая площадь контакта.

Разработка экономически эффективных и высокопроизводительных технологий получения бездефектных двумерных материалов является перспективным направлением исследований; решение задачи масштабирования фундаментальных наноразмерных характеристик слоистых 2D-материалов обеспечит возможность их промышленного производства с последующим использованием в коммерчески доступных продуктах.

Задание для самостоятельного выполнения

Задание 6.1. Выполните литературный поиск и приведите описание не менее трех примеров получения двумерных наноматериалов любым из известных способов эксфолиации в соответствии с вариантом из табл. 6.1. Используйте сведения из текущего раздела. Сформулируйте выводы.

Таблица 6.1

Наименование двумерного наноматериала по вариантам

Номер варианта	1	2	3	4
Двумерный наноматериал	Силицен	Германен	Борофен	Нитрид бора
Номер варианта	5	6	7	8
Двумерный наноматериал	Дисульфид молибдена	Дисульфид вольфрама	Нитрид кремния	Оксид графена
Номер варианта	9	10	11	12
Двумерный наноматериал	Графен	Станен	Плюмбен	Фосфорен
Номер варианта	13	14	15	16
Двумерный наноматериал	Антимонен	Висмутен	Графан	Германан
Номер варианта	17	18	19	20
Двумерный наноматериал	Сульфид титана	Диоксид молибдена	Диоксид вольфрама	Диселенид молибдена
Номер варианта	21	22	23	24
Двумерный наноматериал	Диселенид вольфрама	Диоксид церия	Графито-подобный нитрид углерода	Диоксид ванадия

Отчет о выполнении задания должен содержать обоснование получения наноматериала с применением одного из известных способов эксфолиации, а также принципиальную схему каждого рассматриваемого нанотехнологического процесса. Отчет о выполнении задания также должен содержать библиографическое описание использованных для его выполнения литературных источников.

Контрольные вопросы

1. Поясните, какой класс нанообъектов относится к двумерным наноматериалам, назовите ключевую причину, ограничивающую их массовое производство.

2. Приведите примеры двумерных коммерчески доступных наноматериалов, а также поясните, чем обусловлена уникальность их физико-механических свойств.

3. Назовите причины, обуславливающие ограниченное использование ФОГФ и ХОГФ для производства двумерных наноматериалов.

4. Поясните, в чем основное отличие малослойных и однослойных 2D-наноматериалов.

5. Сформулируйте определение эксфолиации как нанотехнологического процесса.

6. Перечислите основные способы эксфолиации, применяемые для получения малослойных и однослойных двумерных наноматериалов.

7. Объясните, как реализуется электрохимическая эксфолиация.

8. Объясните, как реализуется сдвиговая эксфолиация.

9. Объясните, как реализуется получение малослойных и однослойных 2D-наноматериалов микромеханическим расслоением.

10. Объясните, как реализуется получение малослойных и однослойных 2D-наноматериалов ультразвуковым диспергированием.

11. Объясните, как реализуется получение малослойных и однослойных 2D-наноматериалов измельчением в планетарной мельнице.

12. Укажите диапазон, в котором варьируется величина удельной энергии межслоевого взаимодействия для таких макроскопических материалов, как дисульфид молибдена или гексагональный нитрид бора, назовите соответствующую длину связи.

13. Укажите диапазон значений длин связей межслоевого взаимодействия для таких макроскопических материалов, как дисульфид молибдена или гексагональный нитрид бора.

14. Назовите значение удельной энергии взаимодействия, характерное для углерод–углеродных связей, действующих внутри отдельного графитового слоя, назовите соответствующую длину связи.

15. Назовите значение длины связи действующей внутри отдельного графитового слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термин «нанотехнология» впервые сформулировал японский ученый Норио Танигути в 1974 г. применительно к высокопрецизионной финишной обработке и контролю качества поверхностей материалов с использованием электрических разрядов, микроволнового или лазерного излучения. В настоящее время наноаука, нанотехнологии и нанотехнологическое производство обеспечивают разработку и выпуск востребованного на рынке конечного продукта (нанотехнологической продукции, наноулучшенной продукции) в промышленных масштабах. При этом характеристики конечной продукции наноиндустрии определяются совокупностью свойств наноматериалов, используемых при ее изготовлении с применением нанотехнологий.

Процессы нанотехнологического производства широко применяются в различных сферах промышленности – от аэрокосмической и энергетической отрасли до биомедицины и фармацевтики. Внедрение нанотехнологий в производство способствует снижению его себестоимости, оптимизации процесса сборки, миниатюризации изделий, повышению их эксплуатационных характеристик. В нанотехнологическом производстве применяются технологии «сверху вниз» (получение нанообъектов из объемных материалов) и «снизу вверх» (изготовление нанообъектов или систем нанообъектов на молекулярном уровне с последующим их встраиванием в более крупные объекты или системы), а также гибридные технологии (иерархическая сборка). Коммерциализация нанотехнологий, разработанных в научно-исследовательских лабораториях, их масштабирование в массовое производство должны выполняться с учетом результатов системного анализа и оценки всех стадий жизненного цикла продукции наноиндустрии. Разработка нанотехнологической продукции и подготовка к серийному производству, управление, контроль качества и надежности технологических процессов, а также утилизация продукции наноиндустрии должны обеспечивать безопасность сотрудникам предприятий, потребителям и окружающей среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The Invention of Immersion Ultramicroscopy in 1912 – The Birth of Nanotechnology? / T. Mappes, N. Jahr, A. Csaki [et al.]. – DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201204688> // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2012. – Vol. 51, no. 45. – P. 11208–11212. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201204688> (дата обращения: 07.08.2023).

2. Feynman, R. P. There's Plenty of Room at the Bottom / R. P. Feynman // *Engineering and Science*. – 1960. – Vol. 23, no. 5. – P. 22–36. – URL: <https://calteches.library.caltech.edu/47/> (дата обращения: 07.08.2023).

3. Taniguchi, N. On the Basic Concept of Nano-Technology / N. Taniguchi // *Proceedings of the International Conference on Production Engineering: part II*. – Tokyo: Japan Society of Precision Engineering. – 1974. – P. 18–23. – URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572261550373135488> (дата обращения: 07.08.2023).

4. Taniguchi, N. Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing / N. Taniguchi. – DOI: [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60185-1](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60185-1) // *CIRP Annals*. – 1983. – Vol. 32, no. 2. – P. 573–582. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607601851> (дата обращения: 07.08.2023).

5. Gleiter, H. Materials with Ultra-fine Grain Size / H. Gleiter // *Deformation of Polycrystals: Mechanisms and Microstructures: Proceedings of the 2nd Risø International Symposium on Metallurgy and Materials Science*. – Roskilde: Risø National Laboratory, 1981. – P. 15–21. – URL: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/deformation-of-polycrystals-mechanisms-and-microstructures-procee> (дата обращения: 07.08.2023).

6. Cahn, R. W. Nanostructured materials / R. W. Cahn. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/348389a0> // *Nature*. – 1990. – Vol. 348, no. 6300. – P. 389–390. – URL: <https://www.nature.com/articles/348389a0> (дата обращения: 07.08.2023).

7. Drexler, E. K. Molecular engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation / K. E. Drexler. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.78.9.5275> // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1981. – Vol. 78, no. 9. – P. 5275–5278. – URL: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.78.9.5275> (дата обращения: 07.08.2023).

8. Drexler, E. K. Engines of Creation / K. E. Drexler. – New York : Anchor Press, 1986. – 289 p. – URL: <https://archive.org/details/enginesofcreatio00drex/mode/2up> (дата обращения: 07.08.2023).

9. Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy / G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel. – DOI: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.49.57> // Physical Review Letters. – 1982. – Vol. 49, no. 1. – P. 57–61. – URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.49.57> (дата обращения: 07.08.2023).

10. Binnig, G. Atomic Force Microscope / G. Binnig, C. F. Quate, Ch. Gerber. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.56.930> // Physical Review Letters. – 1986. – Vol. 56, no. 9. – P. 930–933. – URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.56.930> (дата обращения: 07.08.2023).

11. C₆₀: Buckminsterfullerene / H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien [et al.]. – DOI: <https://doi.org/10.1038/318162a0> // Nature. – 1985. – Vol. 318, no. 6042. – P. 162–163. – URL: <https://www.nature.com/articles/318162a0> (дата обращения: 07.08.2023).

12. Iijima, S. Helical Microtubules of Graphitic Carbon / S. Iijima. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/354056a0> // Nature. – 1991. – Vol. 354, no. 6348. – P. 56–58. – URL: <https://www.nature.com/articles/354056a0> (дата обращения: 07.08.2023).

13. “Dip-Pen” Nanolithography / R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu [et al.]. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.283.5402.661> // Science. – 1999. – Vol. 283, no. 5402. – P. 661–663. – URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.283.5402.661> (дата обращения: 07.08.2023).

14. A DNA-Based Method for Rationally Assembling Nanoparticles into Macroscopic Materials / C. A. Mirkin, R. L. Letsinger, R. C. Mucic, J. J. Storhoff. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/382607a0> // Nature. – 1996. – Vol. 382, no. 6592. – P. 607–609. – URL: <http://dx.doi.org/10.1038/382607a0> (дата обращения: 07.08.2023).

15. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov [et al.]. – DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1102896> // Science. – 2004. – Vol. 306, no. 5696. – P. 666–669. – URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1102896> (дата обращения: 07.08.2023).

16. Geim, A. K. The Rise of Graphene / A. K. Geim, K. S. Novoselov. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nmat1849> // Nature Materials. – 2007. – Vol. 6, no. 3. – P. 183–191. – URL: <https://www.nature.com/articles/nmat1849> (дата обращения: 07.08.2023).

17. The Augmentation of Nanotechnology Era: A Concise Review on Fundamental Concepts of Nanotechnology and Applications in Material Science and Technology / S. A. Ahire, A. A. Bachhav, T. B. Pawar [et al.]. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100633> // Results in Chemistry. – 2022. – Vol. 4. – P. 100633. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211715622003526?via%2Fihub> (дата обращения: 07.08.2023).

18. Thakkar, K. N. Biological synthesis of metallic nanoparticles / K. N. Thakkar, S. S. Mhatre, R. Y. Parikh. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nano.2009.07.002> // Nanomedicine: nanotechnology, biology and medicine. – 2010. – Vol. 6, no. 2. – P. 257–262. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1549963409001154> (дата обращения: 07.08.2023).

19. Introduction to Nanoscience / G. L. Hornyak, J. Dutta, H. F. Tibbals, A. Rao. – DOI: <https://doi.org/10.1201/b12835>. – Boca Raton : CRC Press, 2008. – 856 p. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b12835/introduction-nanoscience-gabor-hornyak-joydeep-dutta-anil-rao-tibbals> (дата обращения: 07.08.2023).

20. Madkour, L. H. Nanoelectronic Materials: Fundamentals and Applications / L. H. Madkour. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21621-4>. – Cham : Springer, 2019. – 783 p. – (Advanced Structured Materials. 116). – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-21621-4> (дата обращения: 07.08.2023).

21. Sanjay, S. S. A Brief Manifestation of Nanotechnology / S. S. Sanjay, A. C. Pandey. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-81-322-3655-9_2 // EMR/ESR/EPR Spectroscopy for Characterization of Nanomaterials. – 2017. – Vol. 62. – P. 47–63. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-3655-9_2 (дата обращения: 31.08.2023).

22. Андриевский, Р. А. Прочность наноструктур / Р. А. Андриевский, А. М. Глезер. – DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0179.200904a.0337> // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 4. – С. 337–358. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2009/4/a/> (дата обращения: 31.08.2023).

23. Heyrovska, R. Graphical Comparison of Atomic Sizes with Bohr Radii and Covalent Radii for all the Elements / R. Heyrovska. – DOI: <https://doi.org/10.18483/ijsci.2699> // International Journal of Sciences. – 2023. – Vol. 12, no. 7. – P. 69–74. – URL: <https://www.ijsciences.com/pub/article/2699> (дата обращения: 31.08.2023).

24. Van Hove, M. A. From Surface Science to Nanotechnology / M. A. Van Hove. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.11.059> // Catalysis Today. – 2006. – Vol. 113, no. 3–4. – P. 133–140. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586105008783?via%3Dihub> (дата обращения: 31.08.2023).

25. ГОСТ ISO/TS 80004-1-2017. Нанотехнологии. Часть 1. Основные термины и определения : межгос. стандарт : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 14 сент. 2017 г. № 1125-ст : дата введ. 2018-01-01 / подгот. ВНИИНМАШ // Российский институт стандартизации : офиц. сайт. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6335446.aspx> (дата обращения: 31.08.2023).

26. ГОСТ ISO/TS 80004-2-2017. Нанотехнологии. Часть 2. Нанообъекты. Термины и определения : межгос. стандарт : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 26 дек. 2017 г. № 2093-ст : дата введ. 2018-07-01 / подгот. ВНИИИНМАШ // Российский институт стандартизации : офиц. сайт. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6344028.aspx> (дата обращения: 31.08.2023).

27. ГОСТ ISO/TS 80004-3-2014. Нанотехнологии. Часть 3. Нанообъекты углеродные. Термины и определения : межгос. стандарт : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 28 окт. 2015 г. № 1647-ст : введ. впервые : дата введ. 2016-01-01 / подгот. ВНИИИНМАШ // Российский институт стандартизации : офиц. сайт. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6107108.aspx> (дата обращения: 31.08.2023).

28. ГОСТ ISO/TS 80004-4-2016. Нанотехнологии. Часть 4. Материалы наноструктурированные. Термины и определения : межгос. стандарт : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 9 нояб. 2016 г. № 1646-ст : дата введ. 2017-07-01 / подгот. ВНИИИНМАШ // Российский институт стандартизации : офиц. сайт. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6260503.aspx> (дата обращения: 31.08.2023).

29. ГОСТ ISO/TS 80004-5-2014. Нанотехнологии. Часть 5. Нано-/био-интерфейс. Термины и определения : межгос. стандарт : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 28 окт. 2015 г. № 1648-ст : дата введ. 2016-01-01 / подгот. ВНИИИНМАШ // Российский институт стандартизации : офиц. сайт. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6107084.aspx> (дата обращения: 31.08.2023).

30. ГОСТ ISO/TS 80004-6-2016. Нанотехнологии. Часть 6. Характеристики нанообъектов и методы их определения. Термины и определения : межгос. стандарт : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 9 нояб. 2016 г. № 1647-ст :

дата введ. 2017-07-01 / подгот. ВНИИНМАШ // Российский институт стандартизации : офиц. сайт. – URL:

<https://nd.gostinfo.ru/document/6260497.aspx> (дата обращения: 31.08.2023).

31. ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016. Нанотехнологии. Часть 8. Процессы нанотехнологического производства. Термины и определения : межгос. стандарт : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 9 нояб. 2016 г. № 1648-ст : дата введ. 2017-07-01 / подгот. ВНИИНМАШ // Российский институт стандартизации : офиц. сайт. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6260467.aspx> (дата обращения: 31.08.2023).

32. ГОСТ Р 58039-2017/ISO/TS 80004-11-2017. Нанотехнологии. Словарь. Часть 11. Нанослой, нанопокрывание, нанопленка и связанные с ними термины : нац. стандарт Российской Федерации : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 26 дек. 2017 г. № 2092-ст : введ. впервые : дата введ. 2018-09-01 / подгот. ВНИИНМАШ // Российский институт стандартизации : офиц. сайт. – URL: <https://www.standards.ru/document/6344003.aspx> (дата обращения: 31.08.2023).

33. ГОСТ Р 55723-2013. Нанотехнологии. Руководство по определению характеристик промышленных нанобъектов : нац. стандарт Российской Федерации : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 9 нояб. 2013 г. № 1406-ст : введ. впервые : дата введ. 2014-09-01 / подгот. ВНИИНМАШ // Российский институт стандартизации : офиц. сайт. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/5317982.aspx> (дата обращения: 31.08.2023).

34. ISO 80004-1:2023. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core vocabulary : International standard : Publication date : 2023-07 / prepared by Technical Committee ISO/TC 229 “Nanotechnologies”, Technical Committee IEC/TC 113 “Nanotechnology standardization for electrical and electronic products and systems” and Technical Committee CEN/TC 352 “Nanotechnologies” // International Organization for Standardization : official site. – URL: <https://www.iso.org/standard/79525.html> (дата обращения: 31.08.2023).

35. ISO/TR 11360:2010. Nanotechnologies – Methodology for the classification and categorization of nanomaterials : Technical Report : Publication date : 2010-07 / prepared by Technical Committee ISO/TC 229 «Nanotechnologies» // International Organization for Standardization : official site. – URL: <https://www.iso.org/standard/55967.html> (дата обращения: 31.08.2023).

36. Mansoori, G. A. Nanotechnology – An Introduction for the Standards Community / G. A. Mansoori, T. A. F. Soelaiman. – DOI: <https://doi.org/10.1520/jai13110> // Journal of ASTM International. – 2005. – Vol. 2, no. 6. – P. 13110. – URL: <https://www.astm.org/jai13110.html> (дата обращения: 07.08.2023).

37. Recent Innovations of Nanotechnology in Water Treatment: A Comprehensive Review / M. P. Ajith, M. Aswathi, E. Priyadarshini, P. Rajamani. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126000> // Bioresource Technology. – 2021. – Vol. 342. – P. 126000. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421013420?via%3Dihub> (дата обращения: 31.08.2023).

38. Tarafdar, J. Nanotechnology in Soil Science / J. Tarafdar, T. Adhikari // Soil Science. – 2015. – Ch. 27. – P. 775–807. – URL: <http://krishi.icar.gov.in/jspui/handle/123456789/39187> (дата обращения: 07.08.2023).

39. Experimental and Field Applications of Nanotechnology for Enhanced Oil Recovery Purposes: A review / S. Davoodi, M. Al-Shargabi, D. A. Wood [et al.]. – DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.124669> // Fuel. – 2022. – Vol. 324. – P. 124669. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236122015174?via%3Dihub> (дата обращения: 07.08.2023).

40. Esmailian, B. The Evolution and Future of Manufacturing: A Review / B. Esmailian, S. Behdad, B. Wang. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001> // Journal of Manufacturing Systems. – 2016. – Vol. 39. – P. 79–100. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612516300024?via%3Dihub> (дата обращения: 07.08.2023).

41. Формативная фабрикация: новая индустрия / А. В. Парфенов, В. С. Комлев, О. Ф. Петров [и др.]. – DOI: <https://doi.org/10.7868/s0032874x22020016> // Природа. – 2022. – № 2. – С. 3–13. – URL:

<https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S0032874X22020016> (дата обращения: 31.08.2023).

42. Lin, L. Digital Manufacturing of Advanced Materials: Challenges and Perspective / L. Lin, P. S. Kollipara, Y. Zheng. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.05.022> // Materials Today. – 2019. – Vol. 28. – P. 49–62. – URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369702119302755?via%3Dihub> (дата обращения: 31.08.2023).

43. Combining Printing and Nanoparticle Assembly: Methodology and Application of Nanoparticle Patterning / W. Zhao, Y. Yan, X. Chen, T. Wang. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2022.100253> // The Innovation. – 2022. – Vol. 3, no. 4. – P. 100253. – URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666675822000492?via%3Dihub> (дата обращения: 31.08.2023).

44. Exfoliation Mechanisms of 2D Materials and Their Applications / Md. A. Islam, P. Serles, B. Kumral [et al.]. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0090717> // Applied Physics Reviews. – 2022. – Vol. 9, no. 4. – P. 041301. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/apr/article-abstract/9/4/041301/2835341/Exfoliation-mechanisms-of-2D-materials-and-their?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 31.08.2023).

Приложение А

Таблица А.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-3–2014 на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Графен – монослой атомов углерода, в котором каждый атом связан с тремя соседними, образуя таким образом сотовую структуру. <i>Примечание:</i> графен является основным образующим материалом многих углеродных нанообъектов</p>	Graphene
<p>Графит – аллотропная модификация углерода, состоящая из слоев графена, расположенных параллельно друг другу и образующих трехмерную упорядоченную кристаллическую структуру. <i>Примечания:</i> 1) определение термина «графит» приведено в соответствии с терминологией Международного союза теоретической и прикладной химии; 2) существуют две аллотропные модификации графита: гексагональная и ромбоэдрическая, отличающиеся типом чередования углеродных слоев</p>	Graphite
<p>Фуллерен – молекула, состоящая из четного числа атомов углерода, образующих замкнутую выпуклую поверхность многогранника, двенадцать граней которого образованы пятиугольниками, а остальные – шестиугольниками <i>Примечания:</i> 1) определение термина «фуллерен» приведено в соответствии с терминологией Международного союза теоретической и прикладной химии; 2) общеизвестным примером является фуллерен C_{60}, который имеет сферическую форму диаметром примерно 1 нм</p>	Fullerene
<p>Производные фуллерена – химические соединения, которые образованы из фуллеренов замещением углерода или ковалентным присоединением компонентов</p>	Fullerene derivatives
<p>Эндоэдральный фуллерен – фуллерен, внутри оболочки которого заключены один или несколько атомов</p>	Endohedral fullerene

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Металлофуллерен – эндоэдральный фуллерен, содержащий один или несколько ионов металлов	Metallo–fullerene
Углеродная нанолуковица – нанолуковица, состоящая из углерода	Carbon nano–onion
Углеродное нановолокно – нановолокно, состоящее из углерода	Carbon nanofibre, CNF
Графитовое нановолокно – углеродное нановолокно, состоящее из многослойных структур графена. <i>Примечание:</i> расположение слоев графена может быть произвольным по отношению к оси волокна; наличие дальнего порядка не является обязательным	Graphite nanofibre
Углеродная нанотрубка (УНТ) – нанотрубка, состоящая из углерода. <i>Примечание:</i> углеродные нанотрубки обычно состоят из свернутых слоев графен, в том числе одностенные углеродные нанотрубки и многостенные углеродные нанотрубки	Carbon nanotube, CNT
Одностенная углеродная нанотрубка (ОУНТ) – углеродная нанотрубка, состоящая из одного цилиндрического слоя графена. <i>Примечание:</i> структуру ОУНТ можно представить в виде листа графена, свернутого в цилиндрическую сотовую структуру	Single–wall carbon nanotube, SWCNT
Многостенная углеродная нанотрубка (МУНТ) – углеродная нанотрубка, состоящая из вложенных друг в друга концентрических или почти концентрических слоев графена с межслоевыми расстояниями, аналогичными межслоевым расстояниям в графите. <i>Примечание:</i> МУНТ представляет собой множество вложенных друг в друга одностенных углеродных нанотрубок цилиндрической формы в случае малого диаметра и стремящихся к многоугольному сечению по мере увеличения диаметра	Multiwall carbon nanotube, MWCNT

Приложение Б

Таблица Б.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-4–2016 на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Нанофаза – область или области материала, линейные размеры которой(ых) по одному, двум или трем измерениям находятся в нанодиапазоне, и имеющая(ие) четкие физические или химические отличия от других областей материала.</p> <p><i>Примечание:</i> нанообъекты, представляющие собой включения в другой фазе, образуют нанофазу</p>	Nanophase
<p>Нанопора – полость, линейные размеры которой хотя бы по одному измерению находятся в нанодиапазоне.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) форма и содержание полости могут быть различны. Понятие «нанопора» включает в себя понятия «микропора» (пора шириной менее 2 нм), «мезопора» (пора шириной от 2 до 50 нм) и «макропора» (пора шириной более 50 нм); 2) соединенные между собой нанопоры могут пропускать через себя различные вещества (проницаемость)</p>	Nanopore
<p>Нанодисперсная система – материал, содержащий нанообъекты или нанофазы, диспергированные в непрерывной фазе</p>	Nanodispersion
<p>Нанопена – материал с жидкой или твердой основной фазой (матрицей), заполненный газовой фазой.</p> <p><i>Примечание:</i> нанопена обладает низкой плотностью. Нанопена содержит наноструктурированную матрицу, состоящую, например, из полостей и стенок с размерами в нанодиапазоне, или/и газовую нанофазу из наноразмерных пузырьков (закрытая нанопена)</p>	Nanofoam
<p>Наноструктурированный порошок – химические соединения, которые образованы из фуллеренов замещением углерода или ковалентным присоединением компонентов.</p> <p><i>Примечание:</i> термин «порошок» обозначает совокупность дискретных частиц размером менее 1 мм</p>	Nanostructured powder

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Наноструктурированный агрегат – агрегат, сформированный из нано объектов.</p> <p><i>Примечание:</i> в агрегатах нанообъекты трудноотделимы друг от друга</p>	<p>Nanostructured aggregate</p>
<p>Наноструктурированный агломерат – агломерат нанообъектов или агломерат наноструктурированных агрегатов</p>	<p>Nanostructured agglomerate</p>
<p>Наноструктурированная частица «ядро–оболочка» – частица, состоящая из ядра диаметром от 1 до 100 нм и оболочки (или оболочек) толщиной от 1 до 100 нм.</p> <p><i>Примечание:</i> если у наноструктурированной частицы «ядро–оболочка» хотя бы один внешний линейный размер находится в нанодиапазоне, рекомендуется применять термин «нанообъект»</p>	<p>Nanostructured core–shell particle</p>
<p>Наноструктурированная капсула – капсула с оболочкой толщиной от 1 до 100 нм, предназначенная для того, чтобы в нее помещать, удерживать, переносить или высвобождать вещество</p>	<p>Nanostructured capsule</p>
<p>Нанокпозиционный материал, наноккомпозит – твердое вещество, состоящее из двух или более разделенных фаз, из которых одна или более являются нанофазами.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) наноккомпозит не содержит газовую нанофазу. Газовую нанофазу содержит нанопористый материал; 2) материал, нанофаза которого получена только методом осаждения, не является нанокпозиционным</p>	<p>Nanocomposite</p>
<p>Нанокпозиционный материал с полимерной матрицей, наноккомпозит с полимерной матрицей – нанокпозиционный материал, содержащий одну или более основную полимерную фазу</p>	<p>Polymer matrix nanocomposite</p>
<p>Нанокпозиционный материал с полимерной матрицей, армированный глиной, наноккомпозит с полимерной матрицей, армированный глиной – нанокпозиционный материал с полимерной матрицей, содержащий наноструктурированную фазу глины</p>	<p>Polymer clay nanocomposite</p>
<p>Нанокпозиционный материал с металлической матрицей, наноккомпозит с металлической матрицей – нанокпозиционный материал, содержащий одну или более основную металлическую фазу</p>	<p>Metal matrix nanocomposite</p>

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Нанокomпозиционный материал с керамической матрицей , нанокomпозит с керамической матрицей – нанокomпозиционный материал, содержащий одну или более основную керамическую фазу	Ceramic matrix nanocomposite
Твердая нанопена – материал с твердой матрицей, заполненный газовой фазой. <i>Примечание:</i> нанопена обладает низкой плотностью. Нанопена содержит наноструктурированную матрицу, состоящую, например, из полостей и стенок с размерами в нанодиапазоне, или/и газовую нанофазу из наноразмерных пузырьков (закрытая нанопена)	Solid nanofoam
Нанопористый материал – твердый материал с нанопорами. <i>Примечания:</i> 1) нанопористый материал может обладать аморфной, кристаллической или аморфно-кристаллической структурой; 2) определения понятий «твердая нанопена» (материал, большая часть объема которого занята порами) и «нанопористый материал» (материал, содержащий небольшую часть закрытых пор) пересекаются	Nanoporous material
Текучая нанодисперсная система – гетерогенный материал, содержащий нанообъекты или нанофазы, диспергированные в непрерывной жидкой фазе	Fluid nanodispersion
Наносуспензия – текучая нанодисперсная система, содержащая диспергированную твердую фазу. <i>Примечание:</i> понятие «наносуспензия» не следует соотносить с термодинамическим равновесием	Nanosuspension
Наноэмульсия – текучая нанодисперсная система, содержащая одну или более жидкую нанофазу	Nanoemulsion
Жидкая нанопена – текучая нанодисперсная система, заполненная газовой нанофазой. <i>Примечание:</i> нанопена обладает низкой плотностью	Liquid nanofoam
Наноаэрозоль – текучая нанодисперсная система с газообразной матрицей, содержащая одну или более жидкую или твердую нанофазу (включая нанообъекты)	Nanoaerosol

Приложение В

Таблица В.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-5–2014 на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Нанобиотехнология – совокупность технологических методов, основанных на применении научных основ нанотехнологий или нанотехнологии в биологии или биотехнологии.</p> <p><i>Примечание:</i> понятие «нанобиотехнология» включает в себя применение нанотехнологий для целей охраны здоровья человека и в ветеринарии</p>	Nanobio- technology
<p>Бионанотехнология – область знаний, изучающая применение биологических методов в нанотехнологиях, включая использование биологических молекул в наноматериалах, устройствах или системах, размер которых находится в нанодиапазоне</p>	Bionano- technology
<p>Биомиметическая нанотехнология – технология, основанная на применении принципов биологии при разработке и/или изготовлении наноматериалов, устройств или систем, размер которых находится в нанодиапазоне</p>	Bio-inspired nanotechnolo- gy
<p>Нанотоксикология – область знаний, изучающая применение токсикологии в исследовании наноматериалов</p>	Nanotoxicology
<p>Нанобиоконъюгат – гибридная частица, состоящая из биологической молекулы, прикрепленной к наноматериалу</p>	Nanobio- conjugate

**Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-6–2014
на русском языке и их эквиваленты на английском языке**

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Квантовая точка – нанобъект, линейные размеры которого по трем измерениям близки длине волны электрона в материале данного нанобъекта и внутри которого потенциальная энергия электрона ниже, чем за его пределами, при этом движение электрона ограничено во всех трех направлениях	Quantum dot
Аэрозоль – дисперсная система, состоящая из твердых или жидких частиц, взвешенных в газе	Aerosol
Суспензия – жидкая неоднородная система, в которой дисперсной фазой являются мелкие частицы твердого вещества	Suspension

Приложение Г

Таблица Г.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-11–2014 на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Пленка – непрерывный тонкий материал на подложке или без подложки.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) термин «тонкая пленка» означает, что толщина пленки значительно меньше ее длины и ширины; 2) у пленки может отсутствовать подложка; 3) пленка может быть получена из твердых или жидких веществ (например, жидкая пленка); 4) пленка может представлять собой монослой (например, пленка Ленгмюра – Блоджетт)</p>	Film
<p>Слой – дискретный материал, находящийся внутри или на поверхности конденсированной фазы, размеры которого ограничены в одном измерении</p>	Layer
<p>Многослойная структура – система примыкающих друг к другу слоев или монослоев</p>	Multilayer
<p>Фольга – пленка равномерной толщины, не имеющая подложки</p>	Foil
<p>Мембрана – перегородка, поперечные размеры которой значительно больше размеров ее толщины, со структурой, обеспечивающей селективный перенос компонентов разделяемых фаз под действием движущих сил</p>	Membrane
<p>Покрытие – слой материала, сцепленный с поверхностью.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) покрытие может состоять из нескольких слоев материала; 2) у покрытия всегда есть подложка</p>	Coating
<p>Нанофольга, нанолист – нанопластина, у которой размеры в горизонтальной плоскости существенно превышают толщину.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) термин «нанолист» является синонимом термина «нанофольга», данные термины используют в зависимости от конкретной области применения; 2) размеры длины и ширины нанофольги и нанолиста не ограничены в отличие от размеров длины и ширины нанопластины или наночешуек</p>	Nanofoil, nanosheet

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Наночешуйка – нанопластина, обладающая ограниченными размерами поперечных сечений	<i>Nanoflake</i>
Наномембрана – мембрана толщиной в нанодиапазоне. <i>Примечание:</i> наномембраны, имеющие нанопоры, относят к нанопористым материалам	Nanomem- brane
Нанослой – слой, толщина которого находится в нанодиапазоне	Nanolayer
Нанопокрытие – покрытие, толщина которого находится в нанодиапазоне	Nanocoating
Нанопленка – пленка, толщина которой находится в нанодиапазоне. <i>Примечания:</i> 1) нанопленка представляет собой нанослой без подложки; 2) нанопленка может быть получена из твердых или жидких веществ (например, жидкая нанопленка); 3) нанопленка может представлять собой монослой (например, пленка Ленгмюра – Блджетт)	Nanofilm
Многослойная наноструктура – многослойная структура, толщина которой находится в нанодиапазоне	Nanomultilayer
Наноструктурированный слой – слой, имеющий внутреннюю или поверхностную структуру в нанодиапазоне	Nanostruc- tured layer
Наноструктурированное покрытие – покрытие, имеющее внутреннюю или поверхностную структуру в нанодиапазоне	Nanostruc- tured coating
Наноструктурированная пленка – пленка, имеющая внутреннюю или поверхностную структуру в нанодиапазоне	Nanostruc- tured film
Нанокompозитная пленка – твердая пленка, состоящая из двух или более материалов, разделенных по фазам, из которых одна или более являются нанофазами	Nanocomposite film
Нанокompозитное покрытие – твердое покрытие, состоящее из двух или более материалов, разделенных по фазам, из которых одна или более являются нанофазами. <i>Примечание:</i> к материалам с нанофазами относят материалы, полученные осаждением (например, материал, полученный в процессе осаждения на поверхности углеродных частиц, функционализированных металлом)	Nanocomposite coating
Нанопористая мембрана – мембрана с нанопорами, пропускающими вещества в жидком или газообразном состоянии	Nanoporous membrane

Приложение Д

Таблица Д.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 3) на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Нанотехнологическое производство «снизу вверх» – технология, основанная на применении атомов, молекул и/или нанообъектов в качестве исходного материала для формирования более крупных и функционально сложных структур или конструкций различных объектов	Bottom up nano-manufacturing
Соосаждение – осаждение одновременно двух или более исходных материалов. <i>Примечание:</i> к основным методам соосаждения относят: вакуумное напыление, термическое напыление, электроосаждение и осаждение твердых частиц суспензии	Co-deposition
Направленная сборка – процесс формирования конструкций объекта в соответствии с заданным шаблоном, основанный на применении управляемых внешних воздействий к исходным нанообъектам	Directed assembly
Направленная самосборка – процесс самосборки в соответствии с заданным шаблоном, происходящий под управляемыми внешними воздействиями. <i>Примечание:</i> процесс направленной самосборки может происходить под действием приложенного силового поля, сил потока жидкости, введенного в исходное вещество химического реагента или по заданному шаблону	Directed self-assembly
Многослойное осаждение – процесс получения композиционных материалов со слоистой структурой путем последовательного осаждения на подложку двух или более исходных материалов	Multilayer deposition
Функционализация поверхности – процесс придания поверхности объекта заданных химических или физических свойств путем химического или физико-химического воздействия	Surface functionalization

**Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016
(часть 4) на русском языке и их эквиваленты на английском языке**

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Сборка в электростатическом поле – процесс изменения направления или положения нанообъектов, являющихся элементами устройства или материала, под действием сил электростатического поля	Electrostatic driven assembly
Распределение в потоке жидкости – процесс изменения направления или положения нанообъектов, являющихся элементами устройства или материала, под действием сил потока жидкости	Fluidic alignment
Сборка в магнитном поле – процесс изготовления объектов в соответствии с заданным шаблоном в нанодиапазоне под действием сил магнитного поля	Magnetic driven assembly
Сборка с учетом формы наночастиц – процесс получения заданной структуры или конфигурации объекта, основанный на применении наночастиц определенной геометрической формы	Shape-based assembly
Супрамолекулярная сборка – процесс сборки объекта из молекул или наночастиц за счет нековалентных связей	Supra-molecular assembly
Перенос «поверхность – поверхность» – процесс перемещения наночастиц или объектов с поверхности одной подложки, на которой они были сформированы или собраны, на поверхность другой подложки	Surface-to-surface transfer

**Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016
(часть 5) на русском языке и их эквиваленты на английском языке**

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Коллоидная кристаллизация – процесс получения вещества, состоящего из плотно расположенных по отношению друг к другу элементов, упорядоченных в периодические пространственные структуры, путем седиментации наночастиц из раствора с образованием твердого осадка</p>	<p align="center">Colloidal crystallization</p>
<p>Графоэпитаксия – процесс направленной самосборки на поверхности объектов, имеющей неоднородности, размеры которых находятся в нанодиапазоне. <i>Примечание:</i> к понятию «графоэпитаксия» относят процессы последовательного формирования пленок с одинаковой или отличной структурой на поверхности одной и той же кристаллической подложки</p>	<p align="center">Graphioepitaxy</p>
<p>Адсорбция – удержание молекул газа, жидкости или растворенного вещества поверхностным слоем твердого или жидкого тела, с которым они контактируют, за счет физических или химических взаимодействий</p>	<p align="center">Adsorption</p>
<p>Ионно-лучевое модифицирование поверхности – процесс изменения поверхности объекта пучком ускоренных ионов с целью формирования на ней неоднородностей, в том числе размерами в нанодиапазоне</p>	<p align="center">Ion beam surface reconstruction</p>
<p>Формирование пленки Ленгмюра – Блоджетт – процесс получения молекулярного монослоя на границе раздела двух сред (газовой и жидкой) с помощью специальной кюветы, разработанный Ирвингом Ленгмюром и Катариной Блоджетт</p>	<p align="center">Langmuir–Blodgett film formation</p>
<p>Перенос пленки Ленгмюра – Блоджетт – процесс перемещения молекулярного монослоя, сформированного на границе раздела двух сред (газовой и жидкой), на твердую поверхность путем погружения в жидкость с данным монослоем и последующего извлечения из нее твердой подложки</p>	<p align="center">Langmuir–Blodgett film transfer</p>

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Послойное электростатическое осаждение – процесс последовательного нанесения на поверхность подложки слоев полимерных материалов с противоположными знаками электрических зарядов	Layer-by-layer deposition
Модулированное осаждение веществ – процесс формирования чередующихся слоев двух или более веществ путем последовательного осаждения из газовой фазы каждого из исходных веществ на заданных участках подложки	Modulated elemental reacted method
Самосборка монослоя – процесс формирования упорядоченного молекулярного слоя вещества, осаждаемого на твердую подложку из жидкой или газовой фазы под воздействием сил молекулярного сцепления с поверхностью подложки и сил слабого межмолекулярного взаимодействия	Self-assembled monolayer formation
Механизм роста пленки Странского – Крастанова ; механизм «послойного–плюс–островкового» роста пленки – процесс формирования пленки на подложке, начинающийся с образования двумерного слоя и завершающийся образованием на нем групп связанных между собой атомов (островков)	Stranski–Krastanow growth

Приложение Е

Таблица Е.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016
(часть 6.1) на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Холодное газодинамическое напыление – процесс получения покрытия из холодных и ускоренных частиц или наночастиц напыляемого порошка, при соударении которых с подложкой происходит их соединение, с применением сверхзвуковой струи инертного газа	Cold gas dynamic spraying
Электронно-лучевое испарение – процесс получения материала путем преобразования исходного материала в газообразное состояние под воздействием потока электронов в условиях высокого или сверхвысокого вакуума и последующего осаждения материала на подложку	Electron–beam evaporation
Электроискровое осаждение – процесс получения покрытий импульсно-дуговой микросваркой, основанный на изменении физико-химических свойств поверхности под воздействием импульсных искровых разрядов, сопровождаемых отделением от обрабатываемого электрода вещества и переходом его на обрабатываемую поверхность (катод)	Electro–spark deposition
Термическое разложение инфракрасным излучением – процесс получения твердого материала, состоящего в том числе из наночастиц, осаждаемого на подложку в результате нагревания инфракрасным излучением до заданной температуры исходного газообразного вещества	Photothermal synthesis
Сублимационная сушка – процесс обезвоживания вещества или удаления из него растворителя путем быстрого замораживания вещества и дальнейшего выпаривания затвердевших воды или растворителя в условиях вакуума	Freeze drying
Распылительная сушка – процесс получения сухого порошка из жидкости или суспензии, основанный на впрыскивании капель жидкости или суспензии в поток нагретого до необходимой температуры газа и последующем осаждении твердых частиц	Spray drying

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Быстрое расширение сверхкритических растворов – процесс извлечения вещества, основанный на распылении исходного вещества при температуре и давлении выше критических точек и последующем осаждении нанообъектов	Supercritical expansion
Суспензионное термическое напыление – процесс получения покрытия термическим напылением, в котором в качестве исходного материала применяют суспензию	Suspension combustion thermal spray
Электрический взрыв проволоки – процесс получения наночастиц путем испарения исходного полупроводникового или проводникового материала в виде проволоки под действием импульса электрического тока высокой плотности с последующей конденсацией наночастиц	Wire electric explosion
<p>Испарение – процесс перехода вещества из твердой или жидкой фазы в газовую или плазменную фазы.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) процесс испарения применяют для осаждения материала на подложку. Процесс испарения лежит в основе процессов физического осаждения из газовой фазы (ФОГФ); 2) процессы ФОГФ в условиях высокого вакуума происходят при давлении в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-9} торр, в условиях сверхвысокого вакуума – при давлении ниже 10^{-9} торр</p>	Vaporization

Приложение Ж

Таблица Ж.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 6.2) на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Экзотермическое разложение жидкого вещества – процесс получения твердого агрегированного материала, в том числе наноматериала, осаждаемого на подложку в результате экзотермической реакции окисления раствора исходного материала	Liquid precursor combustion
Плазменное распыление – процесс получения твердого агрегированного материала, в том числе наноматериала, осаждаемого на подложку, с применением плазменной струи, образованной источником ионизированного газа	Plasma spray
Пиролиз аэрозоля – процесс получения твердого агрегированного материала, в том числе наноматериала, осаждаемого на подложку в результате сжигания или нагревания до заданной температуры распыляемого исходного материала в виде аэрозоля	Pyrogenesis
Термическое разложение жидкого вещества – процесс получения твердого агрегированного материала, в том числе наноматериала, осаждаемого на подложку в результате нагревания до заданной температуры распыляемого исходного жидкого материала	Thermal spray pyrolysis
Атомно-слоевое осаждение (АСО) – процесс получения однородных конформных пленок путем циклического осаждения исходных материалов на подложку в ходе самоограниченных химических реакций, позволяющих контролировать толщину нанесенного слоя. <i>Примечание:</i> в процессе АСО цикл осаждения исходных материалов, который должен включать не менее двух последовательных химических реакций, повторяют несколько раз до получения пленок нужной толщины	Atomic layer deposition; ALD

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Каталитическое химическое осаждение из газовой фазы (КХОГФ) – процесс ХОГФ, основанный на термическом разложении газообразных веществ с применением катализатора.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) процесс КХОГФ применяют для получения углеродных нанотрубок из исходных углеводородных материалов (например, метан) с использованием катализаторов, например, железа (Fe), никеля (Ni) или кобальта (Co); 2) термин «каталитическое химическое осаждение из газовой фазы» относят к терминам, обозначающим процессы катализа</p>	<p>Catalytic Chemical vapour deposition; CCVD</p>
<p>Термическое разложение в трубчатой печи – химическое осаждение из газовой фазы, осуществляемое в трубчатой печи при заданной и контролируемой температуре поверхности подложки с исходным материалом</p>	<p>Hot wall tubular reaction</p>
<p>Формирование нановолокон по механизму роста «пар – жидкость – кристалл» (ПЖК) – процесс получения на подложке нановолокон из исходного газообразного материала с применением жидкого катализатора.</p> <p><i>Примечание:</i> формирование нановолокон по механизму роста «пар – жидкость – кристалл» происходит при наличии на кончиках формирующихся нановолокон капель жидкого катализатора, адсорбирующего исходный газообразный материал до уровня перенасыщения, из которого в дальнейшем происходит рост нановолокон</p>	<p>Vapour–liquid–solid nanofiber synthesis; VLS</p>

Приложение И

Таблица И.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 6.3) на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Электропрядение – процесс вытягивания волокон из исходного жидкого материала под действием сил электрического поля	Electrospinning
Интеркаляционная полимеризация in-situ – процесс получения нанокомпозита, основанный на введении мономера в исходный слоистый неорганический материал и последующей его полимеризации	In-situ intercalative polymerization
Диспергирование нанодисперсной системы – процесс получения наносuspension, основанный на предотвращении или замедлении скорости осаждения наночастиц за счет внутреннего или внешнего воздействия (например, сил молекулярного взаимодействия, электрического поля или наличия лиганд) на исходный материал	Nanoparticle dispersion
Литье керамической ленты – процесс получения керамической ленты путем заполнения поверхности подложки, имеющей заданные формы и размеры, макроскопическим слоем суспензии из керамического материала. <i>Примечание:</i> макроскопический слой может содержать наночастицы	Tape casting
Мокрый помол в шаровой мельнице – процесс получения суспензии измельчением исходного материала под действием ударов движущихся шаров, изготовленных из материала, имеющего более высокий показатель твердости, и с добавлением жидкости	Wet ball milling

**Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016
(часть 6.4) на русском языке и их эквиваленты на английском языке**

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Кислотный гидролиз целлюлозы – химическая реакция с применением кислоты, в процессе которой происходит извлечение нанокристаллической целлюлозы из целлюлозы	Acid hydrolysis of cellulose
Осаждение наночастиц из раствора – процесс получения наночастиц в результате протекания химических реакций в растворе с возможностью влияния на размеры получаемых частиц за счет кинетических факторов	Nanoparticle precipitation
Быстрая конденсация неорганических материалов – процесс получения атомарно гладкой и плотной пленки из исходного металлоорганического материала методом центробежного осаждения и последующего отверждения на подложке при заданной температуре	Prompt inorganic condensation
Синтез в обратных мицеллах – процесс формирования наночастиц требуемых размеров и формы в растворе исходного материала с применением соответствующего реагента, основанный на образовании в ядре мицеллы наночастиц, рост которых ограничен оболочкой мицеллы	Reverse micelle process
Золь–гель технология – процесс получения материалов путем преобразования исходного раствора или суспензии (золя) в коллоидную систему (гель), состоящую из жидкой дисперсионной среды, заключенной в пространственную сетку, образованную соединившимися частицами дисперсной фазы	Sol–gel processing
Матричный синтез (темплатный синтез) – процесс получения наноматериала путем самосборки, происходящий с добавлением в исходный материал поверхностно-активного вещества, молекулы которого выступают в качестве структурообразующего агента, и формирование структурных элементов размерами в нанодиапазоне при последующем отверждении этого материала	Surfactant templating
Метод Стобера – процесс получения наночастиц силикатного материала из тетраалкилортосиликата, который подвергают гидролизу путем его обработки спиртом и аммиаком. <i>Примечание:</i> термин «метод Стобера» – это наименование золь–гель–технологии, применяемой для получения диоксида кремния	Stober process

Приложение К

Таблица К.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 6.5) на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Блок-сополимеризация – процесс получения блок-сополимерного материала, основанный на формировании чередующихся двухмерных (2D) или трехмерных (3D) структур из блоков различных несовместимых полимерных цепей</p>	<p>Block Copolymer Phase segregation</p>
<p>Наноструктурирование блок-сополимера – процесс формирования наноструктур в блок-сополимерном материале путем добавления в определенную его фазу соответствующего вещества</p>	<p>Block copolymer templating</p>
<p>Холодное прессование – процесс обработки материала давлением с целью его уплотнения за счет уменьшения расстояния между частицами материала до размеров нанодиапазона, происходящий без нагревания</p>	<p>Cold pressing</p>
<p>Непрерывная обработка полосового проката металла сдвигом (НОППС) – процесс улучшения механических свойств металла за счет изменения размеров его зерен в результате интенсивного пластического деформирования при вальцовке со сдвигом, происходящий без значительных изменений габаритных размеров исходного материала. <i>Примечание:</i> метод НОППС позволяет получать материалы и изделия из них с улучшенными механическими свойствами</p>	<p>Conshearing continuous confined strip shearing; C2S2</p>
<p>Многократная штамповка с кручением – процесс улучшения свойств металла за счет уменьшения его зерен до размеров нанодиапазона в результате интенсивного пластического деформирования, происходящего при неоднократном последовательном повторении операций сжатия заготовки в виде листового проката между двумя пуансонами, имеющих рельефную поверхность, и вращения пуансонов на заданный угол, с последующей обработкой заготовки ковкой или вальцовкой</p>	<p>Multi-pass coin forging</p>

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Расстекловывание – процесс кристаллизации исходного материала, имеющего стекловидную консистенцию, происходящий с образованием в нем нанообъектов и/или пустот, размеры которых находятся в нанодиапазоне	Devitrification
Ионная имплантация – процесс изменения свойств поверхности объекта путем ее разрушения или перекристаллизации под воздействием ионного пучка	Ion implantation
Высокоскоростная микрообработка – процесс изготовления двухмерного или трехмерного прецизионного изделия путем отделения изделия в качестве части от исходной заготовки или вырезания изделия на поверхности исходной заготовки с помощью специального инструмента при скорости вращения шпинделя более 30 000 об/мин. <i>Примечания:</i> 1) прецизионные изделия получают в процессе микрообработки за счет высокой скорости (от 30 000 до 100 000 об/мин) вращения шпинделя; 2) виды высокоскоростной микрообработки: лазерная, электронно-лучевая, ультразвуковая, фрезерование, обработка ионным пучком. Для выполнения высокоскоростной микрообработки применяют оборудование с (ЧПУ); 3) скорость вращения шпинделя устанавливают в зависимости от применяемого вида микрообработки	High-speed micro-machining
Измельчение – процесс получения наночастиц механическим истиранием исходного вещества с применением материала, имеющего более высокий показатель твердости	Grinding
Криогенное измельчение – измельчение при криогенной температуре (т. е. температуре ниже $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ или 123 К)	Cryogenic milling
Сухой помол в шаровой мельнице – процесс получения материала, содержащего наночастицы, измельчением и смешиванием исходных материалов различного химического и гранулометрического составов под действием ударов движущихся шаров, изготовленных из материала, имеющего более высокий показатель твердости, и последующим нагреванием до температуры спекания	Dry ball milling

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Осаждение в соответствии с нанощаблоном – процесс формирования объекта заданной формы, в том числе с замкнутым внутренним пространством, путем осаждения исходных наноструктурированных материалов или наночастиц из жидкой или газовой фазы на подложку</p>	<p>Nanotemplated growth</p>
<p>Диспергирование наночастиц в жидкой полимерной матрице – процесс получения композиционного материала с полимерной матрицей путем смешивания наночастиц исходного вещества с жидким полимерным материалом и последующего его отверждения</p>	<p>Polymer nanoparticle dispersion</p>
<p>Горячее прессование – процесс получения металлического материала формованием металлического порошка в пресс-форме под воздействием давления и температуры, превышающей температуру рекристаллизации основного компонента.</p> <p><i>Примечание:</i> процесс горячего прессования проводят при давлении выше 50 МПа и температуре 2400 °С</p>	<p>Hot pressing</p>
<p>Спекание наночастиц – процесс соединения наночастиц путем термической обработки исходного материала, в процессе которой происходит активизация взаимодействия наночастиц вследствие движения атомов внутри и между наночастицами</p>	<p>Nanoparticle sintering</p>
<p>Электроимпульсное плазменное спекание – процесс уплотнения порошка проводникового или полупроводникового материала, помещенного в пресс-форму под воздействием давления, нагреванием со скоростью до 1000 К/мин путем пропускания через него импульса постоянного тока и последующим охлаждением со скоростью до 1000 К/мин, без изменения размеров зерен</p>	<p>Spark plasma sintering</p>

Приложение Л

Таблица Л.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 6.6) на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Дериватизация блок-сополимеров – процесс модификации твердого блок-сополимерного материала путем добавления соответствующего вещества, атомы или молекулы которого взаимодействуют только с одной фазой модифицируемого материала	Block copolymer chemical derivatization
Анодное окисление металла – процесс получения неметаллического неорганического покрытия на металлической подложке (аноде) электрохимическим способом с контролем образования нанопор. <i>Примечание:</i> термин «анодное окисление металла» является синонимом термина «анодное травление»	Electrochemical anodization
Интеркаляция – процесс обратимого встраивания атомов или молекул одного вещества в кристаллическую структуру другого вещества	Intercalation
Синтез двухфазных нанокomпозиционных материалов – процесс получения нанокomпозиционного материала, состоящего из двух разделенных фаз, путем нагревания и быстрого охлаждения до заданных температур исходной смеси из двух компонентов	Two-phase methods

Приложение М

Таблица М.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 7.1) на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Трехмерная литография ; 3D-литография – процесс формирования структуры объекта, линейные размеры которой или ее составных частей по одному, двум или трем измерениям могут находиться в нанодиапазоне, путем воспроизведения заданного шаблона на подложке	3D lithography
Аддитивная печать – процесс формирования рельефного изображения послойным нанесением материала на подложку в соответствии с заданным шаблоном. <i>Примечание:</i> в случае применения резиста в качестве шаблона различают два вида аддитивной печати: обратная литография и аддитивная печать с применением трафарета. В процессе обратной литографии на резист наносят слой материала, из которого необходимо сформировать рисунок, а затем удаляют резист таким образом, чтобы нанесенный материал остался в отверстиях, не защищенных резистом, а материал, попавший на резист, удаляется вместе с ним. В процессе аддитивной печати с применением шаблона материал только добавляют в отверстия, не защищенные резистом	Additive processing
Субтрактивная обработка – процесс получения изображения, заключающийся в избирательном удалении участков материала резиста в соответствии с заданным шаблоном	Subtractive processing
Блок-сополимерная литография – процесс формирования рельефного изображения из наночастиц материала, оставшихся на подложке после удаления полимерного шаблона, полученного за счет микрофазного расслоения диблок-сополимеров	Block copolymer lithography
Электронно-лучевая литография – процесс формирования рельефного изображения в слое резиста путем воспроизведения заданного шаблона с помощью фокусированного электронного пучка	Electron-beam lithography

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Ионно-лучевая литография – процесс формирования рельефного изображения в слое резиста путем воспроизведения заданного шаблона с помощью фокусированного ионного пучка	Focused ion-beam lithography; FIB
Ионно-проекционная литография – процесс получения рельефного изображения размерами в нанодиапазоне в слое резиста путем воспроизведения заданного шаблона с помощью пучка ускоренных ионов	Ion projection lithography
Фотолитография , оптическая литография – процесс получения изображения на подложке путем облучения фоторезиста, покрывающего подложку, электромагнитным излучением через заданный шаблон. <i>Примечание:</i> как правило, для изготовления шаблона используют материал фоторезиста	Photo-lithography; optical lithography
Иммерсионная оптическая литография – литография с повышенной разрешающей способностью, полученной за счет заполнения воздушного промежутка между последней линзой объектива микроскопа и пленкой фоторезиста жидкостью с соответствующим показателем преломления	Immersion optics
Интерференционная литография – процесс формирования рельефного изображения размерами в нанодиапазоне путем соответствующей обработки облученного резиста, на поверхности которого с помощью дифракционных решеток получена интерференционная картина	Interference lithography
Плазмонная литография – процесс формирования рельефного изображения размерами в нанодиапазоне путем облучения фоторезиста, покрывающего подложку, оптическим излучением через шаблон (представляющий собой металлическую плазмонную линзу), обеспечивающий возникновение ближнеполевого возбуждения, вызывающего изменения в фоторезисте	Plasmonic lithography

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Фазоконтрастная фотолитография – процесс получения изображения размерами в нанодиапазоне и улучшенным разрешением путем облучения фоторезиста, покрывающего подложку, электромагнитным излучением через шаблон (фотошаблон) со структурой, сдвигающей фазу проходящего излучения</p>	<p>Phase–contrast photo–lithography</p>
<p>Фотолитография в глубоком ультрафиолете (ФГУ) – процесс формирования рельефного изображения в слое фоторезиста путем воспроизведения заданного шаблона с помощью ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн от 100 до 280 нм</p>	<p>Deep ultraviolet lithography; DUV</p>
<p>Фотолитография в экстремальном ультрафиолете (ФЭУ) – процесс формирования рельефного изображения в слое резиста путем воспроизведения заданного шаблона с помощью ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн от 10 до 20 нм. <i>Примечание:</i> в оборудовании для фотолитографии в экстремальном ультрафиолете используют системы специальных зеркал</p>	<p>Extreme ultra–violet lithography; EUV</p>
<p>Рентгеновская литография – процесс формирования рельефного изображения в слое фоторезиста путем воспроизведения заданного шаблона с помощью рентгеновского излучения. <i>Примечание:</i> пучок рентгеновского излучения трудно сфокусировать на участке, размеры которого находятся в нанодиапазоне [в отличие от фотолитографии в экстремальном ультрафиолете], поэтому термин «рентгеновская литография» применяют для процесса печати, выполняемого с помощью специального шаблона с проницаемыми и непроницаемыми для рентгеновского излучения участками. Шаблон представляет собой мембрану, изготовленную из материала с низким поглощением рентгеновского излучения, с нанесенным на нее изображением из материала с высоким поглощением рентгеновского излучения, например из металла. Как правило, для изготовления шаблона используют материал фоторезиста</p>	<p>X-ray lithography</p>

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Микроконтактная печать – вид мягкой литографии, в которой шаблон после нанесения на него чернил вдавливают в слой материала, покрывающего подложку.</p> <p><i>Примечание:</i> точность воспроизведения изображения зависит от особенностей поверхности подложки и материала, используемого в качестве чернил</p>	Micro-contact printing
<p>Перьевая нанолитография – процесс формирования рельефного изображения размерами менее 100 нм в соответствии с заданным шаблоном путем переноса специального материала на подложку с помощью зонда атомно-силового микроскопа, происходящего за счет диффузии через водный мениск между поверхностью подложки и зондом.</p> <p><i>Примечание:</i> на острие зонда атомно-силового микроскопа наносят молекулы или наночастицы специального материала и переносят их на подложку, формируя рельефное изображение, состоящее из одного или нескольких слоев наносимого материала</p>	Dip-pen nanolithography
<p>Микрожидкостная печать – процесс получения рельефного изображения путем нанесения жидкого материала на поверхность подложки с помощью печатной головки с каналами, размеры которых находятся в микро- или нанодиапазоне и последующего его отверждения при заданной температуре</p>	Microfluidic deposition
<p>Рисование с помощью сканирующего зондового микроскопа – процесс формирования рельефного изображения, заключающийся в изменении заданных участков поверхности подложки острием сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) с чернилами или без них</p>	Scanning force probe writing
<p>Химическое осаждение из газовой фазы с применением сканирующего туннельного микроскопа; ХОГФ СТМ – процесс получения рельефного изображения размерами в нанодиапазоне с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), в котором нанесение материала на подложку происходит за счет химического осаждения из газовой фазы, происходящего под действием электрического напряжения</p>	STM chemical vapour deposition; STM CVD

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Нанопечатная литография – процесс получения рельефного изображения путем вдавливания шаблона (обычно называемого клише, штамп, маска или трафарет) с заданным рисунком, размеры элементов которого находятся в нанодиапазоне, в слой резиста, покрывающего подложку, и последующего его отверждения при заданной температуре или под воздействием светового излучения.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) нанопечатную литографию относят к процессам печати, а не к процессам литографии, так как получаемое изображение зависит от формы и рельефа шаблона; 2) нанопечатную литографию различают по видам материалов, используемых в качестве резиста. Резист из термопластичного полимерного материала сначала нагревают до температуры плавления, а затем надавливают на него шаблоном. Резист из терморезистивного материала сначала используют в жидком виде, прикладывая к нему шаблон, а потом нагревают до температуры его отверждения. На негативном фоторезисте изображение формируют с помощью светового излучения и прозрачного шаблона. Процессы нанопечатной литографии с использованием фоторезистов некоторые специалисты называют «оптическим импринтингом», «оптическим наноимпринтингом» или «печатной литографией «шаг-вспышка»</p>	Nanoimprint lithography
<p>Нанотиснение – процесс получения рельефного изображения путем вдавливания шаблона с заданным рисунком, размеры которого находятся в нанодиапазоне, в слой резиста, покрывающего подложку.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) термин «нанотиснение» также распространяется на процесс формирования трехмерных наноструктур; 2) при нанотиснении физические свойства материала резиста не изменяются. Процесс нанотиснения отличается от процесса нанопечатной литографии тем, что получаемое изображение в слое резиста не требует дополнительной обработки</p>	Nanoembossing
<p>Мягкая литография – процесс получения изображения, заключающийся в нанесении оттиска на подложку шаблоном, изготовленным из мягких материалов (например, эластомерных материалов)</p>	Soft lithography

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Естественная литография – процесс формирования структуры объекта или рельефного изображения путем воспроизведения шаблона, происходящий в природе.</p> <p><i>Примечание:</i> термин «естественная литография» относят к процессам, в которых воспроизведение изображения происходит с помощью шаблона без применения фокусированного пучка излучения</p>	<p>Natural lithography</p>
<p>Литография с коллоидно-кристаллическим шаблоном – процесс формирования заданного объекта методами осаждения или травления в соответствии с шаблоном, представляющим собой двухмерную (2D) или трехмерную (3D) структуру из частиц коллоидного кристалла</p>	<p>Colloidal crystal template lithography</p>

Приложение Н

Таблица Н.1

Стандартизованные термины и определения из ГОСТ ISO/TS 80004-8-2016 (часть 7.2) на русском языке и их эквиваленты на английском языке

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Электроосаждение (электролитическое осаждение) – процесс получения покрытия путем осаждения ионов материала на поверхности электрода в специальном растворе в результате реакции электрохимического восстановления	Electrodeposition; electroplating
Осаждение фокусированным ионным пучком (ОФИП) – химическое осаждение из газовой фазы с применением фокусированного потока ионов для осаждения молекул исходного газообразного материала на заданных участках поверхности подложки. <i>Примечание:</i> ОФИП применяют, например, для осаждения газообразного карбонила вольфрама [W(CO) ₆]. В вакуумной камере под воздействием ионного пучка газообразный карбонил вольфрама разлагают на летучие и нелетучие компоненты; нелетучий компонент, вольфрам, в результате химической адсорбции оседает на подложку. ОФИП применяют также для осаждения других металлических материалов, например платины. Осажденный таким способом металлический материал можно использовать в качестве временного слоя для защиты объекта от разрушающего воздействия ионного пучка	Focused ion-beam deposition; FIB
Осаждение методом химического восстановления – процесс получения покрытия путем автокаталитического осаждения ионов материала из специального раствора в результате реакции взаимодействия ионов материала с растворенным восстановителем на поверхности подложки	Electroless deposition
Осаждение напылением – физическое осаждение из газовой фазы с применением источника высокоэнергетических частиц, бомбардирующих исходный материал (мишень), для перемещения атомов исходного материала на поверхность подложки	Sputter deposition

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
Послойное электростатическое осаждение полиэлектrolитов – процесс получения покрытия путем последовательного нанесения на поверхность подложки слоев полиэлектrolитов с противоположными знаками электрических зарядов	Polyelectrolyte layer-by-layer; LbL
Осаждение фокусированным электронным пучком (ОФЭП) – химическое осаждение из газовой фазы с применением фокусированного (концентрированного) потока электронов для осаждения молекул исходного газообразного материала на заданных участках поверхности подложки	Focused electron-beam deposition
Центробежное осаждение – процесс получения пленки осаждением из жидкого исходного материала твердой дисперсной фазы на вращающуюся подложку под действием центробежных сил	Spin coating
Нанесение покрытия кластерным пучком – процесс получения структурированной пленки путем осаждения наночастиц на подложку с использованием источника кластерного пучка	Cluster beam coating
Нанесение покрытия методом погружения – процесс получения пленки путем погружения подложки в специальный раствор и ее последующего извлечения из него	Dip coating
Электрораспыление – процесс получения твердого материала, осаждаемого на подложку, в результате диспергирования исходного материала через сопло, к которому приложено напряжение	Electro-spray
Термическое напыление – процесс получения покрытия из наночастиц напыляемого материала, при соударении которых с подложкой происходит их соединение, с применением плазменной струи или в результате сгорания примесей напыляемого материала	Thermal spray
Осаждение распылением – процесс получения покрытия из исходного жидкого материала, преобразованного соплом в аэрозоль и нанесенного на поверхность подложки	Spray deposition

Термины и определения на русском языке	Англоязычный эквивалент
<p>Выпаривание – процесс получения твердого материала, осаждаемого на подложку, в результате испарения исходного материала при нагревании до заданной температуры в условиях высокого или сверхвысокого вакуума и последующего охлаждения</p>	<p>Evaporation</p>
<p>Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) – процесс получения монокристаллической пленки путем испарения и последующего осаждения атомов или молекул исходного материала (материалов) на монокристаллическую подложку в условиях высокого или сверхвысокого вакуума.</p> <p><i>Примечания:</i> 1) специальное отверстие в оборудовании для МЛЭ, через которое происходит перенос газообразного исходного материала из зоны испарения в зону высокого или сверхвысокого вакуума, предназначено для формирования соответствующих молекулярных пучков; 2) методом МЛЭ получают бинарные наноструктуры, например, нанопленку арсенида индия (InAs) на подложке из арсенида галлия (GaAs)</p>	<p>Molecular beam epitaxy, MBE</p>