

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 15.05.2022 01:43:25

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11e3bbf73e943df4a4851fda56d089

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное**

**учреждение высшего образования**

**«Юго-Западный государственный университет»**

**(ЮЗГУ)**

Кафедра нанотехнологий, общей и прикладной физики

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 05 » 01

2022 г.



**ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В МИКРО- И  
НАНОЭЛЕКТРОННОМ ИСПОЛНЕНИИ**

Методические указания для подготовки к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки  
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Курск 2021

УДК 53.072

Составители: П.А. Ряполов, Е.В. Шельдешова

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент *А.Е. Кузько*

**Датчики физических измерений в микро- и наноэлектронном исполнении:** методические указания для подготовки к практическим занятиям для студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: П.А. Ряполов, Е.В. Шельдешова. – Курск, 2021. – 34 с.

Излагаются методические указания для подготовки к практическим занятиям, в которых рассматриваются: введение в нано- и микросистемную технику, основы поиска информации по объектам микро и наносистемной техники, классификация и характеристики объектов микро и наносистемной техники, физические принципы функционирования объектов микро и наносистемной техники, материалы датчиков и технологии их изготовления.

Методические указания соответствуют требованиям Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования и учебного плана направления подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, степень (квалификация) – бакалавр. Материал предназначен для студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», а также будет полезен студентам всех других направлений подготовки, изучающих дисциплины нанотехнологического профиля.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *15.01.21* Формат 60 x 84 1/16.

Усл. печ. л. 1,97 Уч.- изд. л. 1,79 Тираж 50 экз. Заказ *200* Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

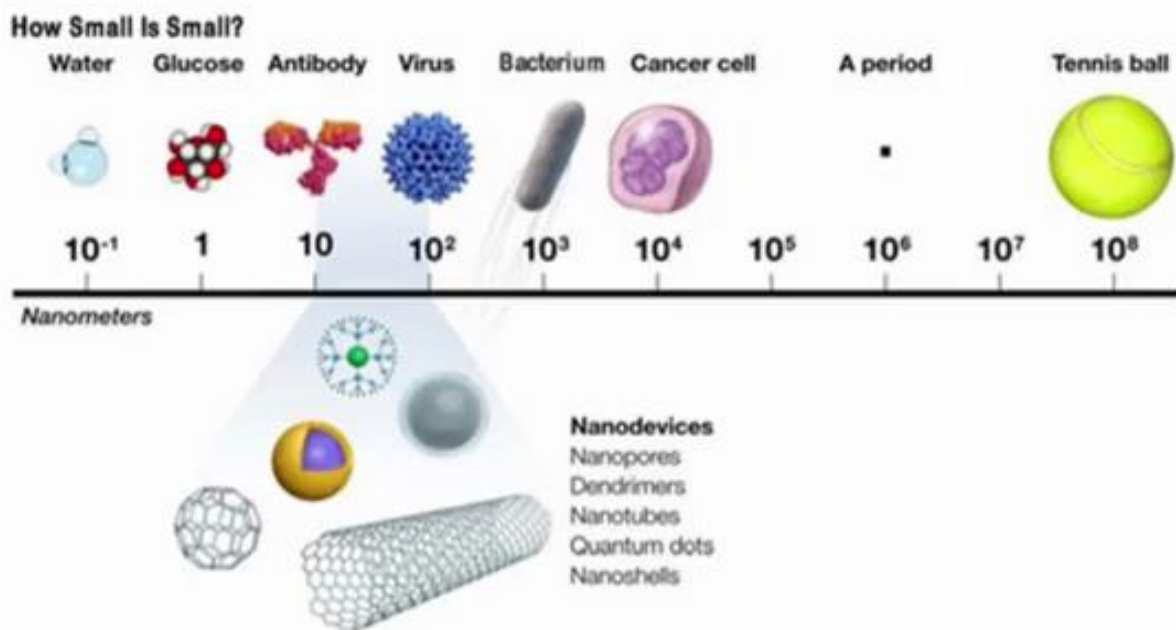
## ОГЛАВЛЕНИЕ

Практическое занятие №1 «Введение в нано- и микросистемную технику»	4
Практическое занятие №2 «Основы поиска информации по объектам микро и наносистемной техники»	9
Практическое занятие №3 «Классификация и характеристики объектов микро и наносистемной техники»	18
Практическое занятие №4 «Физические принципы функционирования объектов микро и наносистемной техники»	23
Практическое занятие №5 «Материалы датчиков и технологии изготовления»	26

## Практическое занятие №1 «Введение в нано- и микросистемную технику»

### КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Быстрые темпы развития исследований и разработок в области наномира и связанный с этим все возрастающий поток новых научных и технологических знаний требуют корректировки и уточнения соответствующего понятийного аппарата, который на сегодняшний день находится в стадии становления. Основные термины наномира собраны и обобщены в энциклопедическом формате в книге WhatisWhatintheNanoworld. Следует, однако, заметить, что довольно часто эти термины даются разными авторами в различных трактовках и вызывают неоднозначное восприятие, что объясняется наличием двух подходов к их рассмотрению. Согласно первому подходу объекты наномира рассматриваются с учетом только лишь их наноразмерных параметров, для которых устанавливаются условные границы возможных изменений. Согласно второму подходу объекты наномира характеризуются особыми свойствами, которые проявляются в силу присущих им наноразмеров. Приставка «нано» в терминах наномира означает изменение масштаба в  $10^9$  (миллиард) раз: 1 нм (1 нанометр) =  $10^{-9}$  м, что составляет одну миллионную миллиметра. В табл. 1 приведены в качестве примера размеры некоторых естественных и искусственных объектов в диапазоне размеров от 10 м до 1 А ( $1\text{А} = 10^{-10}$  м, т.е. 1 ангстрем в 10 раз меньше нанометра и соответствует диаметру самого маленького из атомов – атома водорода). Принято считать, что к объектам наномира относятся такие объекты, характерные размеры которых лежат в пределах от 1 до 100 нм. Вообще говоря, такое размерное ограничение является довольно условным. Главная особенность нанообъектов состоит в том, что в силу их малости в них проявляются особые свойства. Во многих случаях эти особые свойства могут проявляться и тогда, когда размеры нанообъектов превышают условно установленный предел в 100 нм. Таким образом, приставка «нано» – скорее обобщенное отражение объектов исследований, прогнозируемых явлений, эффектов и способов их описания, чем просто характеристика протяженности базового структурного элемента.



Пожалуй, одним из наиболее распространенных терминов наномира является термин «наноматериалы». Вообще говоря, понятие «материалы» тесно связано с понятием «вещество». Материалы – это такие вещества, которые используются или пригодны к использованию для решения практических задач. Вещества являются одним из видов материи (наряду с полями). Основные характеристики веществ – структура и свойства. Структура веществ – это совокупность составляющих их элементов, обладающих устойчивыми взаимосвязями, обеспечивающими их целостность и сохранение их свойств. Свойства веществ – это их качественные или количественные признаки, которые отражают индивидуальность каждого из них или, наоборот, общность с другими веществами и проявляются при сравнении разных веществ. Все вещества, в конечном счете, состоят из элементарных частиц (протонов, нейтронов, электронов  $e$  и др.), обладающих не равной нулю массой покоя, т.е. массой, отнесенной к некоторой системе отсчета, в которой эти частицы являются неподвижными. Естественные науки (физика, химия, биология) изучают главным образом вещества, организованные в атомы и молекулы. Атом – это электрически нейтральная система, состоящая из положительно заряженного ядра, образованного нуклидами (протонами и нейтронами), и отрицательно заряженной оболочки, образованной электронами. Атом является наименьшей частицей химического элемента, представляющего собой совокупность нуклидов и электронов, характеризующуюся определенным порядковым номером, который численно равен модулю заряда нуклидов и однозначно определяет химическую индивидуальность элемента и его положение в Периодической системе химических элементов. Все многообразие веществ обусловлено различными сочетаниями атомов между собой. Связываясь друг с другом, атомы одного или разных химических элементов образуют более сложные частицы – молекулы. Число атомов, входящих в состав молекул, колеблется в очень широких пределах: от двух (например,

молекула водорода) до нескольких сотен и тысяч (например, молекулы полимеров). Вещества могут находиться в различных агрегатных состояниях: плазменном, газообразном, жидком и твердом. По своему происхождению вещества бывают как природными, так и синтетическими. Они могут обладать различными физическими, химическими или биологическими свойствами, которые зависят от их структуры. Главное отличие материалов от веществ заключается в том, что материалы характеризуются функциональными свойствами, определяющими области их практического применения. Материалы служат для осуществления производственной деятельности либо иной деятельности, например, связанной с решением проблем охраны здоровья или окружающей среды. На практике наибольшее распространение находят твердотельные материалы, обычно представляющие собой специально приготовленные образцы, которые обладают определенными конструктивными признаками, а именно: конфигурационными и размерными параметрами. К наноматериалам относятся такие материалы, которые характеризуются нанометровым масштабом размеров хотя бы в одном из трех измерений. При этом нанометровый масштаб размеров может относиться как к образцу материала в целом, так и к 7 его структурным элементам. Соответственно, в первом случае нанообъектами является непосредственно образцы материалов, во втором – их структурные элементы. Наноматериалы, также как и обычные материалы, могут находиться в различных агрегатных состояниях. На практике наибольшее распространение находят твердотельные наноматериалы. Наиболее характерными особенностями наноматериалов являются: появление нетрадиционных видов симметрии структуры и особых видов сопряжения границ раздела фаз; ведущая роль процессов самоорганизации в структурообразовании, доминирующих над процессами искусственного упорядочения; высокая полевая активность и каталитическая избирательность поверхности наночастиц и их ансамблей; особый характер протекания процессов передачи энергии, заряда и конформационных изменений, отличающихся низким энергопотреблением, высокой скоростью и наличием синергетических признаков. К числу основных причин проявления вышеуказанных особенностей наноматериалов и наносистем относятся: высокая удельная поверхность и связанная с ней высокая энергетическая активность наночастиц; повышенная роль размерных эффектов, которая проявляется как в индивидуальных наночастицах, так и в их ансамблях – из-за значительной площади границ раздела. Все это находит свое отражение в механизмах упорядочения наночастиц, свойствах наночастиц и их ансамблей, в закономерностях различных процессов. С понятием «наноматериалы» тесно связано понятие «наносистемы». В самом общем случае под системами понимаются определенным образом упорядоченные элементы, которые могут быть как материальными объектами, так и нематериальными, т.е. абстрактными (например, Периодическая система химических элементов представляет собой совокупность символов химических элементов, расположенных в определенном порядке, обычно, в форме таблицы, в соответствии с их

атомными номерами). В свою очередь, системы, образованные материальными объектами, могут подразделяться на различные виды в зависимости от характеризующих их признаков. Так, предметом изучения в физике, химии и биологии являются системы, представляющие собой совокупность материальных объектов, характеризующихся соответственно физическими, химическими или биологическими свойствами, а также взаимосвязями соответственно физической, химической или биологической природы. Например, в физике это – квантово-механические системы, т.е. нуклидо-электронные системы, дискретные значения энергии которых определяются набором квантовых чисел, в химии – системы химических реагентов, в биологии – системы биоконпонентов, образующих органы растений и животных и участвующих в их жизнеобеспечении. В практической деятельности особо важную роль играют функциональные системы, т.е. такие системы материальных объектов, которые используются или пригодны к использованию для решения практических задач и, соответственно, обладают функциональными свойствами, определяющими области их практического применения. Функциональные системы изготавливаются на основе различных материалов, которые подразделяются на сырье (материалы, ранее не подвергавшиеся переработке), и полуфабрикаты (материалы, подвергнутые предварительной, частичной переработке). Также как образцы материалов, функциональные системы обладают конструктивными признаками, отличаясь при этом более высокой конструктивной сложностью. Обычно они представляют собой устройства, конструкция которых определяется конфигурацией, размерами, пространственным расположением и взаимосвязью составляющих их компонентов. Функциональные наносистемы подобно наноматериалам характеризуются нанометровым масштабом размеров хотя бы в одном из трех измерений. Свойства функциональных наносистем, также как и свойства наноматериалов, могут проявляться весьма необычным образом в силу присущего им нанометрового масштаба размеров. На практике наибольшее распространение находят твердотельные функциональные наносистемы. Развитие наноматериалов происходит в тесной взаимосвязи с развитием нанотехнологий, которые представляют собой совокупность методов и средств, позволяющих контролируемым образом создавать наноматериалы, а также оперировать ими, т.е. применять их по тому или иному назначению. Таким образом, нано-технологии в общем случае обеспечивают решение следующих 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 как в ходе их получения, так и в ходе их применения. Научным фундаментом для развития наноматериалов и технологии их получения является нанонаука – систематизированное знание закономерностей и механизмов поведения вещества в нанометровом масштабе размеров. На сегодняшний день термин «нанонаука» не имеет достаточно точного определения. Это объясняется тем,



что процесс становления нанонауки шел постепенно, в ходе развития и слияния целого ряда различных научных направлений, и до настоящего времени этот процесс еще далек от своего завершения. Нано- наука основывается на физике, химии и биологии, прежде всего, на тех разделах этих научных дисциплин, в которых изучаются объекты, состоящие из счетного числа атомов или молекул, т.е. такие объекты, в которых в значительной степени проявляется сильная зависимость свойств от размеров, дискретная атомно- молекулярная структура вещества, квантовые закономерности его поведения. Так как на практике наибольшее распространение находят твердотельные наноматериалы, то, соответственно, важнейшим научным базисом для их развития является теория твердого тела.

Наноматериалы имеют ряд структурных особенностей, которые

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что такое нанотехнология в контексте научно-технического направления?
2. Каковы особенности материалов нанометрового масштаба?
3. Какова современная классификация нанотехнологии?
4. Каковы особенности технологии наноматериалов как одного из направлений нанотехнологии?
5. Как меняется роль поверхности при уменьшении размеров частиц и почему?

### ***Задание для выполнения:***

1. Переведите в нанометры: 83 А, 120 пм, 0.532 мкм
2. Переведите в микрометры: 1064 нм, 3 мм, 14 пм

### ***Литература:***

1. Золотухин И. В., Калинин Ю. Е., Стогней О. В. Новые направления физического материаловедения. Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 2000.
2. Шик А. Я., Бакуева Л. Г., Мусихин С. Ф., Рыков С. А. Физика низкоразмерных систем. СПб.: Наука, 2001.
3. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. М.: Техносфера, 2003. 15
4. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии: учеб. пособие. М.: Техносфера, 2005.
5. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи. М.: ИД "Вильямс", 2004.



## **Практическое занятие №2 «Основы поиска информации по объектам микро и наносистемной техники»**

### **КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

В настоящее время во всех развитых странах значительное внимание уделяется исследованиям и разработкам в области НТМ. Под нанотехнологиями понимают совокупность методов и приемов, позволяющих создавать и (или) модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм хотя бы в одном измерении, и осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба [1]. Под наноматериалами - материалы, свойства которых определяются упорядоченной структурой их фрагментов с размером от 1 до 100 нм [2].

По данным библиометрического анализа, область НТМ, в связи с возлагаемыми на нее большими инновационными ожиданиями, развивается очень быстро - практически экспоненциально [3, 4]. В сочетании с мультидисциплинарным характером НТМ, сложной внутренней структурой, не устоявшейся терминологией и крайней диверсификацией источников (включающих патенты) это серьезно затрудняет поиск информации по НТМ - выбор БД и ИПС, формулирование поисковых запросов [4].

Для поиска информации по НТМ критически важны релевантность ресурсов области, полнота и ретроспектива охвата ими первичных источников различных типов, их функциональные возможности, связанные с обработкой и анализом результатов. Кроме того, работа с разными БД и ИПС предполагает использование разных поисковых стратегий.

При выборе ресурса для поиска информации по НТМ целесообразно учитывать ее общие и функциональные характеристики, среди которых:

- производитель, интерфейс, цена;
- полнота предметного и временного охвата данных и своевременность их обновления;
- характер индексирования; поисковые возможности;
- режимы просмотра, сохранения и анализа результатов;
- система информирования и поддержки пользователя.

Основная методологическая проблема поиска информации по НТМ - критерии отбора публикаций для анализа и их воплощение в поисковые запросы. Сам поиск возможен несколькими способами: свободный поиск по релевантным терминам; поиск с использованием систем индексируемой терминологии; поиск по патентным классификациям и другие.

Простой способ, реализуемый во всех БД и ИПС и наиболее часто используемый в библиометрических исследованиях - свободный поиск по релевантным НТМ терминам. Основная проблема - не устоявшаяся терминология области. В целом термины можно разделить на три группы: первая состоит из слов, начинающихся с префикса «нано» (nano) с исключением нерелевантных (например, наноампер и т. д.), две другие - из терминов, не содержащих этот

префикс [5]. Вторую группу образуют термины, связанные исключительно с НТМ, тогда как третья включает термины, относящиеся к широкому кругу явлений, объектов и методов, которые важны для НТМ, но присущи не только ей.

Основной метод поиска информации по НТМ - лексический запрос, т. е. поиск с использованием набора ключевых слов, содержащих префикс «нано» [3]. Однако такой поиск обычно дает много «шума», например, нанометр, наносить,  $\text{NaNO}_3$  и т. д. Целесообразно использовать ключевые слова, не содержащие префикс «нано», но относящиеся к НТМ. В этом случае часто требуется помощь экспертов.

Подход, минимизирующий не всегда возможное участие экспертов - автоматическое итеративное получение поисковых ключевых слов. На первом этапе создается представительный набор публикаций по НТМ. На втором - из него отбирается набор ключевых слов, которые ранжируются по уровню их релевантности области на основе частоты встречаемости.

Возможен также гибридный подход - сочетание лексического запроса с цитированием. На первом этапе с помощью лексического запроса создается набор публикаций. Затем идентифицируются работы, наиболее часто цитируемые в этом наборе. Третий этап - составление итогового списка наиболее важных публикаций. Наконец, возможно использование в качестве объекта анализа ведущих журналов в области НТМ и отбор из них статей, релевантных запросу.

В связи со сложностью поиска информации по НТМ большое значение имеет ее индексирование в БД и ИПС. Заслуживают внимания такие ресурсы, как Web of Science (WoS), Inspec, Chemical Abstracts (CA), Российский индекс цитирования (РИНЦ) и ряд патентных БД. Относительно БД РИНЦ следует сказать, что это ресурс с наибольшим охватом отечественных публикаций за последние годы.

В БД WoS журналы приписаны к категориям. С недавнего времени среди них есть очень полезная в контексте НТМ категория Nanoscience & Nanotechnology. Согласно БД Journal Citation Reports, в 2011 г. к ней было отнесено 66 журналов. Всего на текущий момент категории Nanoscience & Nano-technology релевантны почти 250 тыс. публикаций.

Наиболее значимые журналы, отнесенные к категории Nanoscience & Nanotechnology БД WoS:

Журнал	Количество статей
Journal of Physical Chemistry C	16 511
Materials Science and Engineering A	15 356
Nanotechnology	9 454
Journal of Nanoscience and Nano- technology	8 010
Nano Letters	7 066

Advanced Materials	7 032
Journal of Vacuum Science Technology B	6 758
Scripta Materialia	6 577
Microelectronic Engineering	5 924
Physica E Low Dimensional Systems Nanostructures	5 397

В БД Inspec имеется специальный рубрикатор по НТМ и контролируемые термины Inspec Headings, представленные совместно с распределением по ним мировых и отечественных публикаций в табл. 1, 2.

Для построения поисковых запросов очень полезны имплементированные в БД тезаурусы, например, тезаурус SA Lexicon в БД СА. В поиск можно автоматически включать более узкие (NT), более широкие (BT) и родственные термины (RT). Пример, относящийся к контролируемому термину Nanotechnology, приведен в табл. 3.

Наиболее часто встречающиеся контролируемые термины с префиксом «нано» БД СА совместно с соответствующими распределениями мировых и отечественных журнальных публикаций и патентов показаны в табл. 4.

В ряде БД имеется не только предметное индексирование, но и индексирование веществ - так, среди ролей, приписываемых в БД СА веществам или классам веществ, есть роль Nanomaterial.

Таблица 1  
**Классификационные коды для НТМ (БД Inspec)**

Код	Название кода	Количество публикаций	
		Весь мир	Россия
A6146	Structure of solid clusters, nanoparticles, nanotubes and nanostructured materials	115 760	4 600
A8116	Methods of nanofabrication and processing	82 907	2 229
B2550N	Nanometre-scale semiconductor fabrication technology	30 770	523
A0710C	Micromechanical and nanomechanical devices and systems	26 891	203
A7550K	Amorphous and nanostructured magnetic materials	20 772	980
B7230M	Microsensors and nanosensors	16 450	208

A8783	Nanotechnology applications in biomedicine	14 931	247
-------	---	--------	-----

Таблица 2

**Контролируемые термины Inspec Headings (БД Inspec)**

Термин	Количество публикаций	
	Весь мир	Россия
Nanostructured materials	83 821	4 067
Nanoparticles	73 058	2 544
Nanotubes	44 332	1 062
Nanofabrication	43 938	1 386
Nanotechnology	38 847	790
Carbon nanotubes	38 250	853
Nanocomposites	32 131	1 049
Nanowires	20 908	272
Nanobiotechnology	11 349	211

В области НТМ важную роль играют патенты. Соответственно, при поиске информации велико значение патентных классификаторов. Сравнительно недавно три крупнейших мировых патентных ведомства - USPTO, EPO и JPO - усовершенствовали свои классификационные системы, объединив все имеющие отношение к НТМ патенты в единые классы: 977 (USPTO), Y01N (EPO), B82B (IPC) и ZNM (JPO).

Таблица 3

**Контролируемый термин Nanotechnology тезауруса CA Lexicon (БД CA)**

Количество записей	Иерархия терминов	Термин
2 905	BT1	Technology
5 961		<b>Nanotechnology</b>
3 554	NT1	Nanofabrication
435	NT2	Directed assembly
47	NT2	Positional assembly
107	NT3	Mechanosynthesis
435	RT	Directed assembly
1 560	RT	Nanomachines
12 547	RT	Nanostructured materials

70 480	RT	Nanostructures
--------	----	----------------

\* Действующий заголовок с 2002 г. по настоящее время.

Таблица 4

**Контролируемая терминология по НТМ (БД СА)**

Контролируемый термин	Публикации		Патенты	
	Весь мир	Россия	Весь мир	Россия
Nanoparticles	173 114	5 138	34 001	608
Nanotubes	92 908	1 993	21 560	225
Nanostructures	83 920	3 011	9 246	246
Nanocompo- sites	56 673	1 838	6 519	154
Nanowires	33 118	334	4 668	22
Nanocrystals	32 543	1 207	3 022	65
Pharmaceutical nanoparticles	17 124	248	3 750	116
Nanofibers	16 535	259	4 660	52
Nanocrystalline materials	8 169	403	534	10
Nanotechnology	6 659	243	492	27

Патентные ведомства и некоторые другие организации (например, MicroPatent и Delphion) предоставляют патентные данные в режиме онлайн бесплатно или по низким ценам. Возможности бесплатного доступа варьируются от простого поиска - библиографического и (или) по ключевым

словам - до уникальных патентных коллекций, отсутствующих в других источниках. Наряду с сайтами патентных ведомств существуют патентные БД, созданные отдельными лицами или компаниями (FreePatentsOnline, Google Patents, Patent Lens, PatBase, др.) - платные (например, FreePatentsOnline) и бесплатные (например, Patent Lens) [6].

Полностью или частично бесплатные БД обладают ограниченными информационными и функциональными возможностями. Они не практичны при проведении масштабных поисков, сохранении или выгрузке результатов. Патентные профессионалы обычно используют их лишь для предварительного поиска. Коммерческие патентные ресурсы лишены многих ограничений бесплатных сайтов.

Платные поисковые службы обычно охватывают несколько БД и являются более полными и оперативными, чем публичные. Кроме того, они имеют надежные серверы и удобные интерфейсы. Информация в них проиндексирована и структурирована. Информационно-поисковые системы Dialog, STN International и Questel-Orbit предоставляют доступ к библиографическим и полнотекстовым патентным БД. Индексирование в них выделяет технические, а не правовые аспекты патентного документа.

Для быстрого и точного поиска в библиографические БД введены разнообразные тезаурусы - иерархические классификаторы, специальные коды и промышленные категории.

В нашей стране в рамках Федеральной целевой программы 2008-2010 гг. по развитию инфраструктуры наноиндустрии участникам национальной нанотехнологической сети на платформе [elibrary.ru](http://elibrary.ru) Научной электронной библиотеки (НЭБ) открыт доступ к ряду информационных ресурсов в области НТМ. Прежде всего, это тематический рубрикатор и связанный с ним специализированный информационно-библиографический ресурс в области НТМ, позволяющий отбирать релевантные публикации российских организаций.

На платформе представлены распределения публикаций по федеральным округам, регионам, городам, научным организациям, а также по отраслям - согласно Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности. Эти информационные ресурсы включены в информационно-аналитическую систему (ИАС) [Nano.elibrary.ru](http://Nano.elibrary.ru), функциональность которой достаточно велика.

Например, отобрав релевантные публикации организации или группы организаций, можно получить для них различные распределения - по тематике, годам публикации, авторам, цитированию и т. д.

В системе [Nano.elibrary.ru](http://Nano.elibrary.ru) представлено около 1,5 тыс. отечественных научных организаций, среди которых 80 институтов СО РАН. Система позволяет легко выявить наиболее продуктивные из них в области НТМ:

Организация, город	Количество публикаций
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург	4 142
Химический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ), Москва	1 426
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва	1 415
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск	1 126
Физический факультет МГУ, Москва	997
Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка	965
Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва	931
Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка	885
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск	828

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва	785
--	-----

Система Nano.elibrary.ru применена нами в библиометрическом анализе продуктивности СО РАН в области НТМ [7]. Величины основных индикаторов, характеризующих публикации СО РАН 2000-2011 гг. в области НТМ. ИАС Nano.elibrary.ru:

Библиометрический индикатор	Значение
Общее количество: публикаций	4 079
авторов	7 365
цитирований	25 203
самоцитирований	3 933
статей, процитированных хотя бы 1 раз	2 699
Среднее количество: цитирований в расчете на 1 статью публикаций в расчете на 1 автора	6,18 0,55
Индекс Хирша	57

В целом, несмотря на серьезные трудности, связанные с недавним возникновением, быстрым развитием, междисциплинарным характером, терминологическими проблемами и диверсифицированными источниками, имеющиеся профессиональные ресурсы позволяют провести полноценный поиск информации в области НТМ. На всех стадиях - от формулировки запроса до анализа результатов - такой поиск требует тесного взаимодействия информационных специалистов и экспертов в области НТМ.

### *Литература*

1. Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 г. - URL: <http://www.rusnanonet.ru/docs/16687>.
2. Андриевский Р. А., Рогуля А. В. Наноструктурированные материалы. - М. : Академия, 2005. - 192 с.
3. Huang C., Notten A., Rasters N. Nanoscience and technology publications and patents: a review of social science studies and search strategies // J. of Technology Transfer. - 2011. - Vol. 36. - P. 145-172.
4. Зибарева И. В., Зибарев А. В., Бузник В. М. Российская нанонаука : библиометрический анализ на основе баз данных STN International // Химия в интересах устойчивого развития. - 2010. - Т. 18, № 2. - С. 215-227.
5. Буйлова Н. М., Леонтьева Т. М., Осипов А. И., Эпштейн Э. М. Ключевые слова для поиска публикаций по физике нанообъектов и



нанотехнологии // Научно-техническая информация. Сер. 2. - 2009. - № 6. - С. 45-47.

6. Зибарева И. В., Новикова Н. В. Онлайн-ресурсы по нанотехнологиям и наноматериалам // Копирайт. - 2012. - № 3. - С. 109-136.

7. Зибарева И. В., Елепов Б. С. Нанонаука и нанотехнология в Сибирском отделении РАН: библиометрический анализ на основе Российского индекса научного цитирования // Библиосфера. - 2012. - № 4. - С. 39-48.

### ***Задание для выполнения:***

По теме курсового проекта необходимо найти:

1. Три учебника, в том числе одна из библиотеки.
2. Две монографии, в том числе одна из библиотеки.
3. Три учебных пособия
4. Двенадцать статей в журналах РФ, в том числе три из библиотеки, шесть из которых не старше пяти лет.
5. Восемь статей в иностранных журналах, в том числе одна из библиотеки, четыре из которых не старше пяти лет.
6. Шесть диссертаций и авторефератов
7. Пять патентов РФ
8. Три зарубежных патента
9. Пять интернет статей на русско-язычных сайтах
10. Три интернет статьи на иностранных ресурсах)

### ***Перечень ресурсов для выполнения задания***

<b>Наименование ресурса</b>	<b>Плюсы</b>	<b>Минусы</b>
Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" <a href="http://window.edu.ru/">http://window.edu.ru/</a>	бесплатно, широкий охват	Узкопрофильные издания отсутствуют; в основном, учебная литература
Научная электронная библиотека <a href="http://elibrary.ru/defaultx.asp">http://elibrary.ru/defaultx.asp</a>	широкий охват, удобство поиска	Немного источников в открытом доступе, заторможенность
Научная библиотека ЮЗГУ <a href="http://lib.swsu.ru/">http://lib.swsu.ru/</a>	широкий охват, удобство поиска	Многие ценные книги в одном экземпляре и на руках
Академия Google <a href="http://scholar.google.ru/">http://scholar.google.ru/</a>	широкий охват, удобство поиска	некоторая специфичность поиска
Зарубежные системы	+широкий охват,	-английский язык,

<a href="http://www.sciencedirect.com/">http://www.sciencedirect.com/</a> <a href="http://www.iop.org/">http://www.iop.org/</a>	удобство поиска	все за \$\$\$
<a href="https://sci-hub.tw/">https://sci-hub.tw/</a>	поиск только по DOI, бесплатно	Этика использования, охватывает около 90% всех статей
Информационно-поисковая система Роспатента <a href="http://www1.fips.ru">http://www1.fips.ru</a>	широкий охват, удобство поиска	бесплатны только 3 последних выпуска, в университете есть подписка
Информационно-поисковая система esp@cenet <a href="http://ru.espacenet.com">http://ru.espacenet.com</a>	широкий охват, много бесплатных патентов, можно найти «исторические патенты»	сложная система поиска, трудности перевода
ЭБД ВАК РФ <a href="http://vak.ed.gov.ru/">http://vak.ed.gov.ru/</a>	широкий охват, бесплатный доступ к авторефератам	Три версии сайта с разными периодами индексирования
Специализированные научные сайты <a href="http://www.nanometer.ru/">http://www.nanometer.ru/</a> <a href="http://www.nanonewsnet.ru/">http://www.nanonewsnet.ru/</a> и др.	Много информации, познавательных статей	сложная система поиска
Специализированные онлайн- энциклопедии <a href="http://thesaurus.rusnano.com/">http://thesaurus.rusnano.com/</a> и прочее	Структурированная информация, можно найти ответы почти на все вопросы	Ограниченный объем статей
Зарубежные систем индексирования <a href="https://www.scopus.com">https://www.scopus.com</a> <a href="https://apps.webofknowledge.com/">https://apps.webofknowledge.com/</a>	Структурированная информация, самые большие системы, возможность искать по спискам источников и цитированию	Платная система, в университете есть подписка

## Практическое занятие №3 «Классификация и характеристики объектов микро и наносистемной техники»

### КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

обусловлены наличием параметров, которые могут относиться к структуре как в целом, так и к ее отдельным элементам. В свою очередь, структурные особенности наноматериалов находят свое отражение в необычном проявлении их свойств. Поскольку наноматериалы лежат в основе создания наносистем, то свойства наносистем в значительной степени зависят от свойств наноматериалов. Существуют различные виды наноматериалов, каждый из которых характеризуется присущей ему спецификой структуры, и как следствие, свойств. Особенности наноматериалов и создаваемых на их основе наносистем проявляются, прежде всего, в размерных эффектах, среди которых особое место занимают квантовые эффекты. Наноматериалы подразделяются по степени структурной сложности на наночастицы и наноструктурные материалы (рис. 1). Наночастицы представляют собой наноразмерные комплексы определенным образом взаимосвязанных атомов или молекул



К наночастицам относятся: нанокластеры, среди которых различают упорядоченные нанокластеры, характеризующиеся наличием определенного

порядка в расположении атомов или молекул и сильными химическими связями, и неупорядоченные нанокластеры, характеризующиеся, соответственно, отсутствием порядка в расположении атомов или молекул и слабыми химическими связями; нанокристаллы (кристаллические наночастицы), характеризующиеся упорядоченным расположением атомов или молекул и сильными химическими связями – подобно массивным кристаллам (макротристаллам). фуллерены, состоящие из атомов углерода (или других элементов), образующих структуру в виде сфероподобного каркаса; нанотрубки, состоящие из атомов углерода (или других элементов), образующих структуру в виде цилиндрического каркаса, закрытого с торцов каркасными куполами.

1. Классификация наноматериалов по структурным признакам супермолекулы, состоящие из «молекулы-хозяина» с пространственной структурой, в полости которого содержится «молекула-гость»; биомолекулы, представляющие собой сложные молекулы биологической природы, характеризующиеся полимерным строением (ДНК, белки); мицеллы, состоящие из молекул поверхностно-активных веществ, образующих сфероподобную структуру; липосомы, состоящие из молекул особых органических соединений – фосфолипидов, образующих сфероподобную структуру. Наноструктурные материалы представляют собой ансамбли наночастиц. В таких материалах наночастицы играют роль структурных элементов. Наноструктурные материалы подразделяются по характеру взаимосвязи наночастиц на консолидированные наноматериалы и нанодисперсии. Консолидированные наноматериалы – это компактные твердофазные материалы, состоящие из наночастиц, которые имеют фиксированное пространственное положение в объеме материала и жестко связаны непосредственно друг с другом. К консолидированным наноматериалам относятся: нанокристаллические материалы, состоящие из нанокристаллов, которые обычно называют нанозернами, или нанокристаллитами; фуллериты, состоящие из фуллеренов; фотонные кристаллы, состоящие из пространственно упорядоченных элементов, которые сравнимы по размеру в одном, двух или трех направлениях с полудлиной световой волны; слоистые наноконкомпозиты (сверхрешетки), состоящие из слоев различных материалов наноразмерной толщины. матричные наноконкомпозиты, состоящие из твердофазной основы – матрицы, в объеме которой распределены наночастицы (или нанопроволоки); нанопористые материалы, характеризующиеся наличием нанопор; наноаэрогели, содержащие прослойки наноразмерной толщины, разделяющие поры. Нанодисперсии представляют собой дисперсные системы с наноразмерной дисперсной фазой. К нанодисперсиям относятся указанные выше матричные наноконкомпозиты и нанопористые материалы, а также: нанопорошки, состоящие из соприкасающихся друг с другом наночастиц; наносuspensions, состоящие из наночастиц, свободно распределенных в объеме жидкости; наноэмульсии, состоящие из наночастиц жидкости, свободно распределенных в объеме другой жидкости; наноаэрозоли, состоящие из наночастиц или наночастиц, свободно

распределенных в объеме газообразной среды. Особой разновидностью наноструктурных материалов являются биомолекулярные комплексы, которые, так же как и биомолекулы, имеют биологическую природу. Довольно часто образцы различных наноструктурных материалов являются объемными (массивными), т.е. характеризуются микро- или макроразмерами, в то время как составляющие их структурные элементы являются наноразмерными. В разных наноматериалах могут иметь место те или иные особенности проявления эффектов, связанных с малыми размерами составляющих их структур. Так в нанокристаллических и нанопористых материалах резко увеличивается удельная поверхность, т.е. доля атомов, находящихся в тонком ( $\sim 1$  нм) приповерхностном слое. Это приводит к повышению реакционной способности нанокристаллов, поскольку атомы, находящиеся на поверхности, имеют ненасыщенные связи в отличие от атомов в объеме, которые связаны с окружающими их атомами. Изменение соотношения атомов на поверхности и в объеме также может привести к атомной реконструкции, в частности, к изменению порядка расположения атомов, межатомных расстояний, периодов кристаллической решетки. Размерная зависимость поверхностной энергии нанокристаллов предопределяет соответствующую зависимость температуры плавления, которая для нанокристаллов становится меньше, чем для макрокристаллов. В целом в нанокристаллах наблюдается заметное изменение тепловых свойств, что связано с изменением характера тепловых колебаний атомов. В ферромагнитных наночастицах при уменьшении размера ниже некоторого критического значения становится энергетически невыгодным разбиение на домены. В результате наночастицы превращаются из полидоменных в однодоменные, приобретая при этом особые магнитные свойства, выражающиеся в суперпарамагнетизме. Весьма необычными свойствами в силу специфики своей структуры характеризуются ф молекулярные комплексы, функционирующие по законам молекулярной химии и биологии. Особенности структуры и свойств визуальных наночастиц кластера образуемых на их основе консолидированных наноматериалов и нанодисперсий. Типичным тому примером являются нанокристаллические материалы, которые характеризуются пониженной долей зерен и, соответственно, повышенной долей межзеренных границ в объеме материала. Одновременно в них происходит изменение структурных характеристик как зерен, так и межзеренных границ. В результате в нанокристаллических материалах существенно изменяются механические свойства. При определенных условиях эти мат свержпластичностью. В практическом отношении особый интерес представляют электронные свойства наноструктур, обусловленные квантовыми эффектами. Наноматериалы служат основой для создания наносистем различного функционального назначения, которые подразделяются по принципу действия на электронные, оптические и механические структуры характеризуются фуллерены и нанотрубки, а также молекулярные и бимолекулярные комплексы, функционирование которых подчиняется соответствующим законам молекулярной химии и биологии. Особенности

структуры и свойств видуальных наночастиц накладывают определенный отпечаток на структуру и свойства образуемых на их основе консолидированных наноматериалов и нанодисперсий. Типичным тому примером являются нанокристаллические материалы, которые характеризуются пониженной долей зерен и, соответственно, повышенной долей границ в объеме материала. Одновременно в них происходит изменение структурных характеристик как зерен, так и межзеренных границ. В результате в нанокристаллических материалах существенно изменяются механические свойства. При определенных условиях эти материалы могут обладать сверхтвердостью или сверхпластичностью. В практическом отношении особый интерес представляют электронные свойства наноструктур, обусловленные квантовыми эффектами. Наноматериалы служат основой для создания наносистем различного функционального назначения, которые подразделяются по принципу действия на электронные, оптические и механические – рис. 2.



Рис. 2. Классификация видов наносистемной техники по функциональному назначению

Действие электронных наносистем основаны на нанотрубках, а также молекулярные и био-е которых подчиняется соответственно законам молекулярной химии и биологии. Особенности структуры и свойств индивидуальной структуры и свойства образуемых на их основе консолидированных наноматериалов и нанодисперсий. Типичным тому примером являются нанокристаллические материалы, которые характеризуются пониженной долей зерен и, соответственно, повышенной долей границ в объеме материала. Одновременно в них происходит изменение структурных характеристик как зерен, так и межзеренных границ. В результате в нанокристаллических

материалах существенно изменяются механические свойства. Материалы могут обладать сверхтвердостью или сверхпластичностью. В практическом отношении особый интерес представляют электронные свойства наноструктур, обусловленные квантовыми эффектами. Наноматериалы служат основой для создания наносистем различного функционального назначения, которые подразделяются по принципу действия на электрон- 2. Действие электронных наносистем основано на преобразовании электрических сигналов, оптических – на преобразовании оптических (световых) сигналов в электрические и наоборот, механических – на преобразовании механического движения. Совокупности наносистем определенных типов образуют соответствующие отрасли наносистемной техники – наноэлектронику, нанооптику и наномеханику. Развитие различных типов наносистем идет в тесной взаимосвязи, что приводит к созданию более сложных по конструкции, интегрированных наносистем, таких как нанооптоэлектронные, наноэлектромеханические, нанооптомеханические и нанооптоэлектромеханические системы. Создание наносистем является дальнейшим шагом на пути развития соответствующих микро- систем. Обычно на практике наносистемы встраиваются в различные микросистемы, формируя тем самым перспективное направление современной системной техники – микронаносистемную технику

### ***Контрольные вопросы:***

1. Объекты и методы нанотехнологий. Понятие наночастиц.
2. Инструменты и методы нанотехнологий.
3. Квантовые точки, нанотрубки, тонкие пленки.
4. Наноструктуры, образуемые липидами. Монослои, мицеллы, липосомы. Биомембраны.
5. Основные принципы формирования наносистем. Процессы получения нанообъектов «сверху — вниз» и «снизу-вверх».
6. Классификация наночастиц и нанообъектов.

### ***Литература:***

1. Нанотехнологии Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс Техносфера, 2006
2. Физические и химические основы нанотехнологий. Рамбиди Н.Г.Березкин А.В. ФИЗМАТЛИТ, 2008
3. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Миронов В. ФИЗМАТЛИТ, 2004
4. Коллоидная химия Амелина Е.А., Перцов А.В., Шукин Е.Д. Высшая школа 2007
5. Молекулярная и клеточная биофизика Джексон М. Б. БИНОМ 2009



## Практическое занятие №4 «Физические принципы функционирования объектов микро и наносистемной техники»

### КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

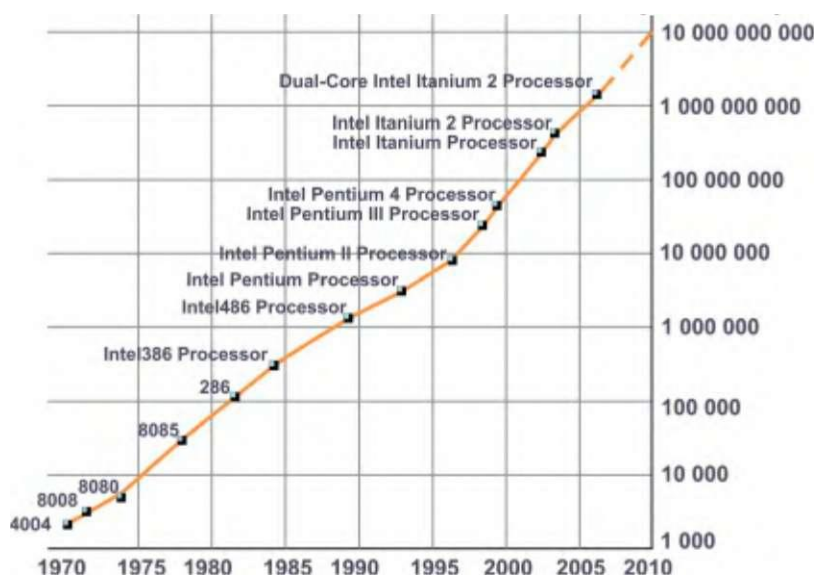
**Нанoeлектроника** - область современной электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных электронных схем и устройств на их основе с размерами элементов менее 100 нм.

Основная задача нанoeлектроники состоит в разработке новых электронных устройств со сверхмалыми размерами, создании методов их получения и объединения в интегральные схемы. Научные исследования и технологические разработки в нанoeлектронике опираются на передовые знания в области электроники, механики, материаловедения, физики, химии, биологии и медицины. И объединяет их объект исследований - структуры со сверхмалыми размерами и необычными для «большого» мира свойствами.

Известно, что основной тенденцией развития всей электроники в целом является **миниатюризация**, или уменьшение массы и размеров электронных приборов и устройств. Последовательные технологические переходы от электротехнических компонентов - к электронным лампам, от ламп - к транзисторам, от транзисторов - к интегральным схемам позволили создать современные мобильные телефоны, карманные компьютеры, индивидуальные медицинские аппараты и многие другие продукты электроники, прочно вошедшие в жизнь современного человека.

В 1965 году один из основателей компании Intel Гордон Мур сделал интересное открытие, Он заметил, что процесс постоянного уменьшения размеров элементов интегральных схем подчиняется некоторому закону, позднее названному *законом Мура*.

В соответствии с этим законом плотность компоновки электронных компонентов в интегральной схеме удваивается приблизительно каждые полтора-два года, что приводит к соответствующему росту мощности вычислительных средств и их производительности. Иллюстрация этого закона, применительно к процессорам, выпускаемым компанией Intel, приведена на рисунке



*Рис.* Закон Мура

В настоящее время увеличение плотности компоновки элементов в составе интегральной схемы возможно только за счет уменьшения их физических размеров. Очевидно, что эта закономерность не может действовать бесконечно и непрерывное уменьшение размеров электронных изделий должно когда-то и как-то закончиться. Тогда возникает вопрос: «А какие минимальные размеры могут иметь элементы современных микросхем?». Ответ на этот вопрос уже существует. Сегодня техника вплотную приблизилась к теоретической возможности запоминать и передавать 1 бит (состояния логического «0» или «1») информации с помощью одного электрона, положение которого в пространстве может быть задано одним атомом. Таким образом, размеры элементов интегральных схем будут составлять всего несколько атомных слоев. Но при таких размерах элементов (порядка нескольких нанометров) законы классической физики уже перестают действовать, и поведение таких элементов описывается законами квантовой механики.

С момента формулировки закона Мура прошло более 40 лет. Несмотря на некоторые колебания в периоде удвоения, закон Мура продолжает работать. Однако, в 2007 году сам Мур признал, что его закон перестаёт действовать уже из-за атомарных ограничений и влияния скорости света.

### ***Контрольные вопросы***

6. Дайте определение понятию «нанoeлектроника».
7. Сформулируйте закон Мура.
8. Что представляет собой эффект кулоновской блокады?
9. Что представляет собой структура одноэлектронного транзистора?
10. Объясните принцип работы одноэлектронного транзистора.
11. Что представляет собой эффект резонансного туннелирования?
12. Что представляет собой структура резонансно-туннельного диода?

13. Дайте определение квантового компьютера.
14. Что такое кубит?
15. Дайте определение понятию «квантовая оптоэлектроника».
16. Дайте определение понятию «светодиод».
17. Что представляет собой светодиод на гомоструктуре?
18. Объясните принцип работы светодиода на гомоструктуре.
19. Что представляет собой светодиод на гетероструктуре?
20. Объясните принцип работы светодиода на гетероструктуре.
21. Дайте определение понятию «полупроводниковый лазер».

### *Литература*

1. Нанотехнологии: Азбука для всех / под ред. Ю.Д. Третьякова. М.: Физматлит, 2008.
2. *Кобаяси Н.* Введение в нанотехнологию: пер. с японск. / Н. Кобаяси. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
3. Очарование нанотехнологии: пер. с нем. / у. Хартманн. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
4. Нанoeлектроника: учебное пособие для студ.: в 3 ч. Ч. 3: Перенос носителей заряда в низкоразмерных структурах / В.Е. Борисенко,
5. И.Воробьева, Е.А. Уткина. Минск: БГУИР, 2004.
6. *Валиев К.А.* Квантовые компьютеры: надежды и реальность. Регулярная и хаотическая динамика (РХД) / К.А. Валиев, А.А. Кокин. М.-Ижевск, 2001.
7. *Бахтизин Р.З.* Голубые светодиоды / Р.З. Бахтизин // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 3. С. 75-83.
8. *Юнович А.Ю.* Свет из гетероперехода / А.Ю. Юнович // Природа. 2001. № 6. С. 38-46.

## **Практическое занятие №5 « Материалы датчиков и технологии изготовления »**

### **КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

Нанотехнологии позволяют создавать и использовать материалы и устройства нанометровых размеров. Существует два подхода при получении нанометровых объектов и изделий. Эти подходы принято называть технологиями «сверху-вниз» и «снизу-вверх».

Технология «сверху-вниз» основана на уменьшении размеров тел механической или иной обработкой, вплоть до получения объектов нанометрового размера. Так, например, наночастицы можно получить, перемалывая в специальной мельнице материал макроскопических размеров.

#### ***Литография***

В настоящее время литография является одним из основных инструментов получения наноструктур в электронике (рис. 2.9). Название «литография» происходит от греческих слов «литое» - камень и «графо» - пишу, что дословно означает «пишу на камне». Литография позволяет создавать наноструктуры на поверхности твердых тел.

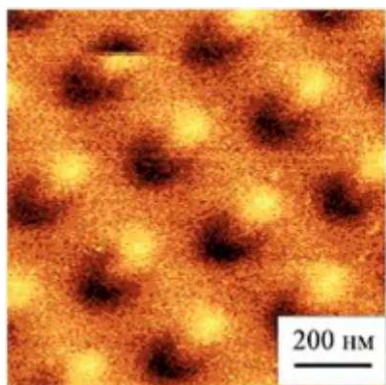
В простейшем случае литография состоит из нескольких этапов.

На первом этапе на поверхность твердого тела наносится слой фоторезиста.

Фоторезист - это светочувствительное вещество, которое под действием излучения изменяет структуру поверхности, на которую нанесено. Далее на поверхность наносится фотошаблон, представляющий собой маску из прозрачных и непрозрачных для излучения участков, иными словами, трафарет для «резьбы» по поверхности твердого тела.

Следующий этап процесса литографии называется экспонированием. Поверхность твердого тела с нанесенным на нее фоторезистом и наложенным сверху фотошаблоном подвергается облучению оптическим источником излучения (лампа или лазер). В результате, под прозрачными для излучения участками фотошаблона происходит изменение структуры поверхности, вызванное действием фоторезиста. Измененная фоторезистом часть поверхности может быть удалена вместе с фоторезистом с помощью процедуры травления. Химическое травление основано на растворении специальными химическими веществами (травителями) поверхности, изменившей свою структуру под действием облученного фоторезиста. Таким образом можно «вырезать» на поверхности твердого тела достаточно сложные структуры.

Литография является одним из основных этапов создания микросхем - устройств, управляющих электронной техникой. Уменьшение размеров микросхем может быть достигнуто при уменьшении размеров «рисунков», формируемых при литографии.



**Рис. 2.9.** Структура, полученная при помощи литографии

Характеристикой источника оптического излучения, используемого для «засветки» фоторезиста через фотошаблон является длина волны излучения. Из-за явления дифракции данная величина не может быть больше размера деталей, которые мы хотим вырезать с помощью литографии. Если мы используем в литографии источник излучения с длиной волны в 1 микрон, то и минимальный размер деталей, которые нам удастся нарисовать, будет таким же. Для того чтобы нарисовать с помощью литографии объект нанометрового размера, необходимо использовать источники дальнего ультрафиолетового излучения с длиной волны в несколько десятков нанометров.

### **Эпитаксия**

Технология «снизу-вверх» сводится к получению наноразмерного объекта путем сборки из отдельных атомов и молекул. В большинстве технологий сборки наноматериалов из отдельных атомов лежит явление конденсации.

Конденсация (от лат. *condenso* - уплотняю, сгущаю) - переход вещества из газообразного состояния в жидкое или твёрдое вследствие его охлаждения или сжатия.

Дождь, снег, роса, иней - все эти явления природы представляют собой следствие конденсации водяного пара в атмосфере. Конденсация пара возможна только при температурах ниже критической для данного вещества. Аналогично молекулам воды, можно «конденсировать» атомы и молекулы других химических элементов. Конденсация, как и обратный процесс - испарение, является примером фазовых превращений вещества.

Процесс фазового превращения из газа в жидкость или из жидкости в твердое вещество протекает за определенное время. На начальной стадии процесса превращения образуются нано-частицы, которые затем перерастают в макроскопические объекты. Наночастицы можно получить, если «заморозить» фазовый переход на начальной стадии.

При конденсационном методе получения наночастиц необходимо испарить из макроскопического тела атомы, из которых и будет проходить «сборка». Испарение можно произвести за счет термического или лазерного разогрева макроскопического тела. Испаренные атомы необходимо перенести в

область пониженных температур, где и происходит их конденсация в наночастицы. Сложность технологического процесса заключается в создании условий, при которых наночастицы не перерастут в макроскопические тела.

На основе явления конденсации получают фуллерены, углеродные трубки, нанокластеры и наночастицы различного размера.

Управляемая конденсация атомов на поверхности кристалла (подложки) лежит в основе технологии эпитаксии.

Эпитаксия (от греч. *epi* - на, над и греч. *taxis* - расположение, порядок) - ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки) (рис. 2,10).

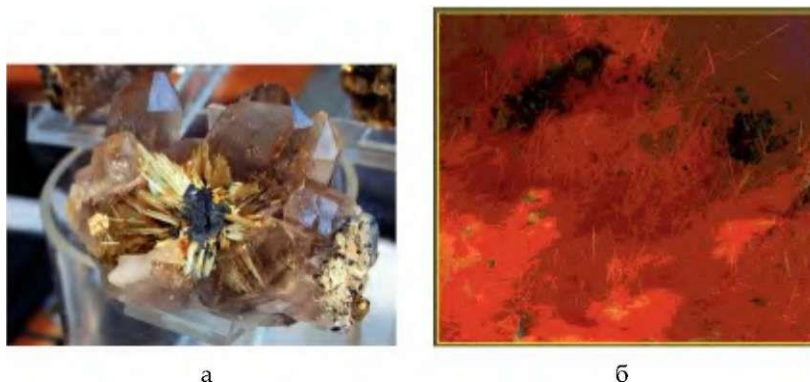


Рис. 2.10. Эпитаксия кристаллов рутила на гематите: а) сам кристалл (фото); б) отдельная структура кристалла (электронный микроскоп)

Эпитаксию необходимых атомов на поверхность кристалла можно производить как из жидкой, так и газовой фазы. Процесс эпитаксии обычно начинается с возникновения на подложке отдельных кристалликов, которые, срастаясь друг с другом, образуют сплошную плёнку. Современные методы эпитаксии позволяют наращивать слои толщиной в несколько (даже один!) атомных слоев, а также последовательно наращивать слои с различными физико-химическими свойствами.

Эпитаксия широко используется в микроэлектронике (транзисторы, интегральные схемы, светодиоды и т. д.), в квантовой электронике (многослойные полупроводниковые гетероструктуры, инжекционные лазеры), в устройствах интегральной оптики; в вычислительной технике (магнитные элементы памяти) и т. п.

Самым современным методом осуществления процесса эпитаксии является молекулярно-лучевая эпитаксия. При этом методе на подготовленную и очищенную подложку направляются потоки отдельных атомов (рис. 2.11). Скорость потока каждого сорта атомов регулируется независимо.

Достигая поверхности подложки, атомы тем или иным способом упорядочиваются (рис. 2.12), образуя необходимые нам структуры.

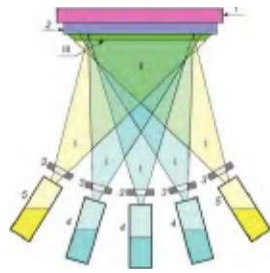


Рис. 2.11. Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии для получения легированных тройных соединений

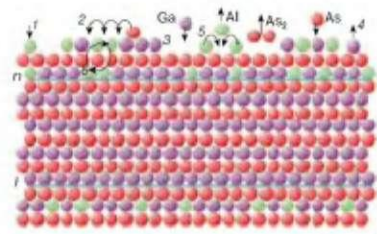


Рис. 2.12. Процесс роста пленки легированных тройных соединений

Рис. 2.11. Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии для получения легированных тройных соединений

### **Самоорганизация и самосборка в нанотехнологиях**

Современную науку всегда интересовали вопросы: Как из отдельных атомов и молекул возникают сложные организмы и системы? Как появились первые живые существа на Земле? Для ответа

на них нужно понять принципы возникновения более сложного из простого. Процесс возникновения сложных упорядоченных структур из более простых называется самоорганизацией.

Данное понятие ввел немецкий ученый Герман Хакен: «Самоорганизация - процесс упорядочения в открытой системе за счет согласованного взаимодействия множества элементов - ее составляющих». Самоорганизация связана с формированием более сложной структуры, чем изначальная. В физике и химии самоорганизация представляет собой переход от неупорядоченного движения атомов и молекул к упорядоченным структурам.

Науку о самоорганизующихся системах называют синергетикой (греч. *sinergetike* - совместное действие). Главная идея синергетики - идея о принципиальной возможности спонтанного возникновения порядка и организации из беспорядка и хаоса в результате процесса самоорганизации.

Методы синергетики были использованы практически во всех научных дисциплинах: от физики и химии до социологии и филологии.

Самоорганизация - одно из наиболее удивительных явлений природы. В природе известно много самоорганизующихся систем. В животном мире, в качестве примера, можно привести строительство шестиугольных сот у пчел (рис. 2.13), коллективное поведение муравьев и т.д.

Классическим примером возникновения пространственной упорядоченной структуры является возникновение ячеек Бенара (рис. 2.14).

В 1900 году появилась научная статья этого автора с фотографией структуры, напоминающей пчелиные соты. Данная структура возникала в широком плоском сосуде, наполненном ртутью и подогреваемом снизу. В слое



ртути (или другой вязкой жидкости) при разогреве возникает разница температур между нижней и верхней поверхностью. При достижении некоторого критического значения разницы температур в слое ртути можно наблюдать образование одинаковых шестигранных призм. В центральной части такой призмы разогретая снизу жидкость поднимается вверх, а по граням охлажденная жидкость опускается вниз. Такая структура поддерживается за счет неоднородности распределения температуры по толщине слоя жидкости. Неоднородность температуры создается притоком энергии (разогревом) с нижней стороны слоя жидкости и оттоком энергии с верхней поверхности слоя.

### ***Основные свойства самоорганизующихся систем***

Теория самоорганизации имеет дело с открытыми нелинейными диссипативными (диссипативность - особое динамическое состояние системы, которое можно определить как качественно своеобразное макроскопическое проявление процессов, протекающих на микроуровне) системами, далекими от состояния равновесия.

В термодинамике существует понятие закрытой системы, т.е. системы, которая не обменивается со средой веществом и энергией. В соответствии с первым началом термодинамики в закрытой системе энергия сохраняется, хотя и может приобретать различные формы. Для закрытых систем сформулировано второе начало термодинамики, следствием которого является неизбежность перехода любой более организованной и упорядоченной структуры в менее организованную и упорядоченную.

Так, например, согласно второму началу термодинамики, запас энергии во Вселенной иссякает, а вся Вселенная неизбежно приближается к «тепловой смерти». Со временем способность Вселенной поддерживать организованные структуры ослабевает, и такие структуры распадаются на менее организованные. Это значит, что Вселенную ждет все более «однородное» будущее.

Примеры эволюции в живой природе показывают нам развитие от простого к сложному, от низших форм организации к высшим, от менее организованного к более организованному. Попытки согласовать второе начало термодинамики с выводами биологических наук долгое время были безуспешными. Классическая термодинамика не могла описывать закономерности открытых систем. И только с введением понятия открытых систем и их изучением появилась такая возможность.

Открытые системы - это системы, которые поддерживаются в определенном состоянии за счет непрерывного притока извне вещества или энергии. Постоянный приток вещества или энергии является необходимым условием существования неравновесных состояний в противоположность замкнутым системам.

Живые организмы существуют за счет преобразования внешней энергии в упорядоченную структуру. Рассмотренные выше ячейки Бренара -

упорядоченная структура, которая поддерживается за счет притока энергии извне. Ячейки Бернара исчезнут, как только мы перестанем подогревать слой жидкости снизу.

При самоорганизации важным является такое свойство, как нелинейность систем. Дать определение этому термину достаточно сложно. Между системой и средой могут иногда создаваться отношения обратной положительной связи. Система влияет на свою среду таким образом, что в среде вырабатываются некоторые условия, которые, в свою очередь, обуславливают изменения в самой этой системе. Последствия такого рода взаимодействия открытой системы и ее среды могут быть самыми неожиданными и необычными. Нелинейные системы, являясь неравновесными и открытыми, сами создают и поддерживают неоднородности в среде.

Благодаря неравновесному протеканию множества микропроцессов система приобретает на макроуровне некоторую интегративную результирующую способность, которая качественно отличается от того, что происходит с каждым отдельным ее микроэлементом. Благодаря диссипативности, в неравновесных системах могут спонтанно возникать новые типы структур, совершаться переходы от хаоса и беспорядка к порядку и организации, возникать новые динамические состояния материи.

### *Использование самоорганизации в нанотехнологиях*

Среди различных перспективных подходов формирования наноструктур все большее значение приобретают нанотехнологии, использующие самоорганизацию. Предполагается, что самоорганизация позволит создавать наноструктуры из отдельных атомов как вышеупомянутая технология «снизу-вверх». Одна из важнейших проблем, стоящих перед нанотехнологией - заставить молекулы группироваться определенным способом, самоорганизовываться, чтобы в итоге получить новые материалы или устройства.

Какие наноструктуры можно строить, используя данные технологии? Мы говорим о разных материалах, часто они могут образовываться в процессе самоорганизации. Это позволит создавать устройства, формируя их из атомов и молекул, используя процессы самоорганизации так, как их использует природа. В природе действительно существуют подобные системы и осуществляются подобные процессы. Самым ярким примером является пример сборки сложнейших биологических объектов на основе информации, записанной в ДНК (см., например, рис. 2.15).

Как было раньше? Мы брали, скажем, кусок железа и делали из него молоток, просто убирая все лишнее (технология «сверху-вниз»). Нанотехнология же в ближайшем будущем позволит делать изделия из материалов с «нуля», причем не всегда будет нужно складывать атом к атому «вручную», мы сможем использовать явление самоорганизации, самосборки наноструктур и наноустройств. При этом достаточно трудно ожидать, что на

наноуровне возможна искусственная манипуляция отдельными нанообъектами с целью «ручной» сборки материала. Это пока что нецелесообразно (медленно и требует выполнения большого объема работы). Поэтому естественным способом получения наноматериалов может являться самоорганизация.

При определенных условиях микро- или нанообъекты сами начинают выстраиваться в виде упорядоченных структур. Противоречия с фундаментальными законами природы здесь нет - система в данном случае неизолированная, и на нанообъекты оказывается какое-то внешнее воздействие. Однако, в отличие от упомянутых методов, данное воздействие направлено не на конкретную частицу, а на все сразу. Вам не нужно выстраивать требуемую структуру вручную, помещая нанообъекты в требуемые точки пространства один за другим - создаваемые условия таковы, что нанообъекты делают это сами и одновременно. Процессы, использующие создание таких особых условий, называются процессами самосборки, и уже сейчас они играют важнейшую роль во многих областях науки и техники.

Многие из вас знают игру в бильярд и укладку шаров в «пирамиду» - в замкнутом объеме шары сами складываются в равносторонний треугольник, причем одним способом. Если же их «насыпать» в большой ящик и немного потрясти, то они самопроизвольно образуют практически идеально упорядоченную структуру. В некоторых случаях атомы одного сорта также можно рассматривать в виде однородных по размеру шаров, которые аналогичным образом упорядочиваются в ограниченном объеме. В химии и кристаллографии даже существует термин «плотнейшая шаровая упаковка».

Аналогично примеру с бильярдными шарами, наночастицы способны самопроизвольно укладываться на поверхности твердых тел. Основными причинами такого «слипания» наночастиц являются различные силы, которые стремятся уменьшить общую площадь поверхности наночастиц и, следовательно, их поверхностную энергию.

Впервые упорядоченные массивы наночастиц золота диаметром  $\sim 4$  нм были получены в 1995 году, а двумя месяцами позже удалось «уложить» монодисперсные пятинанометровые частицы селенида кадмия. Чем однороднее были исходные наночастицы, тем «правильнее» становилась их упаковка в массиве.

Для самособирающихся компонентов все, что требуется от человека - это поместить достаточное их количество в пробирку и позволять им автоматически собраться в нужные конфигурации согласно их естественным свойствам.

На сегодняшний день синтезированы двумерные и трехмерные организованные массивы нанокристаллов Pt, Pd, Ag, Au, Fe, Co, сплавов Fe-Pt, Au-Ag, наноструктур CdS/CdSe, CdSe/CdTe, Pt/Fe, Pd/Ni и т.д.

Кроме того, для анизотропных наночастиц удалось добиться формирования ориентационно-упорядоченных массивов. Однородные по

размеру наночастицы можно «собрать» в пространственно-упорядоченные структуры, представляющие собой одномерные «нити», двумерные плотно упакованные слои, трехмерные массивы или «малые» кластеры. Тип организации наночастиц и структура образующегося массива зависят от условий синтеза, диаметра частиц, природы внешнего воздействия на структуру.

Сегодня известны различные методы самосборки, позволяющие получать полезные упорядоченные структуры из микрочастиц. Для создания особых условий, при которых в конкретной системе происходит самосборка, могут быть использованы гравитационное, электрическое или магнитное поле, капиллярные силы, «игра» на смачиваемости-несмачиваемости компонентов системы и другие приемы. В настоящее время процессы самосборки начинают активно использоваться и в производстве. В частности, известная компания Intel внедряет процессы самосборки для создания компьютерных чипов нового поколения.

### ***Контрольные вопросы***

1. Дайте определение понятию «наноматериалы».
2. Какие виды наноматериалов вы знаете?
3. Что называют наночастицами и нанокластерами?
4. Какими причинами вызваны особые свойства наноматериалов?
5. Назовите примеры технологии «сверху-вниз».
6. Назовите примеры технологии «снизу-вверх».
7. Каковы основные этапы технологии литографии?
8. Как происходит процесс эпитаксии?

### ***Задачи***

1) При столкновении двух сферических нанокластеров, состоящих из 1000 частиц, произошло их объединение (слияние). Во сколько раз размер образовавшегося нанокластера будет больше размера исходных нанокластеров? Определите, во сколько раз уменьшится количество атомов, находящихся на поверхности образовавшегося кластера, по сравнению с исходными кластерами.

2) Оцените размер нанокластера из 50 атомов воды. Нанокластер из 50 атомов воды падает на плоскую поверхность и равномерно растекается по ней, образуя плоское круглое пятно, толщиной в 1 атомный слой. Оцените размер образовавшегося пятна.

### ***Литература***

1. Алферов ЖМ. Наноматериалы и нанотехнологии / Ж.И. Алферов и др. // Нано- и микросистемная техника. 2003. № 8.
2. Нанотехнологии: Азбука для всех / под ред. Ю.Д. Третьякова. М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2008.

3. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию: пер. с яп. / Н. Кобаяси. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
4. Хартманн у. Очарование нанотехнологии: пер. с нем. / у. Хартманн. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
5. Демиховский В.Я. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? / В.Я. Демиховский // Соросовский образовательный журнал. 1997. №5.
6. Гольдин Л.Л. Квантовая физика. Вводный курс / Л.Л. Гольдин, Г.И. Новикова. М.: Ин-т компьютерных исследований, 2005.
7. [www.physicsweb.org/article/news/7/6/16](http://www.physicsweb.org/article/news/7/6/16)
8. <http://ru.wikipedia.org/>