

Praca zbiorowa pod redakcją
Anny Świderskiej-Srody
Witolda Łojkowskiego
Małgorzaty Lewandowskiej
Krzysztofa J. Kurzydłowskiego

A circular inset showing a grayscale scanning electron micrograph of numerous spherical nanoparticles. The particles are densely packed and appear to have a textured, porous surface. The background of the cover is a dark blue to purple gradient with a white geometric pattern of interconnected lines forming a network of triangles and polygons.

ŚWIAT NANOCZĄSTEK

 PWN

Projekt okładki i stron tytułowych **Bartosz Dobrowolski**

Ilustracja na okładce **Adam Presz**

Wydawca **Katarzyna Włodarczyk-Gil**

Redaktor prowadzący **Iwona Lewandowska**

Redaktor **Małgorzata Galus**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Praca zbiorowa pod redakcją

Anny Świdorskiej-Środy

Instytut Wysokich Ciśnień, Polska Akademia Nauk

Wydział Zarządzania, Politechnika Białostocka

Witolda Łojkowskiego

Wydział Zarządzania, Politechnika Białostocka

Małgorzaty Lewandowskiej

Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska

Krzysztofa J. Kurzydłowskiego

Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska

Skład i łamanie **Dariusz Ziach**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegając praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujemy cudzą własność i prawo

Więcej na www.legalnakultura.pl

Polska Izba Książki

Publikacja została dofinansowana ze środków Wydziału Inżynierii
Materiałowej Politechniki Warszawskiej

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA

Copyright © for chapter 15. by Roman Pielaszek

Warszawa 2016

ISBN 978-83-01-18770-5

Wydanie I

Wydawnictwo Naukowe PWN SA

02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2

tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288

infolinia 801 33 33 88

e-mail: pwn@pwn.com.pl, www.pwn.pl

Informacje w sprawie współpracy reklamowej: reklama@pwn.pl

Druk i oprawa

Spis treści

Wprowadzenie	13
<i>Krzysztof J. Kurzydłowski, Małgorzata Lewandowska</i>	
1. Różne sposoby postrzegania nanotechnologii	17
<i>Witold Łojkowski, Anna Świdorska-Środa, Joanna Sobczyk</i>	
1.1. Wprowadzenie	17
1.2. Czym jest nanotechnologia	18
1.3. Jaka jest dzisiejsza nanotechnologia	19
1.4. Nanotechnologia w oczach środowiska akademickiego	21
1.5. Nanotechnologia z punktu widzenia przemysłu	24
1.6. Nanotechnologia w oczach rządów i instytucji finansujących naukę	26
1.7. Nanotechnologia w świecie przepisów, praw i standardów	27
1.8. Nanotechnologia w odbiorze społeczeństwa	28
1.9. Wpływ polityki edukacyjnej na rozwój nanotechnologii	29
1.10. Podsumowanie	30
Literatura	33
2. Technologie otrzymywania nanocząstek	35
<i>Urszula Narkiewicz</i>	
2.1. Metody wytwarzania nanocząstek w fazie ciekłej	38
2.1.1. Strącanie	39
2.1.2. Metoda zol-żel	43
2.1.3. Metody koloidalne	44
2.1.4. Metody solwotermalne	44
2.2. Metody otrzymywania nanocząstek w fazie gazowej	45
2.3. Metody otrzymywania nanocząstek w fazie stałej	47
2.4. Inne metody otrzymywania nanocząstek	48
2.4.1. Metoda samoorganizacji	48
2.4.2. Metoda wyładowania łukowego	48
2.4.3. Rozdrabnianie wybuchowe i elektroeksplozja	49
2.4.4. Techniki mikrofalowe	49
2.4.5. Techniki ultradźwiękowe	50
2.4.6. Metoda próżniowego odparowania przepływającego płynu	50
2.4.7. Metoda elektroosadzania	50

2.4.8.	Powlekanie obrotowe	51
2.4.9.	Strącanie w płynach w stanie nadkrytycznym	51
2.4.10.	Kontrolowana krystalizacja z amorficznych prekursorów	51
2.4.11.	Metody z udziałem mikroorganizmów	52
Literatura		52
3.	Nanomateriały węglowe	55
<i>Urszula Narkiewicz</i>		
3.1.	Zerowymiarowe nanomateriały węglowe	55
3.2.	Jednowymiarowe nanomateriały węglowe	57
Literatura		60
4.	Nanocząstki tlenków o szerokiej przerwie energetycznej jako luminofory i znaczniki biologiczne	62
<i>Marek Godlewski, Michał Marek Godlewski</i>		
4.1.	Wstęp	62
4.2.	Procesy rekombinacji promienistej	62
4.3.	Luminofory w lampach fluorescencyjnych	64
4.4.	Ziemie rzadkie jako aktywatory świecenia luminoforów	70
4.5.	Czy nanorozmiary są potrzebne	74
4.6.	Znaczniki fluorescencyjne do zastosowań w biologii i medycynie	77
4.7.	Znaczniki fluorescencyjne nowej generacji	79
4.8.	Zastosowanie luminoforów domieszkowanych jonami metali ziem rzadkich w badaniach biomedycznych	81
Literatura		84
5.	Nanocząstki a kataliza heterogeniczna	86
<i>Marcin Pisarek</i>		
5.1.	Wprowadzenie	86
5.2.	Kataliza heterogeniczna (kataliza kontaktowa)	88
5.2.1.	Wymagania stawiane katalizatorom	90
5.2.2.	Etapy reakcji chemicznych w katalizie heterogenicznej	90
5.3.	Otrzymywanie nanocząstek stosowanych w katalizie	92
5.4.	Metody charakteryzowania nanocząstek stosowanych w katalizie	93
5.5.	Przykłady zastosowania nanocząstek w reakcjach katalitycznych. Wpływ czynników morfologicznych, strukturalnych, chemicznych oraz geometrycznych	97
5.6.	Podsumowanie	103
Literatura		104
6.	Nanocząstki zwiększające przewodność elektryczną	106
<i>Ewelina Ciecierska</i>		
6.1.	Nanorurki węglowe	106
6.2.	Grafen	108
Literatura		111

7. Nanocząstki w zastosowaniach biomedycznych	112
<i>Agata Roguska</i>	
7.1. Wprowadzenie	112
7.2. Nanocząstki metali szlachetnych	113
7.3. Nanocząstki hydroksyapatytowe	117
7.4. Nanocząstki magnetyczne	119
7.5. Kropki kwantowe	122
7.6. Nośniki leków	124
7.7. Biosensory	127
7.8. Podsumowanie	128
Literatura	129
8. Metody i procedury charakteryzowania morfologii nanocząstek	131
<i>Anna Świdarska-Środa</i>	
8.1. Parametry opisu budowy nanocząstek i techniki ich pomiaru	132
8.1.1. Fundamentalne elementy charakterystyki nanoobjektów	132
8.1.2. Techniki badawcze, stosowane w miernictwie nanoobjektów	133
8.2. Znaczenie procedur w analizie morfologicznej nanocząstek	138
8.2.1. Procedura badań nanomateriałów stosowana w Laboratorium Nanostruktur	139
8.3. Nanometrologia w dokumentach UE	141
8.4. Podsumowanie	142
Literatura	142
9. Obrazowanie nanocząstek metodami mikroskopii sił atomowych	144
<i>Michał Woźniak</i>	
9.1. Sonda skanująca	146
9.2. Rozdzielczość pikselowa	146
9.3. Warunki środowiskowe	147
Literatura	154
10. Obrazowanie nanocząstek metodami mikroskopii elektronowej	156
<i>Tomasz Płociński</i>	
10.1. Oddziaływanie wiązki elektronów z materią	160
10.2. Detektory	162
10.3. Mikroskopy wysokorozdzielcze HR STEM/TEM, wyposażone w korektor aberracji sferycznej i/lub chromatycznej	164
10.4. Uchwyty	167
10.5. Mikroanaliza składu chemicznego nanocząstek	167
10.6. Przygotowanie nanocząstek do obserwacji w mikroskopie elektronowym	170
Literatura	172

11. Metody opisu kształtu i pomiary wielkości nanocząstek	173
<i>Krzysztof Roźniatowski, Tomasz Wejrzanowski</i>	
11.1. Wstęp	173
11.2. Parametry lokalne i globalne	173
11.3. Ograniczenia pomiarowe	174
11.4. Obrazowanie nanocząstek	175
11.5. Parametry opisujące wielkość i kształt	176
11.6. Analiza obrazu i wyznaczanie wielkości parametrów	179
11.7. Podsumowanie	182
Literatura	182
12. Pomiar rozkładu wielkości nanocząstek metodą rozpraszania światła laserowego	184
<i>Agnieszka Opalińska</i>	
Literatura	194
13. Pomiar stabilności koloidów i zawiesin nanocząstek	195
<i>Jacek Wojnarowicz, Agnieszka Opalińska</i>	
13.1. Układy dyspersyjne	195
13.1.1. Stabilność koloidów i zawiesin	196
13.1.2. Siły i oddziaływania między cząsteczkami	197
13.1.3. Niestabilność Ostwalda	200
13.1.4. Ruchy Browna	201
13.1.5. Teoria DLVO (podwójna warstwa elektryczna)	202
13.1.6. Zmienność układów dyspersyjnych	203
13.1.7. Termodynamiczny aspekt stabilności układu dyspersyjnego	204
13.1.8. Efekt steryczny	206
13.1.9. Podsumowanie	207
13.2. Proces destabilizacji zawiesin i koloidów	207
13.3. Zasada pomiaru stabilności metodą MLS	209
13.3.1. Stabilność	211
13.3.2. Zmiana wielkości cząstek	212
13.3.3. Migracja cząstek	213
13.3.4. Połączenie niestabilności	214
13.3.5. Podsumowanie	215
13.4. Stabilność elektrostatyczna – potencjał zeta	215
13.4.1. Pomiary potencjału zeta metodą elektroforetyczną	217
13.4.2. Pomiary potencjału zeta metodą elektroakustyczną	218
13.4.3. Pomiary potencjału zeta metodą potencjału strumieniowego	219
13.4.4. Podsumowanie	219
13.5. Podsumowanie rozdziału	220
Literatura	220

14. Pomiar rozmiaru nanokryształów metodą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego	223
<i>Stanisław Gierlotka</i>	
14.1. Wstęp	223
14.2. Dyfrakcja promieniowania na kryształach	224
14.2.1. Analogie do dyfrakcji światła	224
14.2.2. Specyficzne cechy dyfrakcji na kryształach	225
14.2.3. Dyfrakcja na polikryształach	227
14.2.4. Jak rozmiar krystalitu uwidacznia się na dyfraktogramach	229
14.3. Określanie średniego rozmiaru krystalitów – metoda Scherrera	232
14.4. Małe krystality z naprężeniami – metoda Williamsona–Halla	239
14.5. Badanie rozkładu wielkości krystalitów przez analizę kształtu piku dyfrakcyjnego	242
14.5.1. Ograniczenie metody analizy kształtu piku	247
14.6. Podsumowanie, czyli jak postępować w praktyce	248
Literatura	249
15. Badanie rozkładu wielkości nanokrystalitów metodą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego	250
<i>Roman Pielaszek</i>	
15.1. Zasada działania	250
15.2. Proszki monodispersyjne – metoda Scherrera	252
15.3. Proszki polidispersyjne	254
15.3.1. Metoda <i>Integral Breadth</i> (uogólniona)	256
15.3.2. Metoda Scherrera uogólniona, $FW_{\frac{1}{5}}^{\frac{1}{4}}M$	258
15.3.3. Nanokryształy dużych cząsteczek	259
15.3.4. Metody bezpośredniego dopasowania	261
15.3.5. Narzędzia internetowe	262
15.4. Oszacowanie i redukcja błędów pomiarowych	264
15.4.1. Błąd oznaczenia stałej sieci nanokryształów	264
15.4.2. Błąd oznaczenia rozmiaru ziarna nanokryształów	265
15.4.3. Określanie poziomu tła piku	265
15.5. Ograniczenia metod rentgenowskich	266
15.6. Podstawy fizyczne (dla dociekliwych)	267
15.6.1. Równanie Debye’a	267
15.6.2. Równanie Debye’a dla kryształów, warunek Bragga	267
15.6.3. Profil linii i stała Scherrera dla kryształów prostopadłościennych	271
15.6.4. Profil linii i stała Scherrera dla kryształów kulistych	273
15.6.5. Profil linii dla proszków polidispersyjnych (wielościiany)	274
15.6.6. Profil linii dyfrakcyjnej dla proszków polidispersyjnych (ziarna kuliste)	278
15.6.7. $FW_{\frac{1}{5}}^{\frac{1}{4}}M$ – metoda Scherrera dla proszków polidispersyjnych	280

15.6.8. Metoda <i>Integral Breadth</i> (uogólniona)	283
15.6.9. Oszacowanie błędów pomiarowych stałej sieci	284
15.6.10. Oszacowanie błędów pomiaru rozmiaru ziarna	286
Literatura	286
16. Znaczenie morfologii w kształtowaniu właściwości nanocząstek	287
<i>Anna Świdowska-Środa</i>	
Literatura	290
17. Toksyczność nanocząstek i sposoby jej wyznaczenia	291
<i>Agnieszka Gajewicz, Tomasz Puzyn, Przemysław Oberbek, Michał Woźniak</i>	
17.1. Czy nanocząstki są toksyczne	291
17.2. Potencjalne mechanizmy toksyczności nanocząstek	293
17.3. Ocena ryzyka stwarzanego przez nanocząstki	295
17.4. Metody eksperymentalne	297
17.4.1. Metody <i>in vitro</i>	298
17.4.2. Metody mikroskopowe	301
17.4.3. Metody <i>in vivo</i>	305
17.4.4. Podstawowe badania toksykometryczne	306
17.5. Metody komputerowe (<i>in silico</i>)	309
17.5.1. Zbieranie danych eksperymentalnych	310
17.5.2. Podział związków na zbiór uczący i testowy	310
17.5.3. Obliczenie deskryptorów	311
17.5.4. Kalibracja i walidacja modelu	313
17.6. Przykłady zastosowania metod QSAR do nanocząstek	317
17.7. Podsumowanie	323
Literatura	324
18. Bezpieczeństwo i higiena pracy z nanocząstkami	330
<i>Anna Świdowska-Środa</i>	
18.1. Ochrona zdrowia pracowników	331
18.1.1. Rekomendowane limity stężeń nanocząstek w środowisku pracy	331
18.1.2. Rekomendowane środki ochrony pracowników	333
18.2. Ryzyko pożaru i eksplozji w środowisku pracy	338
18.2.1. Środki ochrony przeciwpożarowej	338
18.3. Przekazywanie informacji w łańcuchu dostaw	339
18.3.1. Karty charakterystyki materiału	339
18.3.2. Etykiety znamionowe na pojemnikach	341
18.4. Podsumowanie	341
Literatura	342
19. Nanomateriały w świetle przepisów Unii Europejskiej	345
<i>Anna Świdowska-Środa, Agnieszka Baran</i>	
19.1. Definicje i normy	345

19.1.1. Definicja nanomateriału	345
19.1.2. Działania normalizacyjne w nanotechnologii	349
19.2. Kluczowe regulacje Unii Europejskiej dotyczące substancji chemicznych, w tym nanomateriałów	351
19.2.1. System kontroli substancji chemicznych w Unii Europejskiej	351
19.3. Przepisy sektorowe zawierające odniesienia do nanomateriałów	357
19.3.1. Produkty kosmetyczne	357
19.3.2. Produkty biobójcze	358
19.3.3. Produkty spożywcze	358
19.4. Przepisy na poziomie krajowym odnoszące się do nanomateriałów	360
19.5. Podsumowanie	362
Literatura	362

20. Polityka i działania Unii Europejskiej w odniesieniu do nanomateriałów	366
<i>Anna Świdowska-Środa</i>	
Literatura	369

21. Rynek nanocząstek tlenków metali	371
<i>Elżbieta Krawczyk-Dembicka</i>	
21.1. Nanotechnologia na świecie	371
21.2. Nanotechnologia w Polsce	375
21.3. Rynek nanocząstek tlenków metali	378
21.3.1. Nanocząstki tlenku glinu (Al_2O_3)	380
21.3.2. Nanocząstki tlenku antymonu cyny (ATO)	383
21.3.3. Nanocząstki tlenku bizmutu (Bi_2O_3)	384
21.3.4. Nanocząstki ditlenku ceru (CeO_2)	384
21.3.5. Nanocząstki tlenku kobaltu (CoO)	385
21.3.6. Nanocząstki tlenku miedzi (CuO)	386
21.3.7. Nanocząstki tlenku żelaza (Fe_2O_3 oraz Fe_3O_4)	386
21.3.8. Nanocząstki tlenku indu (In_2O_3)	387
21.3.9. Nanocząstki tlenku magnezu (MgO)	387
21.3.10. Nanocząstki tlenku manganu (MnO oraz Mn_2O_3)	388
21.3.11. Nanocząstki tlenku niklu (NiO)	389
21.3.12. Nanocząstki ditlenku krzemu (SiO_2)	389
21.3.13. Nanocząstki ditlenku tytanu (TiO_2)	390
21.3.14. Nanocząstki tlenku itru (Y_2O_3)	390
21.3.15. Nanocząstki tlenku cynku (ZnO)	391
21.3.16. Nanocząstki ditlenku cyrkonu (ZrO_2)	392
Literatura	404

Ważniejsze skróty i akronimy	405
---	------------

Skorowidz	413
------------------------	------------

Wprowadzenie

Krzysztof J. Kurzydłowski, Małgorzata Lewandowska

Słowo „cząstka” ma logiczne powiązanie z rzeczownikiem „część”, stosowanym do opisu czegoś, co jest fragmentem większej całości. W technice na ogół stosuje się je w odniesieniu do małych drobin, zwykle ciał stałych. W takim kontekście jest również rozumiane w niniejszej książce, przy czym przedmiotem rozważań są w naszym przypadku cząstki o wymiarach nanometrowych, w praktyce mniejszych od 0,1 mikrometra. W tym miejscu warto zwrócić uwagę na błędne stosowanie terminu „nanocząsteczka” zamiast „nanocząstka”. Różnica pomiędzy tymi terminami jest bardzo istotna. Tymczasem w prasie codziennej, audycjach radiowych, programach telewizyjnych, a nawet w artykułach naukowych, patentach czy wystąpieniach na konferencjach naukowych, mylone są one ze sobą lub stosowane wymiennie.

Nanocząstki (ang. *nanoparticles*) to po prostu cząstki materii o wielkości nanometrowej, tj. z zakresu 1–100 nm. Nie są jednoznacznie zdefiniowane, ponieważ nanocząstki dowolnej substancji mogą mieć różny kształt, wielkość, nie muszą być jednoskładnikowe (np. nanocząstki kompozytów o różnym składzie). Nanocząsteczki to natomiast nic innego, jak cząsteczki, inaczej molekuły (ang. *molecules*). W przeciwieństwie do nanocząstki cząsteczka związku jest jednoznacznie zdefiniowana – wiadomo, jaki jest jej skład, wzór chemiczny i wielkość (przeważnie w skali nano lub subnano). Cząsteczkę definiuje się jako trwały układ co najmniej dwóch atomów (tego samego pierwiastka lub atomów różnych pierwiastków), połączonych wiązaniem chemicznym dowolnego typu. Można więc w uproszczeniu powiedzieć, że nanocząstka może się składać z wielu cząsteczek. Wiadomo na przykład, że cząsteczka ditlenku węgla składa się z 2 atomów tlenu i jednego atomu węgla, ma budowę liniową, a jej wymiar wynosi 0,232 nm (podczas gdy tzw. średnica efektywna cząsteczki gazu CO₂ w warunkach normalnych wynosi 0,33 nm). Ze względu na swoje skuteczne właściwości antybakteryjne ostatnio powszechnie stosowane jest nanosrebro, w związku z czym często na etykietach różnych produktów można znaleźć informację, że dany produkt zawiera „nanocząsteczki srebra”, podczas gdy srebro (podobnie jak inne metale) nie tworzy cząsteczek. Średnica atomu srebra to 0,32 nm, a nanocząstki srebra w jego roztworach koloidalnych są wielkości w zakresie przeważnie od 1 do 100 nm.

Przy tych rozważaniach warto zwrócić uwagę, jak niewielki jest to rozmiar. Gdyby obserwator na księżycu spoglądał na ziemię, stojący na ziemi człowiek miałby podobny rozmiar, co obiekt wysokości 5 nanometrów obserwowany przez człowieka z wysokości 1 metra. Dokładne badanie nanocząstek wymaga zatem zaawansowanych technik, dostępnych dopiero od kilkunastu lat. A bez dokładnego ich zbadania trudno o świadome wykorzystywanie ich wielu cennych i nowych cech. Z tego powodu światowy rynek nanocząstek będzie się dynamicznie rozwijał, w miarę doskonalenia technik ich wytwarzania i charakteryzowania, choć już obecnie jest dobrze rozwinięty.

Nanocząstki są bardzo różnorodne pod względem chemicznym. Najczęściej są to tlenki metali, metale, związki krzemu, różne odmiany węgla, materiały ceramiczne inne niż tlenki metali (np. węgliki metali), półprzewodniki, cząstki organiczne lub biologiczne. Zwyczajowo, ponieważ są one bryłami, do uznania ich za obiekty nanometrowe wystarczy, gdy jeden z charakterystycznych ich wymiarów (długość, szerokość lub grubość) spełnia kryterium < 100 nm.

Warto jednak zwrócić uwagę Czytelnika na formalne znaczenie terminu „nanocząstka” według normy ISO/TS 80004-2:2015 „Nanotechnologies – Vocabulary – Part 2: Nano-objects”. Cząstki materii o wielkości nanometrowej, tj. z zakresu 1–100 nm, nazwane są nanoobjektami (ang. *nanobjects*). Pod względem budowy nanoobjekty podzielone są na trzy grupy morfologiczne: nanocząstki, nanowłókna i nanopłytki. W przypadku nanocząstek przyjęto, że stosunek pomiędzy minimalnym i maksymalnym wymiarem nanoobjektu nie przekracza wartości 3. Jednak zwyczajowo i w literaturze przedmiotu określenie nanocząstka stosowane jest wymiennie z wyrażeniem nanoobjekt. W niniejszej książce przyjęto również taką konwencję. Nanocząstki mogą mieć więc różny kształt – płatków, kulek, walców, płytek czy form dendrytycznych. Nanocząstki mogą mieć strukturę amorficzną (nieuporządkowaną) lub krystaliczną (uporządkowaną).

Technologia wytwarzania nanocząstek to jeden z najważniejszych działań nanotechnologii. Formalnie definiuje się nanotechnologię jako technologię wytwarzania obiektów materialnych o charakterystycznych rozmiarach w zakresie od 1 do 100 nm oraz praktyczne wykorzystywanie nowych właściwości materiałów, które pojawiają się przy tak małych rozmiarach tych obiektów. Obiektami tymi mogą być warstwy, materiały zbudowane z kryształów o tak małych rozmiarach, włókna, nanocząstki właśnie i inne. W rozdziale 1 objaśniono dokładniej termin „nanotechnologia” i jego rozumienie przez różne środowiska: naukowców, przemysł, organizacje zajmujące się regulacją rynków, a także społeczeństwa.

Nanocząstki byłyby jedynie ciekawostką naukową, mającą mały wpływ na rozwój techniki, gdyby nie było możliwości ich przemysłowego wytwarzania. Nanocząstki występują w handlu w postaci proszku lub zawiesiny i właśnie odpowiedź na pytanie, w jakiej postaci mają być dostarczone nanocząstki, jest kluczowa zarówno dla ich odbiorcy, jak i producenta, ponieważ od tego między innymi zależy wybór odpowiedniej technologii otrzymywania nanocząstek. Zagadnieniom tym poświęcony jest rozdział 2. Zawarto w nim opis zarówno procesów rozdrabniania (ang. *top down*)

jak i metod addytywnych (ang. *bottom up*), w których cząstki są „składane” atom po atomie. Proces takiego składania można prowadzić zarówno w środowiskach gazowych, jak i ciekłych. Szczególną uwagę poświęcono nanocząstkom węglowym, tj. fulerenom, nanorurkom węglowym i grafenowi, którym poświęcony jest rozdział 3.

Mnogość technik wytwarzania nanocząstek w dużym stopniu powiązana jest z mnogością ich aplikacji, których liczba stale rośnie. Wiele z nich zostało omówionych w rozdziałach 4–7. W rozdziałach tych omówiono zastosowanie nanocząstek w optoelektronice, katalizie oraz w wytwarzaniu materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych. Uwzględniono także wykorzystanie nanocząstek w naukach o życiu i medycynie.

Istota nanotechnologii to wykorzystanie nowych cech materiału, które się uwiadcniają, gdy rozmiar cząstki jest mniejszy od 100 nm. Skoro właściwości nanocząstek zależą silnie od ich rozmiaru i kształtu, dokładny pomiar tych parametrów jest warunkiem koniecznym do otrzymywania powtarzalnych materiałów o stałych właściwościach. Zagadnienia nanometrologii są więc jednymi z najważniejszych z punktu widzenia praktycznych zastosowań nanocząstek. W rozdziale 8 opisano metody i procedury analizy morfologicznej nanocząstek.

Nanocząstki są tak małe, że do ich zobrazowania potrzebne są specjalne mikroskopy o dużym powiększeniu, rzędu 10 000 razy. Dopiero bowiem jeśli pomnożymy 0,1 mikrometra przez 10 000, otrzymamy 1 milimetr. Cząstka o wymiarze maksymalnym dla nanocząstek, czyli 100 nm = 0,1 mikrometra, w przypadku powiększenia 10 000 razy jest więc zobrazowana jako obiekt o wymiarze 1 milimetra, co daje potencjalnie możliwość rozpoznania jej cech geometrycznych, w tym kształtu. Oczywiście mniejsze nanocząstki mogą być przy takim powiększeniu niewidoczne, co oznacza, że w praktyce potrzebne są nam większe powiększenia, zwykle przekraczające 100 000. Gdy tę i nawet poprzednią wartość, 10 000, zestawimy z powiększeniami uzyskiwanymi względnie prostymi mikroskopami opartymi na świetle widzialnym, które dają powiększenia rzędu 1000 razy, staje się jasne, że zobrazowanie nanocząstek wymaga zaawansowanych mikroskopów, w których wykorzystuje się optykę elektronową. Więcej na temat metod obrazowania nanocząstek Czytelnik znajdzie w rozdziałach 9 i 10, w których omówiono techniki mikroskopii sił atomowych oraz mikroskopii elektronowej.

Nanocząstki mogą istotnie różnić się wielkością i kształtem. Ponieważ jedna i druga z wymienionych cech ma istotny wpływ na właściwości nanocząstek, zagadnieniem samym w sobie jest ilościowy opis ich geometrii. Tematowi temu poświęcony jest rozdział 11, w którym w szczególności omówiono metody komputerowej analizy obrazów. Temat ten jest do pewnego stopnia kontynuowany w rozdziale 12, w którym przedyskutowano kwestie statystycznego podejścia do nanocząstek, tworzących populacje różniące się nie tylko średnią wielkością, ale także stopniem rozproszenia wielkości.

Zazwyczaj nanocząstki łączą się w aglomeraty o rozmiarach nawet mikrometrowych i przechowywane są w zawiesinach w cieczy. Metody charakteryzowania

zawiesin nanocząstek opisane są w rozdziałach 12 i 13. Skuteczną techniką otrzymywania informacji o wielkości nanocząstek oraz rozkładzie ich wielkości są metody wykorzystujące rozpraszanie promieni rentgenowskich na nanocząstkach, czyli dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego. Okazuje się, że badania z zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego również dają precyzyjne informacje o rozmiarach nanocząstek. Tym zagadnieniom poświęcone są rozdziały 14 i 15.

Dla naukowca, inżyniera oraz każdej osoby interesującej się nanotechnologią najciekawsze są jednak fizyczne, chemiczne i biologiczne cechy nanocząstek. Zainteresowanie nanocząstkami wynika bowiem z ich szczególnych właściwości, istotnie różnych od właściwości cząstek tego samego materiału, lecz o większych rozmiarach. Podstawowe informacje na temat szczególnych właściwości nanocząstek zawarto w rozdziale 16. W dużym uproszczeniu szczególne ich właściwości są konsekwencją względnie dużego udziału w ich objętości atomów znajdujących się na powierzchni cząstki lub tuż pod nią. W przypadku cząstek o wymiarach 5–10 nm około $\frac{1}{4}$ atomów ma charakter „atomów powierzchniowych”, a skądinąd wiadomo, że atomy te mają specyficzną charakterystykę, inną niż atomy z dala od powierzchni. Różnice te dotyczą w szczególności stanów elektronowych i są konsekwencją „niewysycenia” wiązań.

Szczególne perspektywy wykorzystania nanocząstek związane są nie tylko z aktywnością ich atomów powierzchniowych, ale także ich wymiarami geometrycznymi jako takimi. Wynika to stąd, że nanocząstki mają wymiary dużo mniejsze niż wymiary komórek. Mogą zatem do nich wnikać, a także przez nie przenikać, co otwiera nowe możliwości w zakresie dozowania leków oraz projektowania nowych terapii z udziałem nanocząstek. Z tych samych powodów nanocząstki mogą być zagrożeniem dla środowiska i zdrowia ludzi. Toksyczności nanocząstek i sposobom jej wyznaczenia poświęcony jest rozdział 17.

Praktyczne stosowanie nanocząstek wymaga utworzenia międzynarodowych norm dotyczących definicji nanocząstek oraz metod ich charakteryzowania. Tego samego wymaga bezpieczeństwo pracy z nanocząstkami (rozdział 18). Zagadnienie bezpieczeństwa pracy stało się szczególnie istotne z dwóch powodów. Skoro właściwości nanocząstek zależą od ich rozmiaru, to i ewentualna toksyczność też może zależeć od rozmiaru. Wtedy normy opracowane dla zwykłych materiałów nie mają zastosowania w przypadku nanomateriałów i muszą być podjęte intensywne badania w celu określenia dopuszczalnych norm ekspozycji na nie. Jest to warunek ich masowego stosowania w produktach rynkowych oraz bezpiecznej produkcji i recyklingu. Te bardzo aktualne tematy związane z uregulowaniami prawnymi dla nanocząstek dopuszczanych na rynek oraz samo oszacowanie rynku zawierają rozdziały 19–21.