

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** XII

**Abkürzungsverzeichnis** XIV

### **1 Einführung** 1

- 1.1 Der Weg zum Nanokosmos 1
  - 1.1.1 Von der Mikrotechnik zur Nanotechnik 1
  - 1.1.2 Definition und Abgrenzung von Nanobaelementen 3
  - 1.1.3 Einblick in die Nanowelt 3
  - 1.1.4 Eingriff in den Nanokosmos 4
- 1.2 Bausteine der Nanotechnologie 5
- 1.3 Wechselwirkungen und Topologien 8
- 1.4 Die mikroskopische Umgebung der Nanowelt 11

### **2 Molekulare Grundlagen** 14

- 2.1 Teilchen und Bindungen 14
  - 2.1.1 Chemische Bindungen in der Nanotechnik 14
  - 2.1.2 Die Van-der-Waals-Wechselwirkung 15
  - 2.1.3 Dipol-Dipol-Wechselwirkungen 16
  - 2.1.4 Die Ionenbeziehung 17
  - 2.1.5 Die Metallbindung 18
  - 2.1.6 Die kovalente Bindung 19
  - 2.1.7 Die koordinative Bindung 21
  - 2.1.8 Die Wasserstoffbrückenbindung 22
  - 2.1.9 Polyvalente Bindungen 23
- 2.2 Chemische Strukturen 25
  - 2.2.1 Bindungstopologien 25
  - 2.2.2 Bausteine kovalenter Architekturen 27
  - 2.2.3 Bausteine für koordinationschemische Architekturen 30
  - 2.2.4 Bausteine für schwach gebundene Aggregate 31
  - 2.2.5 Aufbau komplexer Strukturen durch innere Hierarchien von Bindungsstärken 32
  - 2.2.6 Reaktionswahrscheinlichkeit und Reaktionsgleichgewichte 33

- 3 Mikrotechnische Grundlagen 37**
- 3.1 Planartechnik 37
- 3.2 Herstellung dünner Schichten 41
  - 3.2.1 Zustand und Vorbehandlung der Substratoberfläche 41
  - 3.2.2 Schichtherstellung aus der Gasphase 45
  - 3.2.3 Bedampfung 48
  - 3.2.4 Sputterbeschichtung 50
  - 3.2.5 CVD-Beschichtung 52
  - 3.2.6 Galvanische Abscheidung 55
  - 3.2.7 Schleuderbeschichtung 58
  - 3.2.8 Schattenbeschichtungstechnik 61
- 3.3 Herstellung von ultradünnen anorganischen Schichten und oberflächen- gebundenen Nanoteilchen 63
  - 3.3.1 Ultradünne Schichten aus Vakuumbeschichtungsprozessen 63
  - 3.3.2 Abscheidung ultradünner Schichten aus der flüssigen Phase 64
  - 3.3.3 In-situ-Erzeugung ultradünner anorganischer Filme durch chemische Modi- fizierung der Oberflächen anorganischer Materialien 65
  - 3.3.4 In-situ-Erzeugung ultradünner anorganischer Schichten auf hetero- organischen Materialien 66
  - 3.3.5 Nanoteilchenimmobilisierung 67
  - 3.3.6 In-situ-Erzeugung von anorganischen Materialien 68
- 3.4 Strukturgenerierung und Erzeugung von lithografischen Masken 68
  - 3.4.1 Haftmaskentechnik 68
  - 3.4.2 Funktionen des Resists in der Fotolithografie 73
  - 3.4.3 Serielle Strukturübertragungsverfahren 74
  - 3.4.4 Gruppenübertragungsverfahren 77
  - 3.4.5 Maskenlose Strukturierungsverfahren 79
  - 3.4.6 Softlithografie 79
- 3.5 Ätztechniken 81
  - 3.5.1 Ätzrate und Selektivität 81
  - 3.5.2 Isotrope und anisotrope Ätzprozesse 83
  - 3.5.3 Lithografische Auflösung 83
  - 3.5.4 Naßätzverfahren 84
  - 3.5.5 Trockenätzverfahren 88
  - 3.5.6 Hochauflösende Trockenätztechniken 91
  - 3.5.7 Wahl der Maske für nanolithografisches Ätzen 93
- 3.6 Aufbau- und Verbindungstechnik 93
- 3.7 Biogene und bioanaloge Moleküle in technischen Mikrostrukturen 98
  
- 4 Herstellungsverfahren für Nanostrukturen 100**
- 4.1 Strukturierungsprinzipien 100
  - 4.1.1 Subtraktive und additive Erzeugung von Nanostrukturen 100
  - 4.1.2 Strukturierung durch einen Lift-off-Prozeß 102
  - 4.1.3 Formgebungs- und Konstruktionsprinzipien in der Nanotechnik 105
- 4.2 Nanomechanische Strukturierung 111

- 4.2.1 Skalierung mechanischer Bearbeitungsmethoden 111
- 4.2.2 Lokal materialabtragende mechanische Verfahren 112
- 4.2.3 Oberflächen-Transport-Verfahren 113
- 4.2.4 Umformende Verfahren 114
- 4.2.5 Druckende Verfahren 117
- 4.3 Lithografische Nanostrukturierungsverfahren 120
- 4.3.1 Strukturübertragung durch elektromagnetische Strahlung 120
- 4.3.2 Nanolithografische Gruppenstrukturübertragung durch optische Abbildung von Masken 122
- 4.3.3 EUV- und Röntgenlithografie 123
- 4.3.4 Mehrlagenresisttechniken mit optischer Strukturübertragung 125
- 4.3.5 Nahfeldoptische Strukturierung mit Kontaktmaskenverfahren 126
- 4.3.6 Energetische Teilchen in der nanolithografischen Strukturübertragung 127
- 4.3.7 Elektronenstrahlithografie 129
- 4.3.8 Ionenstrahlithografie 137
- 4.3.9 Atomstrahlithografie 139
- 4.3.10 Molekülstrahl- und Nanoteilchenstrahl-Lithografie 140
- 4.3.11 Direktschreibende Strukturierung durch Teilchenstrahlen 140
- 4.3.12 Einzelteilchenstrahlprozesse 144
- 4.3.13 Nanostrukturierung durch selbststrukturierende Masken 145
- 4.4 Strukturzeugung durch Nahfeldsondenverfahren 147
- 4.4.1 Oberflächenkraftfeldsonden 147
- 4.4.2 Teilchenmanipulation mit dem Rastertunnelmikroskop (STM) 148
- 4.4.3 Thermomechanisches Schreiben von Nanostrukturen 150
- 4.4.4 Elektrisch induzierte Strukturierung mit Nahfeldrastersonden 150
- 4.4.5 Chemisch-stromlos induzierte Rastersondenstrukturierung 157
- 4.4.6 Nanostrukturierung durch optische Nahfeldsonden 158
  
- 5 Nanotechnische Strukturen 160**
- 5.1 Anorganische Festkörper 160
- 5.1.1 Einfluß der Materialmorphologie auf die nanolokale Formgebung 160
- 5.1.2 Anorganische Dielektrika 161
- 5.1.3 Metalle 162
- 5.1.4 Halbleiter 164
- 5.1.5 Kohlenstoff 165
- 5.2 Organische Festkörper- und Schichtstrukturen 166
- 5.2.1 Festkörper aus kleinen Molekülen 166
- 5.2.2 Organische Monoschichten und Multischichtstapel 167
- 5.2.3 Synthetische organische Polymere 168
- 5.2.4 Biopolymere 170
- 5.3 Molekulare Monoschichten und Schichtarchitekturen 171
- 5.3.1 Langmuir-Blodgett-Filme 171
- 5.3.2 Selbstassemblierende Oberflächenfilme 173
- 5.3.3 Kupplung von Molekülen auf Festkörperoberflächen 175
- 5.3.4 Sekundäre Kupplung auf molekularen Monofilmen 178

5.3.5	Bautypen molekularer Schichten	178
5.3.6	Molekulare Kopplungselemente (Linker) und Abstandshalter (Spacer)	182
5.3.7	Definition von Bindepositionen auf Festkörperoberflächen	184
5.4	Einzelteilchen-Architekturen	186
5.4.1	Einzelmoleküle als Nanostrukturen	186
5.4.2	Strategien der molekularen Konstruktion	191
5.4.3	Biogene und bioanaloge Architekturen	195
5.4.4	DNA-Nanoarchitekturen	199
5.4.5	Vollsynthetische Nanoarchitekturen	204
5.4.6	Nanopartikel und Nanokompartimente	213
5.5	Verbindung von molekularen Architekturen und Nanopartikeln mit planartechnischen Strukturen	215
<b>6</b>	<b>Charakterisierung von Nanostrukturen</b>	<b>224</b>
6.1	Geometrische Charakterisierung	224
6.1.1	Schichtdicke und vertikale Strukturabmessungen	224
6.1.2	Laterale Abmessungen	228
6.1.3	Meßhilfsstrukturen	230
6.2	Charakterisierung der Zusammensetzung von Schichten und Oberflächen	231
6.2.1	Atomare Zusammensetzung	231
6.2.2	Chemische Oberflächencharakterisierung	236
6.3	Funktionelle Charakterisierung von Nanostrukturen	239
<b>7</b>	<b>Nanotransducer</b>	<b>241</b>
7.1	Design von Nanotransducern	241
7.2	Nanomechanische Bauelemente	243
7.2.1	Nanomechanische Sensoren	243
7.2.2	Nanometergenaue Positionsmessung mit konventionellen Meßprinzipien	244
7.2.3	Elektrisch angesteuerte Nanoaktoren	245
7.2.4	Chemisch getriebene Nanoaktoren	247
7.2.5	Steifigkeit von Nanoaktoren	251
7.3	Nanoelektronische Bauelemente	251
7.3.1	Elektrische Leitbahnen und Nanodrähte	251
7.3.2	Nanostrukturierte Tunnelbarrieren	257
7.3.3	Quantenpunkte und Lokalisation von Elementarteilchen	259
7.3.4	Nanodioden	260
7.3.5	Elektroneninseln und Nano-Transistoren	261
7.3.6	Nanoschalter, molekulare Schalter und Logikelemente	268
7.4	Nanooptische Bauelemente	269
7.4.1	Optisch-sensorische Nanostrukturen	269
7.4.2	Nanostrukturierte optische Aktoren	270
7.4.3	Nanooptische Schalt- und Konversionselemente	272

7.5	Magnetische Nanotransducer	273
7.6	Chemische Nanosensoren und Nanoreaktoren	275
<b>8</b>	<b>Technische Nanosysteme</b>	<b>280</b>
8.1	Was sind Nanosysteme?	280
8.2	Systeme mit Nanokomponenten	281
8.3	Komplettsysteme mit Nanometerabmessungen	283
	<b>Tabelle: Beispiele von Nanostrukturen</b>	<b>290</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>293</b>
	<b>Register</b>	<b>306</b>