

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Arbeitswelt der Mikrotechnologinnen und Mikrotechnologen .....</b>	<b>18</b>
1.1	Die Geschichte der Mikrotechnologie .....	18
1.2	Anwendungsgebiete der Mikrotechnologie .....	20
1.3	Tätigkeitsbereiche von Mikrotechnologinnen und Mikrotechnologen .....	22
1.4	Anforderungen an Mikrotechnologinnen und Mikrotechnologen .....	24
1.5	Die duale Berufsausbildung .....	27
1.6	Die grundlegenden Ziele der Ausbildung .....	29
1.7	Die Verantwortung für die Ausbildung .....	31
1.8	Weiterbildungsmöglichkeiten für ausgebildete Mikrotechnologinnen und Mikrotechnologen .....	32
1.9	Aufgabenpool .....	33
<b>2</b>	<b>Werkstoffe in der Mikrosystemtechnik .....</b>	<b>36</b>
2.1	Einführung .....	36
2.2	Silicium .....	40
2.2.1	Herstellung von Reinstsilicium inklusive Kristallzüchtung, Herstellung von elementarem Silicium/Metallurgical Grad Silicon (MGS) .....	41
2.2.2	Waferherstellung .....	48
2.2.3	Geometrie der Festkörper .....	52
2.2.3.1	Kristallgitter .....	53
2.2.3.2	Kristallfehler .....	55
2.2.4	Chemisches Verhalten von Silicium und seinen Verbindungen .....	58
2.3	Verbindungshalbleiter .....	60
2.4	Metallische Werkstoffe .....	63
2.4.1	Verschiedene Arten der Metalle .....	63
2.4.2	Physikalische Eigenschaften .....	64
2.5	Amorphe Werkstoffe .....	65
2.5.1	Kunststoffe .....	65
2.5.1.1	Herstellung von Kunststoffen .....	67

2.5.1.2	Eigenschaften von Kunststoffen .....	68
2.5.1.3	Anwendungen von Kunststoffen .....	69
2.5.2	Keramiken .....	69
2.5.3	Gläser .....	70
2.6	Aufgabenpool .....	71
<b>3</b>	<b>Leitungsvorgänge in ausgewählten Werkstoffen .....</b>	<b>74</b>
3.1	Spezifischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit .....	74
3.2	Eigenleitfähigkeit und Störstellenleitung .....	78
3.3	Bändermodell .....	80
3.4	Aufgabenpool .....	82
<b>4</b>	<b>Aufbau und Funktionsweise elektrischer und elektronischer Bauelemente .....</b>	<b>84</b>
4.1	Elektrische Widerstände .....	84
4.2	Kondensator .....	87
4.3	Spulen .....	92
4.4	Dioden .....	94
4.5	Bipolare und unipolare Transistoren .....	100
4.5.1	Bipolare Transistoren .....	100
4.5.2	Unipolare Transistoren .....	103
4.6	Speicherzellen .....	105
4.7	Operationsverstärker (OP) .....	108
4.8	Solarzellen .....	111
4.9	Aufgabenpool .....	113
<b>5</b>	<b>Bedingungen für die Fertigung .....</b>	<b>116</b>
5.1	Reinraumtechnik .....	116
5.1.1	Partikel .....	117
5.1.2	Reinraumklassen .....	119
5.1.3	Grundlagen Reinraumaufbau .....	122
5.1.4	Verhalten im Reinraum .....	125
5.1.5	Reinraumbekleidung .....	126
5.2	Reinraumluftversorgung und -entsorgung .....	127
5.2.1	Klimatechnik und ihre Komponenten .....	128
5.2.2	Prozessfortluftsysteme .....	131
5.3	Ver- und Entsorgung .....	132

---

5.3.1	Reinstmedientechnik.....	133
5.3.2	Neutralisation .....	142
5.3.3	Vakuumtechnik.....	143
5.4	Umgang mit Gefahrstoffen .....	152
5.5	ESD .....	155
5.6	Aufgabenpool.....	157
<b>6</b>	<b>Qualitätsmanagement .....</b>	<b>160</b>
6.1	Worum geht es beim Qualitätsmanagement? .....	160
6.1.1	Definitionen .....	160
6.1.2	Denken in Prozessen und kontinuierliche Verbesserung .....	161
6.2	Wofür Qualitätsmanagement? .....	164
6.3	Das QM-System .....	165
6.3.1	Regelwerk zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen .....	165
6.3.2	Dokumentation des QMS .....	167
6.3.3	Die Norm als Messlatte .....	170
6.3.4	Überprüfung der Wirksamkeit durch Audits .....	173
6.3.5	Zertifizierung eines QMS .....	176
6.4	QM beim Management von Ressourcen .....	178
6.4.1	Personelle Ressourcen .....	178
6.4.2	Prüfmittelüberwachung .....	180
6.5	QM in der Produktion .....	182
6.5.1	Prozessplanung .....	182
6.5.2	Prozessentwicklung .....	183
6.5.3	Prozesskontrolle .....	184
6.5.4	Gesamtprozess .....	184
6.5.5	Lenkung fehlerhafter Produkte .....	185
6.5.6	Korrekturmaßnahmen und Kundenreklamationen .....	186
6.6	Q-Werkzeuge zur Vorbeugung .....	187
6.6.1	Ursache-Wirkungs-Diagramm .....	187
6.6.2	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) .....	187
6.6.3	Q-Zirkel und Co. ....	189
6.6.4	5A-Aktion .....	190
6.7	Q-Werkzeuge zur Datenauswertung .....	191
6.7.1	Datensammelblatt .....	191

6.7.2	Histogramm .....	192
6.7.3	Pareto-Diagramm .....	192
6.8	Q-Werkzeug zur Prozess-Steuerung: Statistische Prozesssteuerung (SPC) .....	193
6.9	Aufgabenpool .....	202
<b>7</b>	<b>Mess- und Prüfverfahren .....</b>	<b>206</b>
7.1	Messung von Strukturbreiten – Mikroskopie .....	206
7.1.1	Auge, Lupe .....	206
7.1.2	Lichtmikroskop .....	208
7.1.3	Elektronenmikroskop .....	211
7.1.4	Rasterkraftmikroskop .....	213
7.1.5	Kristallstrukturanalyse .....	213
7.2	Messung von Schichtdicken und Oberflächen .....	214
7.2.1	Profilometer (mechanisch) .....	214
7.2.2	Schwingquarz .....	215
7.2.3	Reflexionsspektroskopie .....	215
7.2.4	Ellipsometrie .....	218
7.2.5	Interferometrie .....	218
7.2.6	Profilometer – (optisch) .....	220
7.3	Weitere Mess- und Prüfverfahren .....	221
7.3.1	Vierspitzenmessung .....	221
7.3.2	Röntgenmikroskopie .....	223
7.4	Aufgabenpool .....	227
<b>8</b>	<b>Vom Ausgangsstoff zum Endprodukt .....</b>	<b>230</b>
8.1	Allgemeiner Produktionsablauf .....	230
8.2	Produktionsablauf der Halbleitertechnik am Beispiel der Diode .....	232
8.3	Produktionsablauf der Mikrosystemtechnik am Beispiel des oberflächen- mikromechanischen Beschleunigungssensors .....	234
8.4	Produktionsablauf der Mikrosystemtechnik am Beispiel des bulk-mikromechanischen Drucksensors .....	237
8.5	Aufgabenpool .....	240
<b>9</b>	<b>Wafereingangskontrolle und Spezifikationen .....</b>	<b>242</b>
9.1	Einleitung .....	242
9.2	Parameter zur Waferspezifikation .....	242

---

9.3	Mechanisch-physikalische Parameter bei der Waferherstellung .....	243
9.4	Praktisches Anwendungsbeispiel an einem 6"-Si-Wafer (150 mm) .....	244
9.5	Arten von Wafern in der Produktion/Halbleiterfertigung .....	246
9.6	Bogen/Durchbiegung und Stress als kritische Parameter für die Produktion .....	247
9.7	Leitfähigkeitsüberprüfung nach SPC .....	250
9.8	Aufgabenpool .....	252
<b>10</b>	<b>Beschichtungstechnologien .....</b>	<b>256</b>
10.1	Thermische Oxidation .....	256
10.1.1	Trockene Oxidation .....	257
10.1.2	Feuchte Oxidation .....	258
10.1.3	Lokale Oxidation von Silicium .....	259
10.2	Beschichtungsverfahren aus der Gasphase .....	261
10.2.1	Physikalische Gasphasenabscheidung .....	261
10.2.2	Chemische Gasphasenabscheidung .....	265
10.2.3	Epitaxie .....	268
10.3	Galvanik und stromlose Abscheidung .....	271
10.3.1	Galvanik .....	271
10.3.2	Außenstromlose Abscheidung .....	273
10.4	Aufgabenpool .....	278
<b>11</b>	<b>Photolithographie .....</b>	<b>280</b>
11.1	Einführung in die Lithographie .....	280
11.1.1	Moore's Law, die treibende Kraft .....	281
11.1.2	Prozessübersicht der Photolithographie .....	282
11.2	Vorbehandlung .....	284
11.2.1	Das Spin-On-Verfahren .....	286
11.2.2	Der Box-Primer-Prozess .....	286
11.2.3	Single Wafer Hot Plate .....	287
11.3	Belackung .....	289
11.3.1	Die Erfindung des Photolacks .....	289
11.3.2	Positiv- oder Negativlack .....	289
11.3.3	Bestandteile des Photolacks .....	290
11.3.4	Beschichtungsverfahren .....	294
11.4	Belichtung .....	299
11.4.1	Rehydrieren .....	299

11.4.2	Absorption von Licht im Lack.....	300
11.5	Entwicklung.....	303
11.5.1	Entwicklerprozess.....	303
11.5.2	UV-Cure.....	307
11.5.3	Reaktionen beim Entwickeln.....	308
11.5.4	Kenngößen der Entwicklung.....	309
11.6	Spezielle Lacke.....	311
11.6.1	Dicke Lacke.....	311
11.6.2	Umkehrlacke – Lift-Off-Prozess.....	312
11.6.3	Negativlack.....	314
11.6.4	Deep Ultra Violet Resist.....	316
11.7	Optik – Grundlagen.....	318
11.7.1	Beugung am Spalt.....	319
11.7.2	Auflösung nach Ernst Abbe.....	320
11.7.3	Tiefenschärfe.....	321
11.8	Belichtungsverfahren.....	322
11.8.1	Kontaktbelichtung.....	322
11.8.2	Proximity-Belichtung.....	323
11.8.3	Projektionsbelichtung.....	327
11.8.4	Röntgenlithographie.....	337
11.9	Aufgabenpool.....	339
<b>12</b>	<b>Ätzprozesse.....</b>	<b>342</b>
12.1	Einführung in das Thema Ätzen: Geschichtliches.....	342
12.2	Grundlagen Ätzen.....	343
12.3	Waferreinigung.....	345
12.4	Nasschemisches Ätzen.....	347
12.4.1	Ätzverfahren: Tauch- und Sprühätzen.....	349
12.4.2	Isotropes Ätzen von Metallen und Silicium (Si).....	349
12.4.3	Anisotropes Ätzen von Si.....	351
12.5	Physikalische Trockenätzverfahren.....	353
12.5.1	Sputterätzen.....	355
12.5.2	Ionenstrahlätzen.....	358
12.5.3	Focused Ion Beam (FIB).....	359
12.6	Chemisches Trockenätzverfahren: Plasmaätzen.....	360

12.7	Physikalisch-chemische Trockenätzverfahren .....	363
12.7.1	Reaktives Ionenätzen (RIE) und reaktives Ionentiefenätzen (DRIE) .....	364
12.7.2	Reaktives Ionenstrahlätzen(RIBE)/chemisch unterstütztes Ionenstrahlätzen (CAIBE) .....	367
12.8	Aufgabenpool .....	367
<b>13</b>	<b>Dotierung</b> .....	<b>370</b>
13.1	Anwendung der Dotierung .....	370
13.1.1	Piezoresistiver Kraftsensor .....	370
13.1.2	pn-Übergänge .....	372
13.2	Änderung der elektrischen Leitfähigkeit von Silicium .....	372
13.3	Dotierstoffe .....	373
13.4	Dotierprozesse .....	373
13.4.1	Diffusion .....	373
13.4.2	Ionenimplantation .....	389
13.4.3	Legierungsverfahren .....	394
13.4.4	Zusammenfassung .....	396
13.5	Aufgabenpool .....	396
<b>14</b>	<b>Fertigstellung mikrotechnischer Produkte</b> .....	<b>400</b>
14.1	Waferbearbeitung .....	400
14.1.1	Rückseitenmetallisierung .....	401
14.1.2	Verringerung der Scheibendicke .....	402
14.1.3	Trennen .....	402
14.2	Chipmontage und Wafermontage .....	406
14.2.1	Chipbonden .....	407
14.2.2	Waferbonden .....	410
14.3	Drahtbonden .....	415
14.3.1	Ultraschallbonden .....	415
14.3.2	Thermokompressionsbonden .....	417
14.4	Gehäuse .....	420
14.5	Substrat- und Leiterplattentechnik .....	423
14.5.1	Leiterplattentechnik .....	424
14.5.2	Keramiksubstrat .....	428
14.5.3	Dickschichttechnik .....	429
14.6	Montagetechniken und Montagetypen .....	432

14.6.1	Lead Frame .....	433
14.6.2	Chip on Board (COB) .....	434
14.6.3	Ball Grid Array (BGA) .....	434
14.6.4	Flip Chip (FC) .....	434
14.6.5	Tape Automated Bonding (TAB) .....	435
14.7	Montageprozess – Lötén .....	436
14.7.1	Montageprozess am Beispiel des Lötens von Bauteilen .....	437
14.7.2	Lesen eines Phasendiagramms .....	437
14.7.3	Lot aufbringen .....	439
14.7.4	Lot schmelzen .....	440
14.8	Qualitätskontrolle .....	447
14.8.1	Drahtabrisstest = Pulltest .....	447
14.8.2	Schertest (shear test) .....	450
14.8.3	Querschliffe (cross section) .....	452
14.9	Aufgabenpool .....	452
<b>15</b>	<b>Prozessintegration</b> .....	<b>456</b>
15.1	Leuchtdiode .....	456
15.2	Solarzelle .....	465
15.3	Bipolarer Transistor .....	477
15.4	CMOS .....	480
15.5	Mikro-Scannerspiegel .....	484
15.6	Aufgabenpool .....	490
<b>16</b>	<b>Mikrosysteme</b> .....	<b>492</b>
16.1	Sensoren .....	492
16.1.1	Beispiele für den Einsatz von Sensoren .....	492
16.1.2	Kapazitive Sensoren .....	494
16.1.3	Magnetfeldsensoren .....	500
16.1.4	Temperatursensoren .....	502
16.1.5	Piezoresistive Sensoren .....	505
16.1.6	Sensoren auf der Basis von Frequenzänderungen .....	513
16.2	Aktoren .....	515
16.2.1	Definition .....	516
16.2.2	Festlegung auf einige Begriffe .....	517
16.2.3	Skalierungsgesetze .....	518

---

16.2.4	Elektrostatisches Aktorprinzip .....	520
16.2.5	Piezoelektrisches Aktorprinzip .....	525
16.2.6	Aktoren auf Basis des Formgedächtnis-Effektes .....	529
16.2.7	Elektromagnetisches Aktorprinzip .....	533
16.3	Aufgabenpool .....	537
<b>17</b>	<b>Optische Mikrosysteme .....</b>	<b>540</b>
17.1	Lichtemittierende Systeme .....	540
17.1.1	Leuchtdioden (LEDs) .....	540
17.1.2	Laserdioden .....	544
17.1.3	Organische Leuchtdioden .....	546
17.2	Lichtleitende Systeme .....	551
17.2.1	Wellenleiter .....	551
17.2.2	Mikrooptische Ringresonatoren .....	554
17.2.3	Photonische Kristalle .....	558
17.3	Lichtmodulatoren .....	560
17.3.1	Mikrospiegelmatrizen .....	560
17.3.2	Deformierbare Spiegel .....	565
17.3.3	Scannerspiegel .....	569
17.3.4	Scanner-Beugungsgitter .....	574
17.4	Lichtdetektoren .....	578
17.4.1	Photodioden .....	578
17.4.2	CCD-Bildsensoren .....	584
17.4.3	CMOS-Bildsensoren .....	587
17.4.4	Mikrobolometer .....	589
17.5	Aufgabenpool .....	591
<b>18</b>	<b>Gedruckte Elektronik .....</b>	<b>594</b>
18.1	Überblick .....	594
18.2	Warum gedruckte Elektronik? .....	595
18.3	Funktionsweise grundlegender elektronischer Bauelemente .....	602
18.3.1	Überblick .....	602
18.3.2	Die Diode .....	602
18.3.3	Der Feldeffekttransistor .....	605
18.4	Materialien der gedruckten Elektronik .....	612
18.4.1	Grundvoraussetzungen bei Materialien für gedruckte Elektronik .....	612

---

18.4.2	Substrat .....	612
18.4.3	Isolator .....	613
18.4.4	Halbleiter .....	615
18.4.5	Leiter .....	618
18.5	Materialabscheidung .....	620
18.5.1	Grundlagen .....	620
18.5.2	Abscheidemethoden .....	622
18.6	Anwendungsgebiete für gedruckte Elektronik .....	627
18.7	Aufgabenpool .....	628
<b>Quellennachweise .....</b>		<b>631</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>		<b>650</b>