



Inhaltsverzeichnis

Lehrbuch Mikrotechnologie

für Ausbildung, Studium und Weiterbildung

Herausgegeben von Sabine Globisch

ISBN: 978-3-446-42560-6

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42560-6>

sowie im Buchhandel.

Inhaltsverzeichnis

1	Arbeitswelt der Mikrotechnologinnen und Mikrotechnologen	18
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
2	Werkstoffe in der Mikrosystemtechnik	36
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
3	Leitungsvorgänge in ausgewählten Werkstoffen	74
3.1	Spezifischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit	74
3.2	Eigenleitfähigkeit und Störstellenleitung	78
3.3	Bändermodell	80
3.4	Aufgabenpool	82
4	Aufbau und Funktionsweise elektrischer und elektronischer Bauelemente	84
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
5	Bedingungen für die Fertigung	116
5.1	Reinraumtechnik	116
5.1.1	Partikel	117
5.1.2	Reinraumklassen	119
5.1.3	Grundlagen Rehraumaufbau	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
6	Qualitätsmanagement	160
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
7	Mess- und Prüfverfahren	206
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
8	Vom Ausgangsstoff zum Endprodukt	230
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
9	Wafereingangskontrolle und Spezifikationen	242
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
10	Beschichtungstechnologien	256
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
11	Photolithographie	280
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
12	Ätzprozesse	342
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
13	Dotierung	370
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
14	Fertigstellung mikrotechnischer Produkte	400
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 – Lötens	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
15	Prozessintegration	456
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
16	Mikrosysteme	492
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	Elektrostatistisches 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
17	Optische Mikrosysteme	540
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
18	Gedruckte Elektronik	594
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
Quellennachweise		631
Sachwortverzeichnis		650