

1	Einleitung	1
	1.1 Aufgaben	3
	Literatur	4
2	Herstellung von Siliziumscheiben	5
	2.1 Silizium als Basismaterial	5
	2.2 Herstellung und Reinigung des Rohmaterials	7
	2.2.1 Herstellung von technischem Silizium	7
	2.2.2 Chemische Reinigung des technischen Siliziums	8
	2.2.3 Zonenreinigung	9
	2.3 Herstellung von Einkristallen	10
	2.3.1 Die Kristallstruktur	11
	2.3.2 Kristallziehverfahren nach Czochralski	12
	2.3.3 Tiegelfreies Zonenziehen	14
	2.3.4 Kristallfehler	15
	2.4 Kristallbearbeitung	16
	2.4.1 Sägen	17
	2.4.2 Oberflächenbehandlung	17
	2.5 Aufgaben zur Scheibenherstellung	20
	Literatur	21
3	Oxidation des Siliziums	23
	3.1 Die thermische Oxidation von Silizium	24
	3.1.1 Trockene Oxidation	25
	3.1.2 Nasse Oxidation	25
	3.1.3 H ₂ O ₂ -Verbrennung	27
	3.2 Modellierung der Oxidation	27
	3.3 Die Grenzfläche SiO ₂ /Silizium	29
	3.4 Segregation	30

3.5	Abscheidungsverfahren für Oxid	32
3.5.1	Die Silan-Pyrolyse	32
3.5.2	Die TEOS-Oxidabscheidung	32
3.6	Aufgaben zur Oxidation des Siliziums	33
	Literatur	33
4	Lithografie	35
4.1	Maskentechnik	36
4.1.1	Pattern-Generator und Step- und Repeat-Belichtung	37
4.1.2	Direktschreiben der Maske mit dem Elektronenstrahl	37
4.1.3	Maskentechniken für höchste Auflösungen	38
4.2	Belackung	39
4.2.1	Aufbau der Fotolacke	39
4.2.2	Aufbringen der Lackschichten	40
4.3	Belichtungsverfahren	42
4.3.1	Optische Lithografie (Fotolithografie)	42
4.3.2	Elektronenstrahl-Lithografie	49
4.3.3	Röntgenstrahl-Lithografie	52
4.3.4	Extrem UV Lithografie (EUV)	53
4.3.5	Weitere Verfahren zur Strukturierung	54
4.4	Lackbearbeitung	56
4.4.1	Entwickeln und Härten des Lackes	57
4.4.2	Linienweitenkontrolle	58
4.4.3	Ablösen der Lackmaske	59
4.5	Aufgaben zur Lithografiertechnik	60
	Literatur	61
5	Ätztechnik	63
5.1	Nasschemisches Ätzen	64
5.1.1	Tauchätzung	64
5.1.2	Sprühätzung	65
5.1.3	Ätzlösungen für die nasschemische Strukturierung	65
5.2	Trockenätzen	68
5.2.1	Plasmaätzen (PE)	69
5.2.2	Reaktives Ionenätzen (RIE)	71
5.2.3	Ionenstrahlätzen	77
5.2.4	Trockenätzverfahren für hohe Ätzraten	78
5.2.5	Atomic Layer Etching (ALE)	79
5.3	Endpunktdetektion	80
5.3.1	Visuelle Kontrolle	80
5.3.2	Ellipsometrie	81

5.3.3	Optische Spektroskopie	81
5.3.4	Interferometrie	82
5.3.5	Massenspektrometrie	82
5.4	Aufgaben zur Ätztechnik	82
	Literatur	84
6	Dotiertechniken	85
6.1	Legierung	86
6.2	Diffusion	88
6.2.1	Fick'sche Gesetze	89
6.2.2	Diffusionsverfahren	92
6.2.3	Ablauf des Diffusionsprozesses	94
6.2.4	Grenzen der Diffusionstechnik	95
6.3	Ionenimplantation	96
6.3.1	Reichweite implantierter Ionen	97
6.3.2	Channeling	98
6.3.3	Aktivierung der Dotierstoffe	99
6.3.4	Technische Ausführung der Ionenimplantation	102
6.3.5	Charakteristiken der Implantation	105
6.4	Dotierverfahren für die Nanotechnologie	106
6.4.1	Plasma-Dotierung	107
6.4.2	Molekulare Monolagen-Dotierung (MLD)	107
6.5	Aufgaben zu den Dotiertechniken	108
	Literatur	108
7	Depositionsverfahren	111
7.1	Chemische Depositionsverfahren	111
7.1.1	Die Silizium-Gasphasenepitaxie	111
7.1.2	Die CVD-Verfahren zur Schichtdeposition	114
7.1.3	Atomic Layer Deposition (ALD)	119
7.2	Physikalische Depositionsverfahren	122
7.2.1	Molekularstrahlepitaxie (MBE)	122
7.2.2	Aufdampfen	124
7.2.3	Kathodenzerstäubung (Sputtern)	125
7.3	Aufgaben zu den Abscheidetechniken	128
	Literatur	129
8	Metallisierung und Kontakte	131
8.1	Der Metall-Halbleiter-Kontakt	132
8.2	Mehrlagenverdrahtung	136
8.2.1	Planarisierungstechniken	136
8.2.2	Auffüllen von Kontaktöffnungen	141

8.3	Zuverlässigkeit der Aluminium-Metallisierung	142
8.4	Kupfermetallisierung	143
8.5	Aufgaben zur Metallisierung	147
	Literatur	148
9	Scheibenreinigung	149
9.1	Verunreinigungen und ihre Auswirkungen	150
9.1.1	Mikroskopische Verunreinigungen	151
9.1.2	Molekulare Verunreinigungen	152
9.1.3	Alkalische und atomare Verunreinigungen	152
9.2	Reinigungstechniken	153
9.3	Ätzlösungen zur Scheibenreinigung	154
9.4	Beispiel einer Reinigungssequenz	156
9.5	Aufgaben zur Scheibenreinigung	157
	Literatur	157
10	MOS-Technologien zur Schaltungsintegration	159
10.1	Einkanal MOS-Techniken	160
10.1.1	Der PMOS Aluminium-Gate-Prozess	160
10.1.2	Die n-Kanal Aluminium-Gate MOS-Technik	162
10.1.3	Die n-Kanal Silizium-Gate MOS-Technologie	165
10.2	Der n-Wannen Silizium-Gate CMOS-Prozess	168
10.2.1	Schaltungselemente der CMOS-Technik	176
10.2.2	Latchup-Effekt	179
10.3	Funktionstest und Parametererfassung	182
10.4	Aufgaben zur MOS-Technik	183
	Literatur	185
11	Erweiterungen zur Höchstintegration	187
11.1	Lokale Oxidation von Silizium (LOCOS)	187
11.1.1	Die einfache Lokale Oxidation von Silizium	188
11.1.2	SPOT-Technik zur Lokalen Oxidation	190
11.1.3	Die SILO-Technik	191
11.1.4	Poly-buffered LOCOS	192
11.1.5	Die SWAMI-LOCOS-Technik	193
11.1.6	Graben-Isolation	196
11.2	MOS-Transistoren für die Höchstintegration	197
11.2.1	Durchbruchmechanismen in MOS-Transistoren	199
11.2.2	Die Spacer-Technik zur Dotierungsoptimierung	201
11.2.3	Selbstjustierende Kontakte	207
11.3	SOI-Techniken	210
11.3.1	SOI-Substrate	210

11.3.2	Prozessführung in der SOI-Technik	216
11.4	Aufgaben zur Höchstintegrationstechnik	218
	Literatur	219
12	Transistoren mit Nanometer-Abmessungen	221
12.1	Voraussetzungen für die weitere Skalierung	221
12.2	n-Kanal Feldeffekttransistoren im Sub-100 nm Maßstab	225
12.3	Nanoskalige PMOS-Transistoren	229
12.4	Verspanntes Silizium zur Steigerung der Ladungsträgerbeweglichkeit	229
12.4.1	Mechanische Spannungen durch SiGe-Epitaxieschichten	230
12.4.2	Verspannungen durch Siliziumnitridschichten	231
12.5	MOSFETs mit mehrseitigen Gate-Elektroden	231
12.5.1	Der FINFET in SOI-Technik	232
12.5.2	FINFET im Substrat	233
12.5.3	Lateral Gate All-Around Transistor (LGAA)	234
12.5.4	Sheet Gate All-Around Transistor (SGAA)	235
12.5.5	Vertikaler Gate All-Around Transistor	239
12.6	2D-Materialien	243
12.7	Aufgaben	244
	Literatur	244
13	Bipolar-Technologie	247
13.1	Die Standard-Buried-Collector Technik	248
13.2	Fortgeschrittene SBC-Technik	251
13.3	Bipolarprozess mit selbstjustiertem Emitter	252
13.4	BiCMOS-Techniken	255
13.5	Aufgaben zur Bipolartechnologie	257
	Literatur	257
14	Montage integrierter Schaltungen	259
14.1	Vorbereitung der Scheiben zur Montage	260
14.1.1	Verringerung der Scheibendicke	260
14.1.2	Rückseitenmetallisierung	261
14.1.3	Trennen der Chips	261
14.2	Schaltungsmontage	263
14.2.1	Substrate/Systemträger	263
14.2.2	Befestigungstechniken	266
14.3	Kontaktierverfahren	268
14.3.1	Einzeldraht-Kontaktierung (Bonding)	268
14.3.2	Komplettkontaktierung	273
14.4	Endbearbeitung der Substrate	278

14.5	Aufgaben zur Chipmontage	279
	Literatur	280
15	Anhänge	281
15.1	Anhang A: Lösungen der Aufgaben	281
15.2	Anhang B: Farbtabelle Oxiddicken	297
15.3	Anhang C: Chemische Verbindungen und Abkürzungen	299
	Literatur	302
	Stichwortverzeichnis	303