

# Silizium - Halbleitertechnologie

Von Dr.-Ing. Ulrich Hilleringmann  
Priv.-Doz. an der Universität Dortmund

B.G. Teubner Stuttgart 1996

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	1
1.1 Aufgabe	3
<b>2 Herstellung von Siliziumscheiben</b>	4
2.1 Silizium als Basismaterial	4
2.2 Herstellung und Reinigung des Rohmaterials	7
2.2.1 Herstellung von technischem Silizium	7
2.2.2 Chemische Reinigung des technischen Siliziums	7
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 Tiegeelfreies Zonenziehen	15
2.3.4 Kristallfehler	16
2.4 Kristallbearbeitung	17
2.4.1 Sägen	18
2.4.2 Oberflächenbehandlung	19
2.4.2.1 Läppen	19
2.4.2.2 Scheibenrand abrunden	20
2.4.2.3 Ätzen	21
2.4.2.4 Polieren	21
2.5 Aufgaben zur Scheibenherstellung	22
<b>3 Oxidation des dotierten Siliziums</b>	23
3.1 Die thermische Oxidation von Silizium	24
3.1.1 Trockene Oxidation	25
3.1.2 Nasse Oxidation	25
3.1.3 $\text{H}_2\text{O}_2$ -Verbrennung	27
3.2 Modellierung der Oxidation	28
3.3 Die Grenzfläche $\text{SiO}_2$ /Silizium	29
3.4 Segregation	31

3.5	Abscheidungsverfahren für Oxid	33
3.5.1	Die Silan Pyrolyse	34
3.5.2	Die TEOS-Oxidabscheidung	34
3.6	Aufgaben zur Oxidation des Siliziums	35
<b>4</b>	<b>Lithografie</b>	<b>36</b>
4.1	Maskentechnik	37
4.1.1	Pattern-Generator und Step-und-Repeat-Belichtung	37
4.1.2	Direktschreiben der Maske mit dem Elektronenstrahl	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
4.3.1.1	Kontaktbelichtung	42
4.3.1.2	Abstandsbelichtung (Proximity)	43
4.3.1.3	Projektionsbelichtung	44
4.3.1.4	Verkleinernde Projektionsbelichtung	46
4.3.2	Elektronenstrahl-Lithografie	47
4.3.3	Röntgenstrahl-Lithografie	48
4.3.4	Weitere Verfahren zur Strukturierung	49
4.4	Lackbearbeitung	50
4.4.1	Entwickeln und Härten des Lackes	50
4.4.2	Linienweitenkontrolle	51
4.4.3	Ablösen der Lackmaske	53
4.5	Aufgaben zur Lithografiertechnik	54
<b>5</b>	<b>Ätztechnik</b>	<b>55</b>
5.1	Naßchemisches Ätzen	56
5.1.1	Tauchätzung	5
5.1.2	Sprühätzung	57
5.1.3	Ätzlösungen für die naßchemische Strukturierung	58
5.1.3.1	Isotrop wirkende Ätzlösungen	58
5.1.3.2	Anisotrope Siliziumätzung	59

5.2 Trockenätzen	61
5.2.1 Plasmaätzen (PE)	62
5.2.2 Reaktives Ionenätzen (RIE)	64
5.2.2.1 Prozeßparameter des reaktiven Ionenätzens	65
5.2.2.2 Reaktionsgase	68
5.2.3 Ionenstrahlätzen	72
5.3 Endpunktdetektion	73
5.3.1 Visuelle Kontrolle	74
5.3.2 Ellipsometrie	74
5.3.3 Spektroskopie	75
5.3.4 Interferometrie	75
5.3.5 Massenspektrometrie	76
5.4 Aufgaben zur Ätztechnik	76
<b>6 Dotiertechniken</b>	<b>78</b>
6.1 Legierung	79
6.2 Diffusion	81
6.2.1 Fick'sche Gesetze	82
6.2.1.1 Die Diffusion aus unerschöpflicher Quelle	83
6.2.1.2 Die Diffusion aus erschöpflicher Quelle	85
6.2.2 Diffusionsverfahren	87
6.2.3 Ablauf des Diffusionsprozesses	90
6.2.4 Grenzen der Diffusionstechnik	91
6.3 Ionenimplantation	92
6.3.1 Reichweite implantierter Ionen	93
6.3.2 Channeling	95
6.3.3 Aktivierung der Dotierstoffe	96
6.3.4 Technische Ausführung der Ionenimplantation	99
6.3.5 Charakteristiken der Implantation	103
6.4 Aufgaben zu den Dotiertechniken	104

<b>7 Depositionsverfahren</b>	106
7.1 Chemische Depositionsverfahren	106
7.1.1 Die Silizium-Gasphasenepitaxie	106
7.1.2 Die CVD-Verfahren zur Schichtdeposition	110
7.1.2.1 APCVD-Verfahren	111
7.1.2.2 Low Pressure CVD-Verfahren (LPCVD)	113
7.1.2.3 Plasma Enhanced CVD-Verfahren (PECVD)	115
7.2 Physikalische Depositionsverfahren	116
7.2.1 Molekularstrahlepitaxie (MBE)	116
7.2.2 Aufdampfen	117
7.2.3 Kathodenzerstäubung (Sputtern)	120
7.3 Aufgaben zu den Abscheidetechniken	124
<b>8 Metallisierung und Kontakte</b>	125
8.1 Der Metall-Halbleiter-Kontakt	126
8.2 Mehrlagenverdrahtung	131
8.2.1 Planarisierungstechniken	131
8.2.1.1 Der BPSG-Reflow	131
8.2.1.2 Reflow- und Rückätztechnik organischer Schichten	133
8.2.1.3 Chemisch-mechanisches Polieren	134
8.2.2 Auffüllen von Kontaktöffnungen	135
8.3 Zuverlässigkeit der Aluminium-Metallisierung	136
8.4 Aufgaben zur Kontaktierung	138
<b>9 Scheibenreinigung</b>	139
9.1 Verunreinigungen und ihre Auswirkungen	140
9.1.1 Mikroskopische Verunreinigungen	140
9.1.2 Molekulare Verunreinigungen	141
9.1.3 Alkalische und metallische Verunreinigungen	142
9.2 Reinigungstechniken	143
9.3 Ätzlösungen zur Scheibenreinigung	145
9.4 Beispiel einer Reinigungssequenz	146

9.5 Aufgaben zur Scheibenreinigung	147
<b>10 MOS-Technologien zur Schaltungsintegration</b>	<b>149</b>
10.1 Einkanal MOS-Techniken	149
10.1.1 Der PMOS Aluminium-Gate-Prozeß	149
10.1.2 Die n-Kanal Aluminium-Gate MOS-Technik	152
10.1.3 Die NMOS Silizium-Gate-Technologie	155
10.2 Der n-Wannen Silizium-Gate CMOS-Prozeß	158
10.2.1 Schaltungselemente der CMOS-Technik	167
10.2.2 Latchup-Effekt	170
10.3 Funktionstest und Parametererfassung	174
10.4 Aufgaben zur MOS-Technik	176
<b>11 Erweiterungen zur Höchstintegration</b>	<b>178</b>
11.1 Lokale Oxidation von Silizium (LOCOS-Technik)	178
11.1.1 Die Lokale Oxidation von Silizium	178
11.1.2 SPOT-Technik zur Lokalen Oxidation	181
11.1.3 Die SILO-Technik	183
11.1.4 Poly-buffered LOCOS	184
11.1.5 Die SWAMI-LOCOS-Technik	185
11.2 MOS-Transistoren für die Höchstintegration	188
11.2.1 Durchbruchmechanismen in MOS-Transistoren	190
11.2.1.1 Kanallängenmodulation	191
11.2.1.2 Drain-Durchgriff (Punch-Through)	191
11.2.1.3 Drain-Substrat Durchbruch (Snap-Back)	192
11.2.1.4 Transistoralterung durch heiße Elektronen	192
11.2.2 Die Spacer-Technik zur Dotierungsoptimierung	193
11.2.2.1 LDD n-Kanal MOS-Transistoren	193
11.2.2.2 P-Kanal Offset-Transistoren	196
11.2.3 Selbstjustierende Kontakte	199

11.3 SOI-Techniken	201
11.3.1 SOI-Substrate	202
11.3.1.1 FIPOS - Füll Isolation by Porous Oxidized Silicon	202
11.3.1.2 SIMOX - Silicon Implanted Oxide	204
11.3.1.3 Wafer-Bonding	206
11.3.1.4 ELO - Epitaxial Lateral Overgrowth	207
11.3.1.5 Die SOS-Technik	207
11.3.1.6 SOI-Schichten durch Rekristallisationsverfahren	208
11.3.2 Prozeßführung in der SOI-Technik	210
11.4 Aufgaben zur Höchstintegrationstechnik	212
<b>12 Bipolar-Technologie</b>	214
12.1 Die Standard-Buried-Collector Technik	214
12.2 Fortgeschrittene SBC-Technik	218
12.3 Selbstjustierender Bipolarprozeß	220
12.4 BiCMOS-Techniken	224
12.5 Aufgaben zur Bipolartechnologie	226
<b>13 Montage Integrierter Schaltungen</b>	227
13.1 Vorbereitung der Scheiben zur Montage	227
13.1.1 Verringerung der Scheibendicke	228
13.1.2 Rückseitenmetallisierung	229
13.1.3 Trennen der Chips	230
13.1.3.1 Ritzen	230
13.1.3.2 Lasertrennen	231
13.1.3.3 Sägen/Trennschleifen	232
13.2 Schaltungsmontage	232
13.2.1 Substrate	233
13.2.2 Befestigungstechniken	235
13.2.2.1 Kleben	236
13.2.2.2 Löten	236
13.2.2.3 Legieren	237

13.3	Kontaktierverfahren	238
13.3.1	Einzeldraht-Kontaktierung (Bonding)	238
13.3.1.1	Thermokompressionsverfahren	239
13.3.1.2	Ultraschallbonden	241
13.3.1.3	Thermosonic-Verfahren	243
13.3.2	Komplettkontaktierung	244
13.3.2.1	Spider-Kontaktierung	244
13.3.2.2	Flipchip-Kontaktierung	246
13.3.2.3	Beamlead-Kontaktierung	249
13.4	Endbearbeitung der Substrate	250
13.5	Aufgaben zur Chipmontage	252
<b>Anhang:</b>	<b>Lösungen der Aufgaben</b>	<b>254</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>271</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>272</b>