

Inhalt

1	Einführung in die Nanoelektronik	15
1.1	Bedeutung der Mikroelektronik	15
1.2	Chancen der Nanoelektronik	16
2	Eigenschaften von Halbleitern	19
2.1	Struktur von Halbleitern	19
2.1.1	Bandstruktur	19
2.1.2	Atomarer Aufbau von Silizium	22
2.1.3	Kristallgitter	23
2.1.4	2D-Materialien	25
2.2	Eigenleitung	26
2.3	Fremdleitung	27
2.3.1	n-dotiertes Silizium	28
2.3.2	p-dotiertes Silizium	28
2.3.3	Ladungsbilanz	29
2.4	pn-Übergang	30
2.4.1	Sperrwirkung der pn-Diode	30
2.4.2	Lösung der Poisson-Gleichung am pn-Übergang	33
2.5	Wiederholungsfragen	36
2.6	Übungen	37
2.7	Lösungen	38
3	Teilchen und Wellen	39
3.1	Dualismus von Welle und Teilchen	39
3.2	Die Schrödinger-Gleichung	41
3.2.1	Fourier-Transformation	42
3.2.2	Materiewellen	43
3.2.3	Eindimensionale, zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung	45
3.3	Der Potenzialtopf	46
3.4	Quantenstrukturen	52
3.5	Orbitale des Wasserstoffatoms	54
3.6	Transmission, Reflexion und Tunneleffekt	56
3.6.1	Rechteckbarriere	57

3.6.2 WKB-Approximation.....	59
3.7 Wiederholungsfragen	60
3.8 Übungen	60
3.9 Lösungen	61

4 Bandstruktur und Bändermodell 65

4.1 Wellenfunktion und Bandstruktur im Kristall	65
4.2 Effektive Masse	71
4.3 Generation und Rekombination	73
4.3.1 Generationsprozesse	74
4.3.2 Rekombinationsprozesse	74
4.4 Bändermodell	76
4.4.1 Intrinsisches Silizium	76
4.4.2 Dotiertes Silizium	79
4.5 Metallurgische Übergänge	81
4.5.1 pn-Übergang.....	81
4.5.1.1 Thermisches Gleichgewicht.....	81
4.5.1.2 Flussrichtung.....	84
4.5.1.3 Sperrrichtung.....	86
4.5.2 Schottky-Übergang	87
4.5.2.1 Thermisches Gleichgewicht.....	87
4.5.2.2 Flussrichtung.....	89
4.5.2.3 Sperrrichtung.....	91
4.5.2.4 Effektive Barrierenhöhe.....	91
4.5.3 Heteroübergänge	91
4.5.4 Allgemeine Vorgehensweise zur Konstruktion eines Bändermodells.....	93
4.6 Fermi-Integral und Zustandsdichte.....	94
4.6.1 Dreidimensionales System.....	95
4.6.2 Zweidimensionales System	98
4.6.3 Eindimensionales System.....	98
4.7 Wiederholungsfragen	99
4.8 Übungen	100
4.9 Lösungen	101

5 Ladungstransport in Halbleitern 105

5.1 Driftstrom	105
5.2 Diffusionsstrom.....	111
5.3 Kontinuitätsgleichungen	112

5.4	Tunnelstrom.....	113
5.4.1	Tunneln durch Potenzialbarrieren.....	113
5.4.2	Band-zu-Band-Tunneln.....	115
5.4.3	Veränderung von Zustandsgrößen.....	116
5.4.4	Tunnelstromberechnung.....	118
5.5	Wiederholungsfragen.....	121
5.6	Übungen.....	122
5.7	Lösungen.....	123

6 Grundlagen der Halbleitertechnologie 125

6.1	Silizium-Planartechnologie.....	125
6.2	Herstellung einkristalliner Wafer.....	127
6.3	Chemische Depositionsverfahren.....	128
6.3.1	CVD-Prozesse.....	128
6.3.2	Epitaxie.....	130
6.4	Physikalische Depositionsverfahren.....	130
6.4.1	Aufdampfen.....	130
6.4.2	Sputtern.....	131
6.4.3	Materialien zur Metallisierung.....	132
6.4.3.1	Aluminium.....	132
6.4.3.2	Kupfer-Metallisierung.....	132
6.5	Lithografie.....	132
6.5.1	Fotolithografie.....	133
6.5.2	Elektronenstrahlolithografie.....	135
6.5.3	Röntgenlithografie.....	136
6.6	Ätzprozesse.....	136
6.6.1	Nasschemisches Ätzen.....	137
6.6.2	Trockenätzen.....	137
6.6.2.1	Plasmaätzen.....	137
6.6.2.2	Reaktives Ionenätzen.....	138
6.6.2.3	Sputter-Ätzen.....	138
6.7	Thermische Oxidation.....	138
6.8	Dotierung.....	141
6.8.1	Diffusion.....	141
6.8.2	Ionenimplantation.....	142
6.9	CMOS-Prozess.....	142
6.10	Wiederholungsfragen.....	145

7	Klassische Bauelemente der Mikroelektronik	147
7.1	Diodenstrukturen	147
7.1.1	pn-Diode	148
7.1.1.1	Schwache Injektion.....	148
7.1.1.2	Hohe Injektion	152
7.1.1.3	Sperrverhalten	153
7.1.1.4	Sperrschichtkapazität	154
7.1.1.5	Diffusionskapazität.....	155
7.1.1.6	Kleinsignalersatzschaltbild.....	156
7.1.2	Esaki-Tunneldiode	157
7.1.3	Resonante Tunneldiode	159
7.1.4	Schottky-Diode	160
7.1.4.1	Thermischer Emissionsstrom	161
7.1.4.2	Tunnelstrom	163
7.2	Bipolartransistor.....	165
7.2.1	Funktionsweise in eindimensionaler Näherung.....	165
7.2.2	Early-Effekt.....	168
7.2.3	Stromgleichungen und Kennlinien	169
7.2.4	Ebers-Moll-Modell	171
7.2.5	Kleinsignalersatzschaltbild	173
7.2.6	Strukturbezogenes Ersatzschaltbild im SBC-Prozess	174
7.3	MOS-Feldeffekttransistor	176
7.3.1	Prinzipielle Funktionsweise	177
7.3.2	Schwellspannung	180
7.3.2.1	Flachbandzustand.....	180
7.3.2.2	Starke Inversion	182
7.3.2.3	Schwellspannungsimplantation.....	183
7.3.2.4	Substrateffekt.....	184
7.3.2.5	Transistortypen	184
7.3.3	MOS-Kapazität	186
7.3.4	Vereinfachtes Strommodell	188
7.3.4.1	Gradual-Channel-Approximation	188
7.3.4.2	Kanallängenmodulation.....	189
7.3.4.3	Kennlinien	190
7.3.4.4	Extraktion der Schwellspannung.....	192
7.3.5	Kleinsignalverhalten.....	192
7.3.5.1	Kleinsignalleitwerte	192
7.3.5.2	Kapazitive Effekte.....	194

7.3.5.3	Meyer-Modell	196
7.3.5.4	Kleinsignalersatzschaltbild	198
7.3.6	Grenzen Bulk-MOSFET	199
7.4	Optoelektronische Bauelemente	200
7.4.1	Strahlungsbauelemente	200
7.4.1.1	Lumineszenzdiode	200
7.4.1.2	Halbleiterlaser	202
7.4.2	Absorptionsbauelemente	204
7.4.2.1	Fotodiode	204
7.4.2.2	Solarzelle	207
7.5	Wiederholungsfragen	208
7.6	Übungen	210
7.7	Lösungen	214

8 Digitale CMOS-Schaltungstechnik 223

8.1	Logikgatter	223
8.1.1	Inverter	224
8.1.2	NAND und NOR	229
8.2	Leistungsaufnahme	230
8.3	Speicherbausteine	231
8.3.1	DRAM	232
8.3.2	6T-SRAM-Zelle	233
8.3.3	Flash-Speicher	235
8.4	Wiederholungsfragen	239
8.5	Übungen	240
8.6	Lösungen	241

9 Nanostruktur-Feldeffekttransistoren 243

9.1	Skalierung der CMOS-Technologie	244
9.1.1	Moore'sches Gesetz	244
9.1.2	Selbstjustiertes Polysilizium-Gate	246
9.1.3	Kupferverdrahtung und Low-k-Dielektrikum	247
9.1.4	Verspanntes Silizium	248
9.1.5	High-k-Metal-Gate-Technologie	249
9.1.6	Multi-Gate-Transistoren	250
9.2	Kleingeometrie-Bulk-MOSFET	250
9.2.1	Bändermodell Source-Kanal-Drain	250
9.2.2	Ableitung verbesserter Stromgleichungen	252

9.2.2.1	Starke Inversion	252
9.2.2.2	Schwache Inversion	255
9.2.3	Kurzkanaleffekte	259
9.2.3.1	Schwellspannungsverschiebung	260
9.2.3.2	Leckstrom.....	262
9.2.3.3	Verschlechterung des Subthreshold-Swing	262
9.2.3.4	Bahnwiderstände	264
9.2.3.5	LDD-Strukturen	265
9.2.3.6	Ladungsträgerinjektion	266
9.2.3.7	Weitere Kurzkanaleffekte	267
9.2.4	Schmalkanaleffekte	267
9.2.4.1	Standard-LOCOS-Isolation	267
9.2.4.2	Trench-Isolation	268
9.3	UTB-Technologie	270
9.3.1	SOI-Substrat	270
9.3.2	UTB-MOSFETs.....	272
9.3.2.1	Partially Depleted SOI.....	273
9.3.2.2	Fully Depleted SOI.....	274
9.4	Multiple-Gate-MOSFET	275
9.4.1	Double-Gate-MOSFET	275
9.4.1.1	Bändermodell	276
9.4.1.2	Stromgleichung	279
9.4.1.3	Diskrete Dotierstoffverteilung	282
9.4.1.4	Ultra-Kurzkanal-FET	284
9.4.2	Dreidimensionale Effekte in Multiple-Gate-MOSFETs	289
9.4.2.1	Bauelementstrukturen	289
9.4.2.2	Strompfad.....	291
9.4.2.3	Skalierung im Schaltungsdesign.....	296
9.4.3	Nanosheet-MOSFET	297
9.4.3.1	Grundstruktur	297
9.4.3.2	CMOS-Technologie.....	298
9.5	Wiederholungsfragen	299
9.6	Übungen	301
9.7	Lösungen	301

10	Alternative Nanostruktur-MOSFETs	303
10.1	Ziele für alternative Transistorstrukturen	303
10.2	High-Mobility-Channel-FET	306
10.3	Junctionless-MOSFET	307
10.3.1	Funktionsweise	308
10.3.2	Kennlinie	310
10.3.3	Vorteile.....	311
10.3.4	Nachteile	312
10.4	Schottky-Barrier-MOSFET	312
10.4.1	Funktionsweise	313
10.4.2	Kennlinie	316
10.4.3	Vorteile.....	317
10.4.4	Nachteile	317
10.5	Reconfigurable-FET	318
10.6	Tunnel-FET	320
10.6.1	Funktionsweise	320
10.6.2	Optimierung der Kennlinie	322
10.6.2.1	Einschaltstrom	322
10.6.2.2	Ambipolarer Strom	324
10.6.2.3	Subthreshold-Swing	326
10.6.3	Vorteile.....	327
10.6.4	Nachteile	327
10.7	Weitere Steep-Slope-Switches	329
10.7.1	Impact-Ionization-FET	329
10.7.2	Negative-Capacitance-MOSFET	330
10.8	2D-MOSFET	331
10.9	Wiederholungsfragen	333
	Konstanten und Materialparameter	335
	Simulationstools	337
	Formelzeichen	345
	Literatur	351
	Index	355