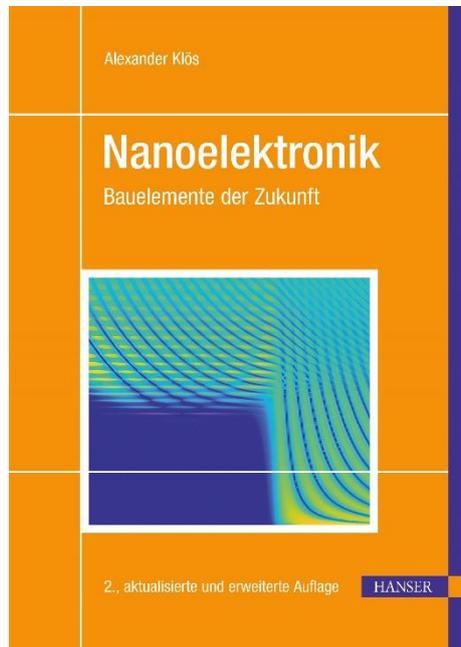


HANSER



Leseprobe

zu

Nanoelektronik

von Alexander Klös

Print-ISBN: 978-3-446-47899-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-47900-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446478992>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Die Anforderungen an das Fachgebiet der Mikroelektronik in der Lehre haben sich in den letzten Jahrzehnten stark verändert. Bis in das Jahr 2000 reichte für eine Vermittlung von Inhalten, welche nicht nur die Systemebene, sondern auch die Funktionsweise der integrierten Bauelemente betrachten, häufig eine semiklassische Beschreibung aus. Die stetige Verkleinerung der Strukturgrößen bis in den Bereich weniger Nanometer macht inzwischen eine tiefer gehende Betrachtung notwendig, welche Quanteneffekte wie beispielsweise den Tunneleffekt mit einbeziehen muss. Das Fachgebiet der *Nanoelektronik* ist entstanden. Die Lehre auf diesem Gebiet steht vor der Herausforderung, sowohl die physikalischen Grundlagen zum Verständnis dieser Effekte als auch das Klemmenverhalten von Bauelementen für eine Betrachtung im Schaltungsverbund zu vermitteln. Für Bachelor- und Masterstudierende der Elektrotechnik bleibt im Studium wenig Zeit, sich in die Grundlagen der Halbleiterphysik einzuarbeiten. Studierende der Physik decken diesen Teil zwar mit großer Tiefe ab, erreichen aber oft nicht eine Sichtweise in Bezug auf das Bauelement in einem Netzwerk.

Hier soll das vorliegende Buch einen Beitrag liefern. Es ist auf Grundlage von Vorlesungen entstanden, welche ich seit vielen Jahren auf den Gebieten der *Nanoelektronik* und *Festkörperelektronik* für Studierende der Elektrotechnik in Bachelor- und Masterstudiengängen an der Technischen Hochschule Mittelhessen halte. Bei der Konzeption des Buchs stand im Vordergrund, dass es als alleinige Grundlage für eine Vorlesung auf dem Gebiet mikroelektronischer oder nanoelektronischer Bauelemente geeignet ist.

Die Erläuterungen einer Vielzahl physikalischer Effekte in Halbleitern verlangen keine Vorkenntnisse, welche über die Grundlagen der Elektrotechnik hinausgehen. Das Buch enthält eine Einführung in die Grundlagen der Halbleiterphysik und -technologie bis zu einer Tiefe, wie sie zum Verständnis für den Einfluss von Quanteneffekten auf das Klemmenverhalten der Bauelemente notwendig ist. Dies erlaubt auch Bachelorstudierenden, einen Einblick in die besondere Funktionsweise von Schaltelementen der Nanoelektronik zu erhalten. Für Studierende von Masterstudiengängen sind detaillierte Ableitungen quantenmechanischer Grundlagen und der Kennliniengleichungen von Bauelementen enthalten.

Zur Unterstützung des Lernerfolgs schließen die meisten Kapitel mit Wiederholungsfragen, welche die erläuterten Zusammenhänge ohne notwendige Berechnungen abfragen. Übungsaufgaben mit Musterlösungen dienen der weiteren Vertiefung des Lernstoffs.

In Ergänzung zu den Rechenbeispielen wird in einigen Kapiteln auf die Simulationsplattform <http://nanohub.org> der Purdue University (USA) verwiesen. Hier stehen (nach kostenloser Registrierung) eine Vielzahl von Online-Simulationstools für das Gebiet der Nanoelektronik zur Verfügung, welche das Verständnis der Inhalte zusätzlich unterstützen.

Das Buch umfasst mit den Kapiteln 2, 3, 4 und 5 eine für Elektrotechnikstudierende geeignete Einführung in die Grundlagen der Halbleiterphysik, welche die in Bauelementen der Nanoelektronik in Erscheinung tretenden besonderen Effekte enthält. Kapitel 6 gibt einen kurzen Überblick über die Grundlagen der Halbleitertechnologie, wie er zum Verständnis der im Buch vorgestellten Bauelementstrukturen notwendig ist. Studierende der Physik können von

der Beschreibung der Funktionsweise einer Vielzahl klassischer Bauelemente der Mikroelektronik in Kapitel 7, ausgehend von den zugrunde liegenden physikalischen Effekten bis hin zu ihrem Klemmenverhalten, profitieren. Kapitel 8 gibt eine Einführung die wichtige CMOS-Schaltungstechnik und Speichertechnologien.

Kapitel 9 führt nach Darstellung der technologischen Entwicklung der klassischen CMOS-Technologie in die heutige Großintegration ein und erläutert ihre Grenzen. Dabei steht das elektrische Verhalten des MOS-Transistors als immer noch wichtigstes Schaltelement im Vordergrund. Kapitel 10 stellt schließlich Bauelementstrukturen vor, welche als Ergänzung oder Ersatz des klassischen MOS-Transistors angedacht sind. Zum heutigen Zeitpunkt werden sie zwar bereits experimentell gefertigt, haben aber noch keinen Einzug in die Serienfertigung erhalten.

An dieser Stelle möchte ich den Doktoranden und Studierenden der Arbeitsgruppe *Nanoelektronik/Bauelementmodellierung* an der TH Mittelhessen danken, welche mit ihren wissenschaftlichen Arbeiten im Rahmen öffentlich geförderter Projekte auf dem Gebiet der Simulation und Modellbildung neuartiger Transistorkonzepte einen wichtigen Beitrag zu deren Verständnis und Beschreibung geleistet haben. Besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Mike Schwarz für das Korrekturlesen der Inhalte dieses Buchs.

Schließlich einen besonderen Dank an meine Familie für die vielfältige Unterstützung meiner Arbeit in all den Jahren.

Gießen, im Mai 2018

Alexander Klös

Vorwort zur 2. Auflage

Kaum ein Gebiet der Ingenieurwissenschaften entwickelt sich so rasant wie die Nanoelektronik. Seit der Drucklegung der ersten Auflage dieses Buchs wurden neue Bauelementkonzepte entwickelt, die für die weitere Entwicklung der Großintegration sehr vielversprechend sind. Heute bereiten die drei wirtschaftlich größten Halbleiterhersteller den Übergang zu sogenannten Nanosheet-Transistoren vor. Durch konsequente Weiterentwicklung dieses Konzepts haben 2D-Materialien in der Nanoelektronik inzwischen eine große Bedeutung erlangt und werden für neue Transistorstrukturen erforscht. Diese Entwicklungen sind jetzt in der neuen Auflage des Buchs enthalten.

Weiterhin wurden die Grundlagenkapitel zur Halbleiterphysik erweitert, um dem Anspruch des Buchs als umfassendes und alleiniges Begleitbuch für Vorlesungen auch in Masterstudiengängen gerecht zu werden. Hierbei wird insbesondere der Einführung der Bandstruktur von Halbleitern und der Berechnung von Tunnelströmen mehr Raum gewidmet. Eine Vielzahl von kleineren Änderungen und Aktualisierungen in allen sonstigen Kapiteln und eine Übersicht der empfohlenen Simulationstools auf der Plattform nanohub.org runden die neue Auflage ab.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass aus Gründen einer einheitlichen Darstellung im Text und in den grafischen Darstellungen der Punkt als Dezimaltrennzeichen entsprechend dem englischen Sprachraum verwendet wird.

Gießen, im Januar 2024

Alexander Klös

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

1

Einführung in die Nanoelektronik

In diesem Kapitel wird zunächst die Bedeutung der Mikroelektronik für technologischen Fortschritt erläutert. Anschließend wird das Gebiet der *Nanoelektronik* davon abgegrenzt. Die hierbei wichtigen grundlegenden physikalische Effekte der Mikrophysik werden benannt.

Lernziele

Die Lernenden ...

- kennen die technologische Entwicklung der Mikroelektronik,
- kennen die Abgrenzung von Mikro- zur Nanoelektronik,
- können die in der Nanoelektronik gegenüber der Mikroelektronik zusätzlich in Erscheinung tretenden physikalischen Effekte benennen.

■ 1.1 Bedeutung der Mikroelektronik

Die in den vergangenen Jahrzehnten erreichte enorme Steigerung der Leistungsfähigkeit elektronischer Systeme beruht in hohem Maße auf dem Fortschritt der Mikroelektronik. Maßgeblich hierbei ist die Silizium-Technologie, welche durch kontinuierliche Verkleinerung der hergestellten Strukturgrößen einen stetigen Anstieg der Komplexität integrierter Schaltkreise bei immer geringerer Leistungsaufnahme ermöglichte (vgl. Bild 1.1). Damit wurden moderne mobile Anwendungen mit langer Akkulaufzeit bei hoher Rechenleistung wie beispielsweise das Smartphone geschaffen. Aber auch die Steigerung der Leistungsfähigkeit in Multi-Core-Prozessorsystemen wäre ohne die Vergrößerung der Integrationsdichte nicht möglich.

Als wichtigstes Schaltelement einer digitalen Schaltung auf einem VLSI-Chip (VLSI: engl. für *very large scale integration*) gilt seit vielen Jahrzehnten der MOS-Feldeffekttransistor (MOS-FET), da mit ihm die geringste Leistungsaufnahme und höchste Integrationsdichte für ein komplexes System zu erzielen ist.

Die Silizium-Planartechnologie basiert auf der schrittweisen Abscheidung dünner Schichten auf einem *Silizium-Wafer* (einkristalline dünne Siliziumscheibe) und deren laterale Strukturierung. Daraus werden ausschließlich auf der Oberfläche des Wafers die funktionalen Bauelemente geschaffen. Die Dicke der abgeschiedenen Schichten ist schon seit Jahrzehnten im Bereich weniger Nanometer bis Mikrometer. Die lateralen Strukturen sind ebenfalls schon seit den neunziger Jahren im Submikrometerbereich. Dennoch spricht man erst seit ca. 15 Jahren im Bereich höchstintegrierter Schaltkreise von „Nanoelektronik“.

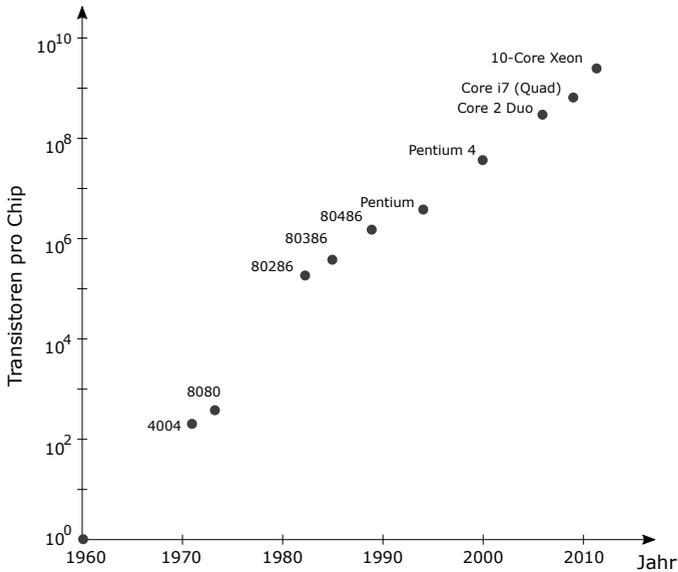


Bild 1.1 Historische Entwicklung der Anzahl integrierter Schaltelemente je Chip am Beispiel von Prozessorgenerationen

Die möglichst defektfreie technologische Realisierung von Strukturen im Bereich weniger Nanometer über die gesamte Obedfläche eines Wafer hinweg, der heute einen Durchmesser von bis zu 450 mm hat, verlangt hochtechnologische Herstellungsprozesse im Reinraum. Der Bau einer Halbleiterfabrik kostet daher mehrere Milliarden US\$, sodass weltweit nur noch wenige Unternehmen in der Lage sind, dieses finanzielle Risiko zu tragen.

Die Entwicklungskosten eines Mikrochips und die Auftragsfertigung in einer Halbleiterfabrik können bis zu mehreren Millionen US\$ betragen. Nur mit genügend großer Stückzahl eines Integrierten Schaltkreises können die Entwicklungskosten so auf die einzelnen Chips umgelegt werden, dass ein Verkaufspreis von wenigen US\$ erreicht wird.

■ 1.2 Chancen der Nanoelektronik

Was unterscheidet *Nanoelektronik* von *Mikroelektronik*? In der Fachwelt spricht man von Nanoelektronik, wenn in Halbleiterbauelementen physikalische Effekte in Erscheinung treten, die in älteren Technologien überhaupt nicht erkennbar oder zumindest vernachlässigbar waren. Diese Effekte sind quantenmechanischer Natur und verlangen zu deren Beschreibung ein tiefgehendes Verständnis für die Betrachtung von Elektronen als Wellen oder Teilchen. Zwar basiert die gesamte Festkörperphysik im Kern auf dem Dualismus zwischen Welle und Teilchen, jedoch erlaubt die Einführung des sogenannten Bändermodells für kristalline Halbleiter in den meisten Fällen eine Beschreibung der elektrischen Effekte in mikroelektronischen Bauelementen auf Grundlage der klassischen Physik.

Für die Nanoelektronik ist diese Vereinfachung nicht mehr möglich; die Wellennatur des Elektrons hat einen wesentlichen Einfluss. Bei Abmessungen im Nanometerbereich hat man die Größenordnung der Wellenlänge von Elektronen im Bauelement erreicht. Dadurch wird insbesondere das *Tunneln* von Ladungsträgern durch Barrieren ermöglicht.

In Bauelementen der Nanoelektronik tritt der Tunneleffekt in zwei Arten in Erscheinung:

- Der Tunneleffekt kann als unerwünschter, parasitärer Effekt das elektrische Verhalten des Schaltkreises verschlechtern und verhindert damit auch die weitere Miniaturisierung der Bauelemente. Beispielsweise steigen Leckströme an, sodass ein energieeffizienter Betrieb bei Steigerung der Integrationsdichte nicht mehr erreicht werden kann.
- Der Tunneleffekt kann aber auch zur Steigerung der elektrischen Leistungsfähigkeit in neuartigen Bauelementen gezielt genutzt werden. Hierzu ist es notwendig, in einer Technologie Strukturabmessungen im Bereich weniger Nanometer kontrolliert herstellen zu können. Die heutige Technologie ist hierzu in der Lage.

Aber nicht nur das gezielte Nutzen quantenmechanischer Effekte macht neuartige Bauelemente der Nanoelektronik aus. Die Fähigkeit, in einer Technologie Strukturen von wenigen Nanometern Abmessung mit ausreichender Genauigkeit und Ausbeute herzustellen, erlaubt die Realisierung ganz neuartiger Transistorgeometrien. Als Beispiel sei die im Jahr 2011 eingeführte *FinFET-Technologie* genannt, welche einen grundlegenden Wandel der jahrzehntelang vergleichsweise ähnlich gebliebenen Herstellung des MOS-Transistors bedeutete. Führende Hersteller setzten mit dieser Technologie auf eine weitere Verkleinerung des einzelnen Schaltelements. Heute werden Konzepte für neue Transistorstrukturen mit funktionalen Schichten entwickelt, welche nur noch eine Dicke von wenigen Nanometern aufweisen, sogenannte *Nanosheets*. All diese weltweiten Forschungsanstrengungen in Industrie und Hochschulen zielen darauf ab, den Bedarf der Industriegesellschaft nach immer höherer Leistungsfähigkeit integrierter Schaltkreise zu decken.

Auch unter Verwendung dieser neuartigen Transistorstrukturen ist das Ende der Miniaturisierung beinahe erreicht. Die Funktionsweise des MOS-Transistors verschlechtert sich bezüglich seines Schaltverhaltens so immens, dass intensiv nach alternativen Konzepten für einen elektronischen Schalter geforscht wird. Die in Nanostrukturen in den Vordergrund tretenden Effekte können hierbei vielleicht als Grundlage für neuartige Transistorprinzipien genutzt werden.

2

Eigenschaften von Halbleitern

Nanoelektronische Bauelemente bestehen zum größten Teil aus Halbleitermaterialien. Daher sind für das Verständnis ihrer Funktionsweise Kenntnisse über die elektrische Leitfähigkeit dieser Materialien und der darin auftretenden Ladungen essenziell.

Lernziele

Die Lernenden ...

- können Metalle – Halbleiter – Isolatoren anhand ihrer Bandstruktur unterscheiden,
- kennen die Ursachen elektrischer Leitfähigkeit in Halbleitern,
- kennen die Ursache der Sperrwirkung einer Diode,
- verstehen die Grundlagen der Elektrostatik an einem pn-Übergang.

■ 2.1 Struktur von Halbleitern

Die Leitfähigkeit eines Festkörpers wird durch die Konzentration an freien, beweglichen Ladungsträgern bestimmt, welche für einen Stromfluss zur Verfügung stehen. Im nächsten Abschnitt wird zunächst der grundsätzliche Unterschied in der Bandstruktur verschiedener Festkörper erläutert. Aufgrund der Bedeutung von Silizium für die Mikroelektronik und auch die Nanoelektronik werden in den nachfolgenden Abschnitten elektrische Eigenschaften von Halbleitern am Beispiel dieses Elements erläutert. Darauf aufbauend wird dann in späteren Kapiteln auf die Besonderheiten anderer Halbleiter hingewiesen.

2.1.1 Bandstruktur

Die Unterschiede in der sogenannten *Bandstruktur* von Isolatoren, Halbleitern und Metallen verdeutlicht Bild 2.1. Aufgrund der Ausbildung und Interferenz von Wellenfunktionen der Elektronen im Festkörper befinden sich nur in den sogenannten Energiebändern erlaubte Energieniveaus der Elektronen. In den dazwischenliegenden Bandlücken findet sich kein erlaubtes Energieniveau.

Nur Ladungsträger mit einer Energie entsprechend dem *Leitungsband* können sich im Festkörper frei bewegen. Wirkt nun ein elektrisches Feld auf diese Ladungsträger ein, dann entsteht eine gerichtete Bewegung und es fließt ein Strom.

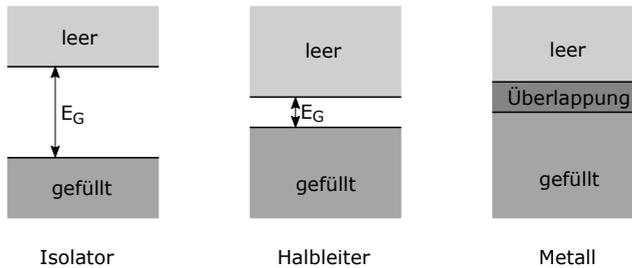


Bild 2.1 Schematische Darstellung der Bandstruktur von Isolatoren, Halbleitern und Metallen

Ladungsträger im *Valenzband* eines Atoms (wie auch Elektronen in Bändern mit geringerer Energie) sind an dieses gebunden und können daher nicht zum Stromfluss beitragen. Gelangen Elektronen aus dem Valenzband jedoch durch Aufnahme von Energie in Höhe der Bandlücke E_G in das Leitungsband, dann können diese die Leitfähigkeit des Materials erhöhen. Ein Übergang vom Valenz- in das Leitungsband ist beispielsweise durch Aufnahme thermischer Energie oder Absorption von Photonen möglich.

Bei Isolatoren besteht zwischen Valenz- und Leitungsband eine Bandlücke von mehr als 5 eV. Das Valenzband ist von Elektronen besetzt, wogegen das Leitungsband unbesetzt ist. Daher kann im Isolator kein Stromfluss stattfinden.



Die Einheit eV (*Elektronenvolt*) steht für die Energie $1.602 \cdot 10^{-19}$ VAs. Ein Elektronenvolt ist damit die Menge an potenzieller Energie, welche ein Elektron bei Bewegung in einem elektrostatischen Feld mit der Potenzialdifferenz von 1 V aufnimmt oder abgibt.

In Metallen befinden sich bereits ohne Zufuhr thermischer Energie, das heißt bei einer Temperatur von $T = 0$ K, Elektronen im Leitungsband. Damit ist eine grundsätzliche Leitfähigkeit von Metallen gegeben.

Halbleiter liegen mit ihren Eigenschaften zwischen Isolatoren und Metallen. Wir betrachten hier zunächst den *intrinsischen*, das heißt reinen Halbleiter, ohne Verunreinigungen durch Fremdatome. Beim absoluten Nullpunkt der Temperatur befinden sich alle Elektronen im Valenzband und in darunterliegenden Bändern. Das Leitungsband ist unbesetzt. Der Halbleiter verhält sich also als Isolator. Wird die Temperatur erhöht, dann können Elektronen zusätzliche thermische Energie aufnehmen und den Übergang in das Leitungsband schaffen. Hierzu ist die Aufnahme von Energie in mindestens der Größe der Bandlücke E_G notwendig. Damit steigt die elektrische Leitfähigkeit der Halbleiter bei Erwärmung und sie verhalten sich zunehmend entsprechend den Metallen.

Der Unterschied zwischen Isolatoren und Halbleitern ist also im Wesentlichen in der Größe der Bandlücke E_G begründet. Bei Isolatoren ist diese so groß ($E_G > 5$ eV), dass die Aufnahme thermischer Energie nicht genügt, eine für einen Stromfluss ausreichende Anzahl von Elektronen in das Leitungsband zu bringen. Dagegen gelingt dies bei Halbleitern aufgrund ihrer geringeren Bandlücke.

Gruppe \ Periode	II	III	IV	V	VI
2	Be	B	C	N	O
3	Mg	Al	Si ₁₄	P	S
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
5	Cd	In	Sn	Sb	Te
6	Hg	Tl	Pb	Bi	Po

Bild 2.2 Ausschnitt aus dem Periodensystem mit den wichtigsten Elementen der Halbleitertechnologie



Aus der mit einer Erwärmung ansteigenden Anzahl von Elektronen, welche vom Valenz- in das Leitungsband gelangen, folgt für die elektrische Leitfähigkeit im intrinsischen Halbleiter direkt eine *exponentielle Abhängigkeit von der Temperatur*.

Wichtige chemische Elemente der Halbleitertechnologie sind in Bild 2.2 dargestellt. Man unterscheidet zwischen sogenannten *Elementhalbleitern* aus der IV. Hauptgruppe wie Silizium und Germanium und *Verbindungshalbleitern* wie beispielsweise Legierungen aus Elementen der III. und V. Hauptgruppe.

Der wichtigste Halbleiter ist hierbei Silizium aufgrund seiner Verwendung in der historisch langjährigen und ausgereiften Technologie. Silizium weist mit einer Bandlücke von $E_G = 1.12$ eV bereits bei Raumtemperatur eine geringe elektrische Leitfähigkeit auf. Die exponentielle Zunahme von Ladungsträgern im Leitungsband verbietet allerdings einen Betrieb siliziumbasierter Schaltkreise bei Umgebungstemperaturen von mehr als 150 °C.

Bei Verbindungshalbleitern ist insbesondere Galliumarsenid (GaAs) mit weiteren Anteilen von Aluminium (Al), Indium (In), Phosphor (P), Stickstoff (N) oder Antimon (Sb) für optoelektronische Bauelemente von Bedeutung. Galliumnitrid (GaN) findet aufgrund der in speziellen Strukturen erreichbaren hohen Schaltgeschwindigkeit Anwendung als Material in der Hochfrequenztechnik. Aber auch in der Leistungselektronik hat GaN in den letzten Jahren eine große Bedeutung erlangt. Die große Bandlücke mehr als 3 eV und ein niedriger Verlustwiderstand erlaubt die Realisierung von Konvertern mit Spannungen bis zu 600 V und Leistungen bis zu 10 kW. Daher sind GaN-basierte Transistoren in DC/DC-Wandlern im Bereich von Elektroklein-geräten bis hin zur industriellen Stromversorgung sehr verbreitet.

Auch Legierungen von Elementen in der IV. Hauptgruppe werden in der Technologie für spezielle Anwendungen verwendet: Siliziumkarbid (SiC) beispielsweise weist je nach strukturellem Aufbau eine Bandlücke von 2.4 eV...3.3 eV auf und eignet sich daher zum Beispiel für die Realisierung von Hochtemperaturelektronik, welche Betriebstemperaturen von mehreren hundert Grad Celsius erlaubt. Die große Bandlücke ermöglicht auch hier das Schalten hoher Spannungen. SiC-basierte Transistoren zunehmend in der Leistungselektronik zum Schalten von Leistungen bis in den Bereich von mehr als 100 kW eingesetzt.

Im Zuge der Nanoelektronik werden vermehrt Elementhalbleiter mit Verbindungshalbleitern in sogenannten *Heterostrukturen* kombiniert. Die Abscheidung extrem dünner Schichten wechselnder Materialien in einer Dicke von nur wenigen Nanometern erlaubt das kontrollier-

te Auftreten quantenmechanischer Effekte, die man sich zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Bauelementen zunutze macht.

2.1.2 Atomarer Aufbau von Silizium

Bild 2.3 zeigt für Silizium das vollständige *Atommodell nach Bohr*¹ und eine vereinfachte Darstellung. Im Bohr'schen Atommodell werden die Elektronen auf unterschiedliche Energieniveaus, die sogenannten stationären Zustände oder Schalen gesetzt. Wenn man die Schalen durchnummeriert (1...7), erhält man die Hauptquantenzahl n . Die Schalen können immer nur mit einer bestimmten Anzahl Elektronen besetzt werden; die maximale Anzahl beträgt $2 \cdot n^2$. Eine innere Schale muss immer erst voll besetzt sein, bevor die nächsthöhere Schale besetzt werden kann.

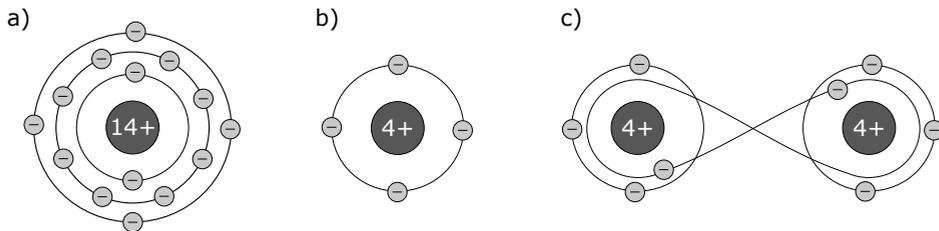


Bild 2.3 Atommodell nach Bohr für Silizium: a) vollständig mit allen Schalen, b) vereinfachte Darstellung, nur die äußere Schale der Valenzelektronen ist dargestellt, c) vereinfachte Darstellung der Elektronenpaarbindung zweier benachbarter Siliziumatome (Austausch eines Valenzelektrons)

Ein Elektron kann von einer Schale in eine andere springen. Dieser als Quantensprung bezeichnete Vorgang lässt sich mit der klassischen Mechanik und Elektrodynamik nicht erklären. Beim Quantensprung zwischen stationären Zuständen mit verschiedener Energie kann elektromagnetische Strahlung in Form eines Photons emittiert oder absorbiert werden. Die Energie des Photons entspricht der Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen. Alternativ kann auch eine Umwandlung in Wärmeenergie erfolgen.

Mit seiner Kernladungszahl 14 besitzt ein Siliziumatom 14 Elektronen auf den Schalen (vgl. Bild 2.3a). Entsprechend der IV. Hauptgruppe des Periodensystems befinden sich auf der äußersten besetzten Schale vier sogenannte *Valenzelektronen*. Nur diese können unter Zuführung geringer Energie das Atom verlassen. Für die elektrischen Eigenschaften des Halbleiters sind diese Valenzelektronen maßgeblich, daher verwenden wir nachfolgend eine vereinfachte Darstellung des Siliziumatoms. Es reicht die Betrachtung der vier Valenzelektronen zusammen mit einem vierfach positiv geladenen Kern, damit das gesamte Atom elektrisch neutral bleibt (Bild 2.3b).

Mit seinen vier Valenzelektronen kann das Siliziumatom mit vier benachbarten Atomen eine Elektronenpaarbindung eingehen (Bild 2.3c).

¹ Niels Bohr (1885–1962), dänischer Physiker, gelang 1922 durch Annahme eines Schalenmodells eine Erklärung für den Aufbau des Periodensystems der Elemente. Er erhielt 1922 für seine Forschungen über die Atomstruktur sowie die von den Atomen ausgehende Strahlung den Nobelpreis für Physik.

2.1.3 Kristallgitter

In Halbleitern wird die Energie zum Aufbau der Kristallgitter durch die Bindungsenergie der Valenzelektronen aufgebracht. Silizium und Germanium kristallisieren aus der Schmelze im sogenannten *Diamantgitter*. Bild 2.4 verdeutlicht dies und zeigt schematisch eine Elementarzelle des Kristallgitters. Die Abmessungen einer Elementarzelle bezeichnen wir mit der *Gitterkonstanten* a_0 . Für Silizium beträgt $a_0 = 0.543 \text{ nm}$, wobei eine Zelle acht Siliziumatome enthält. Das Kristallgitter besteht aus zwei kubisch-flächenzentrierten Gittern, wobei das zweite um $1/4$ der Würfeldiagonalen in der Diagonalrichtung gegenüber dem ersten Gitter verschoben ist.

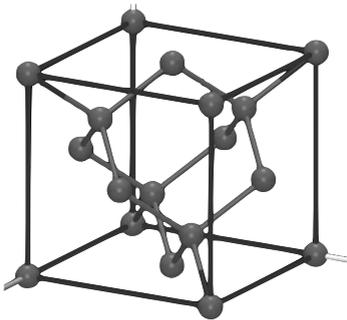


Bild 2.4 Elementarzelle eines Silizium-Kristalls (Diamantgitter)

Die Verbindungshalbleiter Galliumarsenid und Galliumphosphid kristallisieren im *Zinkblendegitter*. Es entspricht dem Diamantgitter, bei dem das erste kubisch-flächenzentrierte Gitter aus Galliumatomen, das zweite Gitter aus Arsenatomen besteht.

Die Eigenschaften eines Halbleiters hängen von der Kristallstruktur ab. Innerhalb eines Materials sind verschiedene Größen abhängig von der Richtung im Kristall. Zur Definition verschiedener Ebenen und Richtungen in Kristallgittern wurden die *Miller'schen Indizes* eingeführt. Sie können in folgenden Schritten bestimmt werden (vgl. Bild 2.5):

1. Man zeichnet die kubische Elementarzelle in ein kartesisches Koordinatensystem ein. Die drei Kanten des Würfels müssen auf den Achsen x , y , z liegen.
2. Die Schnittpunkte der Kristallebene mit den Achsen x , y , z werden in Einheiten der Gitterkonstanten ausgedrückt.
3. Anschließend wird der Kehrwert der erhaltenen Zahlen gebildet. Die Komponenten werden mit einem gemeinsamen Faktor multipliziert, sodass sich die drei kleinsten ganzen Zahlen h , k , l ergeben, welche im gleichen Verhältnis stehen wie die ursprünglichen Kehrwerte.
4. Das Ergebnis wird in runde Klammern gesetzt: $(h \ k \ l)$.
5. Negative Indizes werden durch Querbalken über dem Index dargestellt (z. B. $(1 \ \bar{1} \ 0)$).

Beispiel 2.1 Bestimmung der Miller'schen Indizes

Zur Bestimmung der Miller'schen Indizes der in Bild 2.5 gezeigten Ebene gehen wir wie folgt vor:

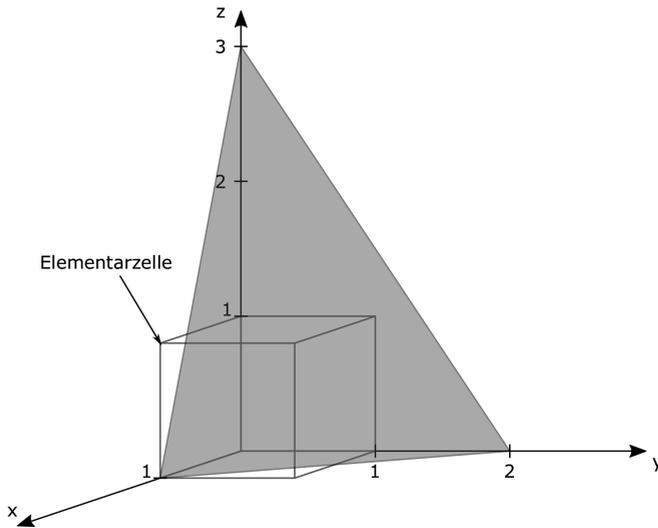


Bild 2.5 Beispiel einer Kristallebene mit Darstellung der Elementarzelle im Koordinatensystem

- Die Achsenabschnitte der Ebene betragen:
 x -Achse: 1, y -Achse: 2, z -Achse: 3
- Wir bilden den Kehrwert und erhalten:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

- Wir erweitern mit dem Faktor 6, damit alle Zahlen ganzzahlig werden. Die gesuchten Miller-Indizes der Kristallebene lauten daher:

$$(6 \ 3 \ 2)$$

■

Beispiele für Kristallebenen, welche in der Halbleitertechnologie häufig verwendet werden, zeigt Bild 2.6.

Kristallrichtungen werden durch die Gruppe kleinster Zahlen ausgedrückt, welche dasselbe Verhältnis zueinander haben wie die Komponenten eines Vektors in der gewünschten Richtung. Zur Bezeichnung der Richtung werden diese Zahlen in eckige Klammern gesetzt.

In kubischen Kristallen ist die Gitterkonstante in den drei Richtungen gleich. Daher stehen hier die Richtungen $[h \ k \ l]$ senkrecht auf der Ebene $(h \ k \ l)$ mit den gleichen Indizes. Die Richtung entspricht also dem Normalenvektor der zugehörigen Kristallebene.

Sind anstatt einer spezifischen Netzebene alle symmetrisch äquivalenten Ebenen gemeint, so wird die Notation $\{h \ k \ l\}$ verwendet. Beispielsweise bezeichnet man im kubischen Kristallsystem mit $\{1 \ 0 \ 0\}$ die äquivalenten Ebenen $(1 \ 0 \ 0)$, $(\bar{1} \ 0 \ 0)$, $(0 \ 1 \ 0)$, $(0 \ \bar{1} \ 0)$, $(0 \ 0 \ 1)$, $(0 \ 0 \ \bar{1})$, was den sechs Oberflächen eines Würfels entspricht. Die Notation $\langle h \ k \ l \rangle$ bezeichnet alle zum Vektor $[h \ k \ l]$ symmetrisch äquivalenten Richtungen. Die Angabe $\langle 1 \ 1 \ 1 \rangle$ steht daher für alle Raumdiagonalen.

In der Siliziumtechnologie wird vorwiegend $(1 \ 0 \ 0)$ -orientiertes Material verwendet. Das heißt, dass die Oberfläche des Wafers der $(1 \ 0 \ 0)$ -Ebene entspricht.

Index

- Absorption, 54
- Absorptionskoeffizient, 204
- Ätzmaske, 136
- Ätzprozess
 - anisotrop, 136
 - isotrop, 136
 - nasschemisch, 137
 - Plasma-, 137
 - reaktiver Ionen- (RIE), 138
 - Sputtern, 138
 - trocken, 137
- Akkumulation, 308
- Akkumulationskanal, 187
- aktiv-normaler Betrieb, 165
- Aktivgebiete, 144
- Akzeptoren, 29, 79
- ambipolarer Betrieb, 315, 322, 324, 331
- ASIC, 126
- Atommodell nach Bohr, 22, 50, 54
- Aufdampfen, 130
- Auger-Prozesse, 75
- Ausgangsleitwert
 - Bipolartransistor, 173
 - MOSFET, 194
- Austrittsarbeit, 78, 79

- back gate, 274
- Bändermodell, 65, 76
 - Bipolartransistor, 165
 - Diode in Flussrichtung, 149
 - Diode in Sperrrichtung, 153
 - Double-Gate-MOSFET, 276
 - Esaki-Tunnelndiode, 157
 - Flash-Speicherezelle, 237
 - Heteroübergang, 91
 - JLT, 308
 - MOSFET, 180, 250
 - pin-Fotodiode, 205
 - pn-Übergang, 82, 85
 - Resonante Tunnelndiode (RTD), 159
 - RFET, 318
 - SB-MOSFET, 313
 - Schottky-Diode, 161
 - Schottky-Übergang, 87
 - TFET, 321, 323
 - Tunnelprozesse, 114
- Bahnwiderstand, 264
- Bahnzonen, 33
- ballistischer Transport, 110, 267, 284
- Bandabstand, 67, 79
- Bandlücke, 66, 68, 79
- Bandstruktur, 19, 67
- Bandübergang
 - direkt, 74
 - indirekt, 74
- Barrierenhöhe
 - effektive, 91
 - intrinsische, 89
- Basis, 165
- Belichtung
 - Kontakt-, 133
 - Projektions-, 133
 - Proximity-, 133
 - Step-and-Repeat-, 133
- Besetzungsinversion, 202
- Beweglichkeit, 106, 252
- Bipolartransistor, 165
 - äußerer Transistor, 175
 - aktiv-normaler Betrieb, 165
 - Ausgangsleitwert, 173
 - Bändermodell, 165
 - Buried-Layer, 175
 - Early-Effekt, 168, 173
 - Early-Spannung, 169
 - Ebers-Moll-Modell, 172
 - funktioneller Teil, 175
 - Gummel-Poon-Modell, 173
 - innerer Transistor, 175
 - Inversbetrieb, 165, 171

- Kleinsignalersatzschaltbild, 173
- linearer Arbeitsbereich, 165
- neutrale Basiszone, 167
- quasistatisch, 174
- Rückwärtsbetrieb, 165, 171
- Sättigungsbereich, 165, 171
- Standard-Buried-Collector-Prozess, 174
- Steilheit, 173
- Stromverstärkung
 - in Basisschaltung, 169
 - in Emitterschaltung, 169
- Transitzeit, 167
- Transkonduktanz, 173
- Vorwärtsbetrieb, 170, 171
- bird's beak, 139
- Bitline, 232, 233
- Bohr'sches Atommodell, 22, 50, 54
- Boltzmann-Konstante, 31, 77
- Boltzmann-Näherung, 97
- Boltzmann-Verteilung, 78
- bound states, 66
- Brillouin-Zone, 68
- built-in voltage, 256
- Bulk, 177
- Bulk-Current-Mode, 308
- Bulk-MOSFET, 199, 243
- Buried-Layer, 175
- Buried-Oxide, 270

- Cache, Prozessor-Cache-Speicher, 234
- CFET, 298
- Channel-Stop-Implantation, 267
- Chemical-Vapor-Deposition (CVD), 128
- classical turning points, 56
- CMOS
 - Aktivgebiete, 144
 - Inverter, 224
 - Leistungsaufnahme, 230, 303
 - NAND, 229
 - NOR, 229
 - selbstjustiert, 144, 246
 - Technologie, 142, 177, 223
- CMP: chemical mechanical polishing, 127, 270
- Complementary FET, 298
- Complementary MOS, 142, 223

- Control-Gate, 235, 320
- Crystal Viewer Tool, 26
- current crowding, 264
- CV-Messung, 186
- CVD, 128
 - Low-Pressure, 128
 - Plasma-Enhanced, 128

- dangling bonds, 332
- De-Broglie-Welle, 40
- density of states, 94
- depletion region, 32, 33, 187, 308
- depletion type, 184
- Depletion-Mode, 308
- Diamantgitter, 23
- DIBL: Drain-Induced-Barrier-Lowering, 261
- Dichalkogenid, 25, 331
- Diffusion, 141
 - erschöpfliche Quelle, 141
 - unerschöpfliche Quelle, 141
- Diffusionskapazität, 155
- Diffusionskonstante, 111
- Diffusionslänge, 148
- Diffusionsmaske, 141
- Diffusionsspannung, 152
- Diffusionsstrom, 83, 111
- Dirac-Punkt, 331
- direkter Halbleiter, 69, 74, 75
- Donatoren, 28, 79
- DOS, 94
- Dotierung, 79, 141, 282
- Double-Gate (DG) MOSFET, 275
- Drain, 177
- Dreieckbarriere, 59
- Driftgeschwindigkeit, 105
- Driftsättigungsgeschwindigkeit, 108, 253
- Driftstrom, 83, 105
- Driftzone, 252
- Dualismus, 40
- Dunkelstrom, 205
- Durchbruchfeldstärke, 154

- Early-Effekt, 168, 173
- Early-Spannung, 169
- Ebers-Moll-Modell, 172
- Effective-Mass-Approximation, 71, 72

- effektive Masse, 71
- leichte Löcher, 73
 - longitudinale, 72
 - schwere Löcher, 73
 - transversale, 72
- effektive Zustandsdichte, 97
- Eigenenergie, 45, 48, 54
- Eigenleitung, 27
- Einstein-Beziehung, 111
- elastisches Tunneln, 116
- Elektronenaffinität, 76
- Elementarzelle, 23
- Elementhalbleiter, 21
- Emission, 55
- induzierte, 202
 - spontane, 202
 - stimulierte, 202
 - thermische, 313
- Emitter, 165
- Energiebänder, 66
- Energiebandschema, 76
- energy gap, 67
- enhancement type, 184
- entarteter Halbleiter, 81
- Epitaxie, 91, 130
- Exponentialansatz, 46
- Extreme-UV (EUV), 136
- Fallenzustände, 113, 326
- Fermi-Dirac-Integral, 97
- Fermi-Dirac-Statistik, 77
- Fermi-Level, 79
- Fermi-Level-Pinning, 317
- Fermi-Niveau, 77
- Fermi-Verteilung, 77, 78
- FinFET, 289
- Bulk, 291
 - SOI, 291
- Flachbandspannung, 180, 182
- Flachbandzustand, 180, 308
- Floating-Gate, 235
- Flussrichtung, 84
- Forksheet-FET, 298
- Fotodiode, 204
- fotoelektrischer Effekt, 54
- Fotoelement, 205
- Fotoleiter, 204
- Fotostrom, 204, 205
- Fototransistor, 205
- Fourier-Integral, 42
- Fourier-Transformation, 41
- Fowler-Nordheim-Tunneln, 113, 114
- Fremdleitung, 28, 29
- Füllfaktor, 207
- Fully-Depleted-SOI-MOSFET (FDSOI), 274
- GAA-FET (Gate-All-Around-FET), 289
- Gamma-Funktion, 97
- Gate, 177
- Gate-Underlap, 317, 325
- Gate-Voltage-Overdrive, 188
- gebundene Zustände, 66
- Generation, 73
- Generationsrate, 73, 204
- Gitter
- Diamant-, 23
 - kubisch-flächenzentriert, 23, 68
 - Zinkblende-, 23
- Gitterkonstante, 23, 65
- Gradual-Channel-Approximation, 188, 253
- Graphen, 25
- Gruppengeschwindigkeit, 41
- Gummel-Poon-Modell, 173
- Halbleiter, 20
- 2D-, 25
 - degeneriert, 81, 202
 - direkt, 69, 74, 75
 - indirekt, 69, 74, 75
- Halbleiterlaser, 202
- heavy holes, 73
- Heisenberg'sche Unschärferelation, 44
- Heteroepitaxie, 130
- Heterostrukturen, 53, 91, 130, 159, 202, 324
- High-k-Materialien, 249, 259, 262, 306, 324
- High-Mobility-Channel-FET, 306
- Hochfeldzone, 179
- Hot-Carriers, 239, 265
- I-MOS, 305, 329
- IFET, 305, 329

- Image-Charge-Effect, 91
- Immersionslithografie, 135
- Impact Ionization, 154
- Impact-Ionization-FET, 305, 329
- Implantation, 142
- Implantationsdosis, 142
- Impulsraum, 68
- indirekter Halbleiter, 69, 74, 75
- inelastisches Tunneln, 116
- Injektion
 - hohe, 152
 - schwache, 148
- Interbandübergang, 73
- intrinsisch, 76
- intrinsische Ladungsträgerdichte, 27
- Inversbetrieb, 165, 171
- Inversion, 187
 - schwache, 255, 280
 - starke, 182, 252, 253, 279
- Inversion-Mode-MOSFET, 303
- Inversionskanal, 177
- Ionenimplantation, 142
- Isolatoren, 20

- junction capacitance, 154
- Junctionless-MOSFET (JLT), 307

- k-Raum, 68
- Kanallängenmodulation, 189
- Kanalleitwert
 - klassisch, 286
 - ballistisch, 286
- Kathodenzerstäubung, 131
- klassische Umkehrpunkte, 56
- Kleinsignalersatzschaltbild
 - Bipolartransistor, 173
 - MOSFET, 198
- Kollektor, 165
- komplexes Frequenzspektrum, 42
- Kontinuitätsgleichung, 112
- Kristallgitter, 23
- kritischer Pfad, 228
- kubisch-flächenzentriertes Gitter, 23, 68
- Kurzkanaleffekte, 259
- Kurzschlussstrom, 207

- Landauer-Transmissionstheorie, 118
- Laser, 202
- Laserbedingungen, 202
- Lasermoden, 202
- Lawinendurchbruch, 31, 86
- Lawineneffekt, 86
- LDD: Lightly-Doped-Drain, 266
- Lebensdauer, 75
- Leckstrom, 262
- LED, 200
- Leerlaufspannung, 207
- Leitungsband, 20, 67
 - Unterkante, 79
- light holes, 73
- light-emitting diode, 200
- linearer Arbeitsbereich
 - Bipolartransistor, 165
 - MOSFET, 177
- Lithografie, 132
 - Elektronenstrahl-, 136
 - optische, 133
 - Röntgen-, 136
- Local-Oxidation-of-Silicon (LOCOS), 139, 267
- Löcher
 - leichte, 73
 - schwere, 73
- Logikpegel, 226
- lokale Zustandsdichte, 315
- Low-k-Materialien, 248
- LPCVD, 128
- lucky electron, 236
- Lumineszenzdiode, 200

- Majoritäten, 29
- Masse
 - effektive, 71
 - leichte Löcher, 73
 - longitudinale, 72
 - schwere Löcher, 73
 - transversale, 72
- Massenwirkungsgesetz, 30, 97
- Materiewellen, 43
- Matthiesen-Regel, 106
- Memory
 - DRAM, 232
 - Flash, 235

- non-volatile, 232, 236
- RAM, 231
- SRAM, 233, 327
- volatile, 232, 234
- Metalle, 20
- Metallisierung
 - Aluminium, 132
 - Kupfer, 132
- Meyer-Modell, 196
- Miller'sche Indizes, 23
- Miller-Kapazität, 246
- Minoritäten, 29
- Minoritätenkonzentration, 148
- mittlere freie Weglänge, 106
- mobility, 106
 - bulk low-field, 252
 - surface, 252
- Moore'sches Gesetz, 244
- MOS-Kapazität, 186
- MOSFET, 176, 177, 184
 - Akkumulationskanal, 187
 - Ausgangsleitwert, 194
 - back gate, 274
 - Bändermodell, 180
 - Bulk-, 177, 199, 243
 - Bulk-FinFET, 291
 - CMOS, 142, 223
 - Complementary, 298
 - depletion type, 184
 - DIBL: Drain-Induced-Barrier-Lowering, 261
 - Double-Gate (DG), 275
 - Drain, 177
 - enhancement type, 184
 - Flachbandspannung, 180, 182
 - Forksheet-, 298
 - Fully-Depleted (FDSOI), 274
 - Gate, 177
 - Gate-Voltage-Overdrive, 188
 - Gradual-Channel-Approximation, 188, 253
 - Hochfeldzone, 179
 - Impact-Ionization, 329
 - Inversion, 187
 - Inversion-Mode, 303
 - Inversionskanal, 177
 - Junctionless-, 307
 - Kanallängenmodulation, 189
 - Kanalleitwert: ballistisch, 286
 - Kanalleitwert: klassisch, 286
 - Kleinsignalersatzschaltbild, 198
 - linearer Arbeitsbereich, 177
 - Multiple-Gate, 275
 - Nanosheet-, 297
 - Negative-Capacitance (NC), 330
 - Oberflächenpotenzial, 182
 - Partially-Depleted (PDSOI), 273
 - quasistatisch, 195
 - reconfigurable, 318
 - Sättigungsbereich, 179
 - Sättigungsspannung, 179
 - Schottky-Barrier-, 312
 - schwache Inversion, 255
 - Schwellspannung, 180, 183, 192, 261
 - Schwellspannungsimplantation, 184
 - selbstleitend, 184
 - selbstsperrend, 184
 - Shichman-Hodges-Strommodell, 188
 - Silicon-On-Insulator (SOI), 270
 - Skalierung, 244
 - SOI-FinFET, 291
 - Source, 177
 - starke Inversion, 182
 - Steilheit, 192
 - Substrateffekt, 184
 - Substratfaktor, 183
 - Subthreshold-Bereich, 255
 - Subthreshold-Slope, 258
 - Subthreshold-Swing, 258
 - Transitzeit, 195
 - Transkonduktanz, 192
 - Tunnel-FET (TFET), 320
 - Ultra-Thin-Body (UTB), 270
 - Volumeninversion, 274
 - VT roll-off, 261, 295
 - Widerstandsbereich, 179
- Multi-Core-Prozessor, 231
- Multiple-Gate-MOSFET, 275

- Nanodraht, 53
- Nanosheet-MOSFET, 297
- nanowire, 53
- Nanowire-MOSFET, 290

- Negative-Capacitance-MOSFET (NC-MOSFET), 306, 330
- Negative-Capacitance-Tunnel-FET (NC-TFET), 306
- Oberflächenpotenzial, 182, 256
- Oberkante des Valenzbands, 79
- Orbital, 54
- Orbitalmodell, 54
- Oxidation
- bird's beak, 267
 - feuchte, 138
 - thermische, 138
 - trockene, 138
 - Vogelschnabel, 267
- parasitärer Teil, 175
- Partially-Depleted-SOI-MOSFET (PDSOI), 273
- Pauli-Prinzip, 66
- PECVD, 128
- Phasenschiebermaske, 135
- Phonon-Assisted-Tunneling, 113, 114, 116
- Phononen, 55
- Phosphorsilicatglas, 144
- pin-Fotodiode, 205
- Planartechnologie, 125
- Planck'sches Wirkungsquantum, 40
- pn-Diode, 81, 148
- pn-Übergang, 30, 148
- Poisson-Gleichung, 34
- Polysilicon-Depletion-Effect, 249
- Potenzialtopf, 46, 65
- Power-Delay-Produkt, 303
- Program-Gate, 319
- punch through, 260
- Quanten-Kaskaden-Laser, 202
- Quantenstrukturen, 52
- Quantenwirkungsgrad, 204
- quantum dot, 53
- quantum well, 46
- quantum wire, 53
- Quantum-Confinement, 50, 98, 159, 276
- Quasi-Fermi-Niveau, 84
- quasistatisch, 174, 195
- Raumladungszone, 32
- RDF – Random-Dopant-Fluctuation, 267, 282, 312
- Rechteckbarriere, 57
- Reconfigurable-FET (RFET), 318
- Reflexion, 56
- Reflexionskoeffizient, 56
- Reflow-Prozess, 144
- Rekombination, 73
- nichtstrahlende, 75
 - strahlende, 74, 200
- Rekombinationsrate, 73
- Replacement-Metal-Gate (RMG), 249
- Richardson-Konstante, 162, 267
- Rückwärtsbetrieb, 165, 171
- Sättigungsbereich
- Bipolartransistor, 165, 171
 - MOSFET, 179
- Sättigungsgeschwindigkeit, 108
- Sättigungsspannung, 179
- Sättigungsstrom
- der pn-Diode, 150
 - der Schottky-Diode, 162
- Schalenmodell, 54
- Schmalkanaleffekte, 267
- Schottky
- barrier lowering, 91, 316
 - Diode, 87, 161
 - Kontakt, 87
- Schottky-Barrier-MOSFET, 312, 318
- Schrödinger-Gleichung, 41, 45, 54
- schwache Injektion, 148
- Schwellspannung, 180, 183, 192, 261
- Schwellspannungsimplantation, 184
- Schwellstromdichte, 202
- selbstjustiert, 144, 246
- Shallow-Trench-Isolation (STI), 140, 224, 266, 268
- Shichman-Hodges-Strommodell, 188
- Shockley'sche Diodengleichung, 31, 150
- Shockley-Read-Hall-Rekombination, 75
- Silicon-On-Insulator (SOI), 270
- Silizid, 312

- Simulationstools
 - 2DFET, 332
 - Band Structure Lab, 69
 - BJT Lab, 171
 - Carrier Statistics Lab, 98
 - cNEGE, 288
 - cTFET, 328
 - MOSCap, 187
 - MOSFET Simulation, 192
 - NanoMOS, 272, 288
 - Periodic Potential Lab, 66
 - PN Junction Lab, 87, 156
 - Quantum Dot Lab, 55
 - RTD Simulation with NEGE, 160
- Skalierung, 296
- Smart-Cut-Prozess, 270
- Solarzelle, 205, 207
- Source, 177
- Spacer, 264
- Spaltfunktion, 42
- Speicher
 - dynamisches RAM (DRAM), 232
 - Flash, 235
 - flüchtig, 232, 234
 - nichtflüchtig, 232, 236
 - RAM, 231
 - statisches RAM (SRAM), 233, 327
- Sperrichtung, 86, 153
- Sperrschichtkapazität, 154
- Sperrstrom, 86
 - am pn-Übergang, 150
 - am Schottky-Übergang, 162
- Sperrwirkung, 30
- spezifische Leitfähigkeit, 107
- Sputter-Ätzen, 138
- Sputtern, 131
- Square-Root-Approximation, 255
- Standard-Buried-Collector-Prozess, 174
- Steep-Slope-Switches, 305, 320, 329
- Steilheit
 - Bipolartransistor, 173
 - MOSFET, 192
- Störabstand, 226
- Stoßionisation, 154, 329
- strained silicon, 248
- Strompfad, 291
- Stromverstärkung
 - in Basisschaltung, 169
 - in Emitterschaltung, 169
- Subbänder, 52, 98, 99, 278
- subbands, 52, 98, 99, 278
- Substrateffekt, 184
- Substratfaktor, 183
- Subthreshold-Bereich, 255
- Subthreshold-Slope, 258, 262, 313, 326
- Subthreshold-Swing, 258, 262, 313, 326
- Supply-Function, 120
- surface conduction, 308
- surface roughness scattering, 107, 253, 311
- surface states, 182
- switching energy, 303

- TAT, 113, 326
- thermische Emission, 161
- thermisches Gleichgewicht, 81
- Tiegelziehen nach Czochralski, 127
- Transition-Metal-Dichalcogenide (TMD), 25, 331
- Transitzeit
 - Bipolartransistor, 167
 - MOSFET, 195
 - pn-Übergang, 155
- Transkonduktanz
 - Bipolartransistor, 173
 - MOSFET, 192
- Transmission, 56
- Transmissionskoeffizient, 56
- Trap-Assisted-Tunneling, 113, 114, 326
- traps, 113, 326
- trench capacitor, 128, 138
- trianguläre WKB-Approximation, 59
- Tsu-Esaki-Formel, 121
- Tunnel-Feldeffekttransistor (TFET), 305, 320
- Tunneldiode
 - Esaki-, 157
 - resonante (RTD), 159
- Tunneling-Generation-Rate (TGR), 323
- Tunneln, Tunneleffekt, 52, 56
 - Band-zu-Band, 115, 320
 - direkt, 116
 - elastisch, 116
 - Fowler-Nordheim, 113, 114, 236

- indirekt, 116
- inelastisch, 116
- Landauer-Transmission, 118
- line tunneling, 324
- phonon-assisted, 113, 114, 116
- point tunneling, 324
- Potentialbarriere, 113
- Reconfigurable FET, 318
- Schottky-Barrier-FET, 315
- Source-Drain-, 286
- supply-function, 120
- trap-assisted, 113, 114, 326
- Tsu-Esaki-Formel, 121

Tunnelstrom, 163
Tunnelwahrscheinlichkeit, 56, 163
two-well process, 224

ultra-shallow source/drain, 262, 264
Ultra-Thin-Body (UTB), 270
unbound states, 66
ungebundene Zustände, 66
Unterkante des Leitungsbands, 79

Vakuum-Level, 79
Vakuumlevel, 76
Valenzband, 20

- Oberkante, 79

Van-der-Waals-Kraft, 25, 332
Veraschen, 138
Verbindungshalbleiter, 21

Verlustleistung

- dynamische, 231
- statische, 230

Vogelschnabel, 139
volume conduction, 308
Vorwärtsbetrieb, 171
VT roll-off, 261, 295

Wahrscheinlichkeitsdichte, 44
Wasserstoffatom, 54
Welle-Teilchen-Dualismus, 40
Wellenpaket, 41
Wentzel-Kramers-Brillouin-Approximation (WKB), 59, 164, 323
Widerstandsbereich, 179
Wirkungsgrad

- LED, 201
- Solarzelle, 207

WKB-Approximation, 59

- trianguläre, 59

Wordline, 232, 233
work function, 78, 79

Zener-Bereich, 31
Zener-Diode, 154
Zener-Effekt, 154
Zinkblendegitter, 23
Zonenziehverfahren, 127
Zustandsdichte, 78, 94

- lokal, 315

Zwischengitterplätze, 142