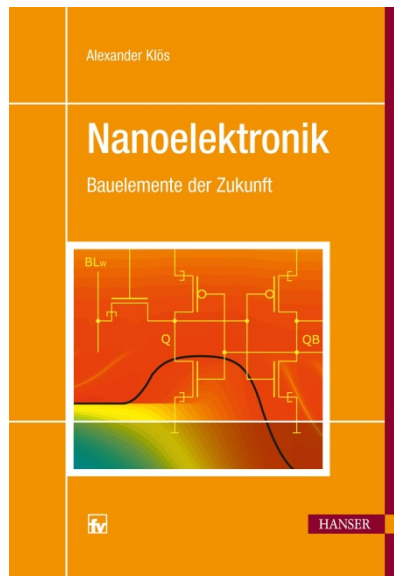


HANSER



Leseprobe

zu

Nanoelektronik Bauelemente der Zukunft

von Alexander Klös

Mit 151 Bildern, 5 Tabellen, 25 Aufgaben und Lösungen

ISBN (Buch): 978-3-446-45159-9

ISBN (E-Book): 978-3-446-45696-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45159-9>

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 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

Inhalt

1	Einführung in die Nanoelektronik	14
1.1	Bedeutung der Mikroelektronik	14
1.2	Chancen der Nanoelektronik	15
2	Eigenschaften von Halbleitern	17
2.1	Struktur von Halbleitern	17
2.1.1	Bandstruktur	17
2.1.2	Atomarer Aufbau von Silizium	20
2.1.3	Kristallgitter.....	21
2.2	Eigenleitung	23
2.3	Fremdleitung	24
2.3.1	n-dotiertes Silizium.....	25
2.3.2	p-dotiertes Silizium.....	25
2.3.3	Ladungsbilanz	26
2.4	pn-Übergang	27
2.4.1	Sperrwirkung der pn-Diode	27
2.4.2	Lösung der Poisson-Gleichung am pn-Übergang	30
2.5	Wiederholungsfragen	33
2.6	Übungen	34
2.7	Lösungen	34
3	Teilchen und Wellen	36
3.1	Dualismus von Welle und Teilchen	36
3.2	Die Schrödinger-Gleichung	38
3.2.1	Fourier-Transformation.....	39
3.2.2	Materiewellen	40
3.2.3	Eindimensionale, zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung	42
3.3	Der Potenzialtopf	43
3.4	Quantenstrukturen	50
3.5	Orbitale des Wasserstoffatoms.....	51
3.6	Transmission, Reflexion und Tunneleffekt	53

3.7	Wiederholungsfragen	56
3.8	Übungen	57
3.9	Lösungen	58
4	Bandstruktur und Bändermodell	60
4.1	Wellenfunktion und Bandstruktur im Kristall	60
4.2	Generation und Rekombination	63
4.2.1	Generationsprozesse	64
4.2.2	Rekombinationsprozesse	65
4.3	Bändermodell	66
4.3.1	Intrinsisches Silizium	67
4.3.2	Dotiertes Silizium	69
4.4	Metallurgische Übergänge	71
4.4.1	pn-Übergang	71
4.4.1.1	Thermisches Gleichgewicht	71
4.4.1.2	Flussrichtung	73
4.4.1.3	Sperrrichtung	76
4.4.2	Schottky-Übergang	76
4.4.2.1	Thermisches Gleichgewicht	77
4.4.2.2	Flussrichtung	80
4.4.2.3	Sperrrichtung	80
4.4.2.4	Effektive Barrierenhöhe	80
4.4.3	Heteroübergänge	82
4.4.4	Allgemeine Vorgehensweise zur Konstruktion eines Bändermodells ...	82
4.5	Fermi-Integral und Zustandsdichte	83
4.5.1	Dreidimensionales System	83
4.5.2	Zweidimensionales System	87
4.5.3	Eindimensionales System	87
4.6	Wiederholungsfragen	88
4.7	Übungen	88
4.8	Lösungen	89
5	Ladungstransport in Halbleitern	92
5.1	Driftstrom	92
5.2	Diffusionsstrom	98
5.3	Kontinuitätsgleichungen	99
5.4	Tunnelstrom	99
5.4.1	Single-Band-Tunneln	100

5.4.2	Band-zu-Band-Tunneln	100
5.5	Wiederholungsfragen	102
5.6	Übungen	103
5.7	Lösungen	103

6 Grundlagen der Halbleitertechnologie 105

6.1	Silizium-Planartechnologie	105
6.2	Herstellung einkristalliner Wafer	106
6.3	Chemische Depositionsverfahren	108
6.3.1	CVD-Prozesse	108
6.3.2	Epitaxie	110
6.4	Physikalische Depositionsverfahren	110
6.4.1	Aufdampfen	110
6.4.2	Sputtern	111
6.4.3	Materialien zur Metallisierung	112
6.4.3.1	Aluminium	112
6.4.3.2	Kupfer-Metallisierung	112
6.5	Lithografie	112
6.5.1	Fotolithografie	113
6.5.2	Elektronenstrahlolithografie	115
6.5.3	Röntgenlithografie	116
6.6	Ätzprozesse	116
6.6.1	Nasschemisches Ätzen	117
6.6.2	Trockenätzen	117
6.6.2.1	Plasmaätzen	117
6.6.2.2	Reaktives Ionenätzen	117
6.6.2.3	Sputter-Ätzen	118
6.7	Thermische Oxidation	118
6.8	Dotierung	120
6.8.1	Diffusion	121
6.8.2	Ionenimplantation	121
6.9	CMOS-Prozess	122
6.10	Wiederholungsfragen	125

7 Klassische Bauelemente der Mikroelektronik 127

7.1	Diodenstrukturen	127
7.1.1	pn-Diode	128
7.1.1.1	Schwache Injektion	128

7.1.1.2	Hohe Injektion	132
7.1.1.3	Sperrverhalten	133
7.1.1.4	Sperrschichtkapazität	134
7.1.1.5	Diffusionskapazität	135
7.1.1.6	Kleinsignalersatzschaltbild	136
7.1.2	Esaki-Tunnelodiode	137
7.1.3	Resonante Tunnelodiode	139
7.1.4	Schottky-Diode	141
7.1.4.1	Thermischer Emissionsstrom	141
7.1.4.2	Tunnelstrom	143
7.2	Bipolartransistor	145
7.2.1	Funktionsweise in eindimensionaler Näherung	147
7.2.2	Early-Effekt	149
7.2.3	Stromgleichungen und Kennlinien	150
7.2.4	Ebers-Moll-Modell	152
7.2.5	Kleinsignalersatzschaltbild	154
7.2.6	Strukturbezogenes Ersatzschaltbild im SBC-Prozess	155
7.3	MOS-Feldeffekttransistor	157
7.3.1	Prinzipielle Funktionsweise	158
7.3.2	Schwellspannung	161
7.3.2.1	Flachbandzustand	161
7.3.2.2	Starke Inversion	161
7.3.2.3	Schwellspannungsimplantation	164
7.3.2.4	Substrateffekt	164
7.3.2.5	Transistortypen	165
7.3.3	MOS-Kapazität	166
7.3.4	Vereinfachtes Strommodell	168
7.3.4.1	Gradual-Channel-Approximation	168
7.3.4.2	Kanallängenmodulation	170
7.3.4.3	Kennlinien	171
7.3.5	Kleinsignalverhalten	173
7.3.5.1	Kleinsignalleitwerte	173
7.3.5.2	Kapazitive Effekte	175
7.3.5.3	Meyer-Modell	177
7.3.5.4	Kleinsignalersatzschaltbild	180
7.3.6	Grenzen Bulk-MOSFET	181
7.4	Optoelektronische Bauelemente	181
7.4.1	Strahlungsbaulemente	181

7.4.1.1	Lumineszenzdiode	181
7.4.1.2	Halbleiterlaser	183
7.4.2	Absorptionsbauelemente	184
7.4.2.1	Fotodiode	185
7.4.2.2	Solarzelle	188
7.5	Wiederholungsfragen	189
7.6	Übungen	191
7.7	Lösungen	196

8 Digitale CMOS-Schaltungstechnik 205

8.1	Logikgatter	205
8.1.1	Inverter	206
8.1.2	NAND und NOR	212
8.2	Leistungsaufnahme	212
8.3	Speicherbausteine	213
8.3.1	DRAM	214
8.3.2	6T-SRAM-Zelle	215
8.3.3	Flash-Speicher	217
8.4	Wiederholungsfragen	222
8.5	Übungen	223
8.6	Lösungen	224

9 Nanostruktur-Feldeffekttransistoren 225

9.1	Skalierung der CMOS-Technologie	226
9.1.1	Moore'sches Gesetz	226
9.1.2	Selbstjustiertes Polysilizium-Gate	228
9.1.3	Kupferverdrahtung und Low-k-Dielektrikum	229
9.1.4	Verspanntes Silizium	229
9.1.5	High-k-Metal-Gate-Technologie	230
9.1.6	Multi-Gate-Transistoren	231
9.2	Kleingeometrie-Bulk-MOSFET	232
9.2.1	Bändermodell Source-Kanal-Drain	232
9.2.2	Ableitung verbesserter Stromgleichungen	234
9.2.2.1	Starke Inversion	234
9.2.2.2	Schwache Inversion	237
9.2.3	Kurzkanaleffekte	241
9.2.3.1	Schwellspannungsverschiebung	242
9.2.3.2	Leckstrom	243

9.2.3.3	Verschlechterung des Subthreshold-Swing	243
9.2.3.4	Bahnwiderstände	246
9.2.3.5	LDD-Strukturen	248
9.2.3.6	Ladungsträgerinjektion.....	248
9.2.3.7	Weitere Kurzkanaleffekte	249
9.2.4	Schmalkanaleffekte	250
9.2.4.1	Standard-LOCOS-Isolation	250
9.2.4.2	Trench-Isolation	252
9.3	UTB-Technologie	252
9.3.1	SOI-Substrat	252
9.3.2	UTB-MOSFETs	254
9.3.2.1	Partially Depleted SOI	256
9.3.2.2	Fully Depleted SOI	256
9.4	Multiple-Gate-MOSFET	257
9.4.1	Double-Gate-MOSFET	257
9.4.1.1	Bändermodell.....	257
9.4.1.2	Stromgleichung.....	261
9.4.1.3	Diskrete Dotierstoffverteilung	264
9.4.1.4	Ultra-Kurzkanal-FET.....	266
9.4.2	Dreidimensionale Effekte in Multiple-Gate-MOSFETs	271
9.4.2.1	Bauelementstrukturen.....	271
9.4.2.2	Strompfad	273
9.4.2.3	Skalierung im Schaltungsdesign	278
9.5	Wiederholungsfragen	279
9.6	Übungen	280
9.7	Lösungen	281

10 Alternative Nanostruktur-MOSFETs..... **282**

10.1	Ziele für alternative Transistorstrukturen	282
10.2	High-Mobility-Channel-FET	285
10.3	Junctionless-MOSFET.....	286
10.3.1	Funktionsweise	286
10.3.2	Kennlinie	289
10.3.3	Vorteile	290
10.3.4	Nachteile	290
10.4	Schottky-Barrier-MOSFET.....	291
10.4.1	Funktionsweise	291
10.4.2	Kennlinie	294

10.4.3 Vorteile	295
10.4.4 Nachteile	296
10.5 Tunnel-FET	296
10.5.1 Funktionsweise	297
10.5.2 Optimierung der Kennlinie	299
10.5.2.1 Einschaltstrom	299
10.5.2.2 Ambipolarer Strom	302
10.5.2.3 Subthreshold-Swing	302
10.5.3 Vorteile	304
10.5.4 Nachteile	304
10.6 Weitere Steep-Slope-Switches	305
10.6.1 Impact-Ionization-FET	305
10.6.2 Negative-Capacitance-MOSFET	306
10.7 Wiederholungsfragen	307
Konstanten und Materialparameter	308
Formelzeichen	309
Literatur	315
Index	317

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

Der Lernende ...

- kann Metalle – Halbleiter – Isolatoren anhand ihrer Bandstruktur unterscheiden,
- kennt die Ursachen elektrischer Leitfähigkeit in Halbleitern,
- kennt die Ursache der Sperrwirkung einer Diode,
- versteht 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.

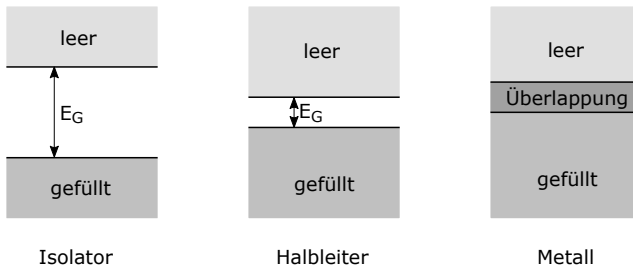


Bild 2.1 Schematische Darstellung der Bandstruktur von Isolatoren, Halbleitern und Metallen

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 $E_G = 1.12 \text{ eV}$ 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 $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

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. Aber 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 $2.4 \text{ eV} \dots 3.3 \text{ eV}$ auf und eignet sich daher insbesondere für die Realisierung von Hochtemperaturelektronik, welche Betriebstemperaturen von mehreren hundert Grad Celsius erlaubt.

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

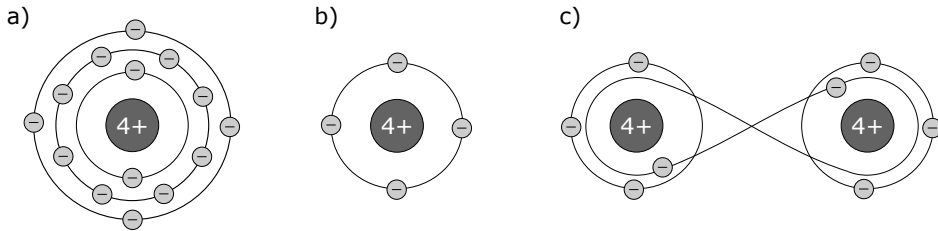


Bild 2.3 Atommodell nach Bohr für Silizium: a) vollständig mit allen Schalen, b) vereinfachte Darstellung, nur die äußere Schale der Valenzelektronen ist dargestellt, c) vereinfachte Darstellung der Elektronenpaarbindung zweier benachbarter Siliziumatome (Austausch eines Valenzelektrons)

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.

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.

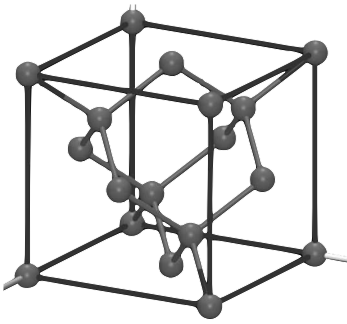


Bild 2.4 Elementarzelle eines Silizium-Kristalls (Diamantgitter)

2.1.3 Kristallgitter

In Halbleitern wird die Energie zum Aufbau der Kristallgitter durch die Bindungsenergie der Valenzelektronen aufgebracht. Silizium kristallisiert 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 $a_0 = 0.543$ nm, wobei eine Zelle acht Siliziumatome enthält. Das Kristallgitter besteht aus zwei kubisch-flächenzentrierten Gittern, wobei das zweite um $1/4$ der Würfelkanten in der Diagonalrichtung gegenüber dem ersten Gitter verschoben ist.

Galliumarsenid kristallisiert 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:

- Die Achsenabschnitte der Ebene betragen:
 x -Achse: 1, y -Achse: 2, z -Achse: 3

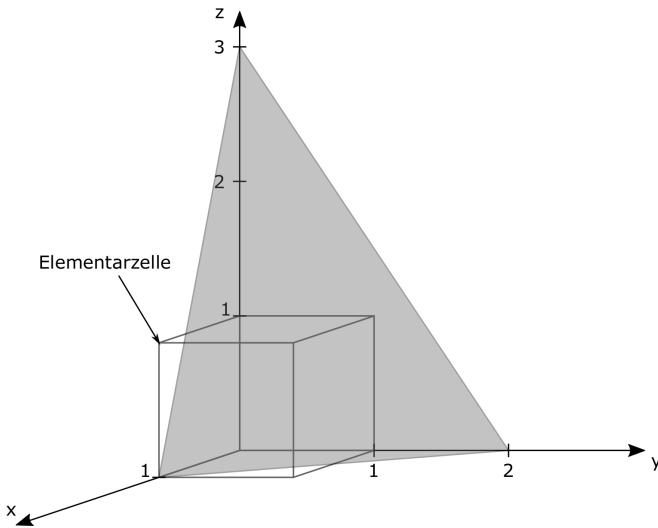


Bild 2.5 Beispiel einer Kristallebene mit Darstellung der Elementarzelle im Koordinatensystem

- Wir bilden den Kehrwert und erhalten:

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

- 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.

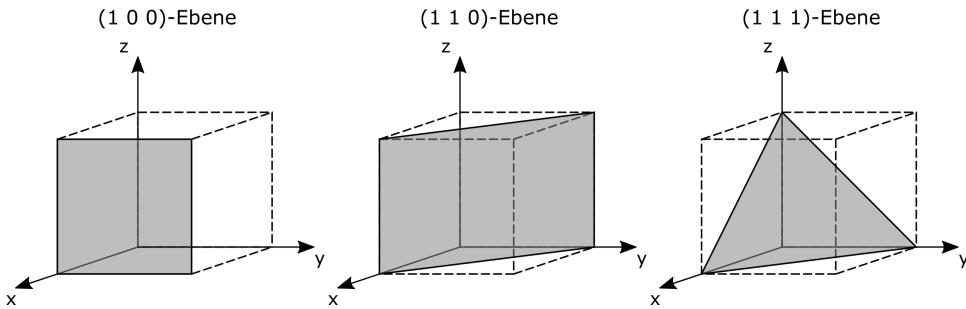


Bild 2.6 Darstellung verschiedener Kristallebenen



Verwenden Sie zur Darstellung der Kristallgitter unterschiedlicher Halbleiter das *Crystal Viewer Tool* auf nanohub.org/tools/crystal_viewer.

■ 2.2 Eigenleitung

Für die folgende Betrachtung reicht eine vereinfachte schematische Darstellung des Silizium-Kristallgitters in einer Ebene, wie in Bild 2.7a gezeigt, aus. Die Punkte symbolisieren Elektronenpaarbindungen, bestehen aus je einem Elektron der benachbarten Atome. Alle dargestellten Elektronen befinden sich im Valenzband, daher stehen keine freien Ladungsträger im Leitungsband für einen Stromfluss zur Verfügung. Diese Darstellung zeigt den Zustand bei einer Temperatur $T = 0$ K. Der Halbleiter wirkt als Isolator.

Wird die Temperatur erhöht, dann gerät das Kristallgitter zunehmend in Schwingungen. Diese Gitterschwingungen führen dazu, dass vereinzelt Elektronenpaarbindungen aufgebrochen werden. Damit kann ein Elektron sein Wirtatom verlassen und sich frei im Kristall bewegen. Hierzu muss allerdings mindestens eine Energie in Höhe der Bandlücke zwischen Leitungs- und Valenzband dem Elektron zugeführt werden, damit es das Leitungsband erreichen kann.

Das Abwandern des freien Elektrons mit einer negativen Elementarladung $-q$ hat ein Siliziumatom ionisiert; eine Elektronenpaarbindung ist unvollständig (vgl. Bild 2.7b). Es ist ein sogenanntes *Loch* (oder auch *Defektelektron*) entstanden. Das Loch kann auch wandern, indem es von einem Elektron einer benachbarten Doppelbindung „aufgefüllt“ wird. Eine Wanderung des Lochs in eine Richtung ist also immer verbunden mit der Wanderung eines Elektrons in der entgegengesetzten Richtung.

Aufgrund der nun lokal nicht mehr gegebenen Ladungsneutralität besitzt das Loch eine positive Ladung $+q$. Mithilfe der Quantenmechanik kann das Loch auch als Teilchen mit einer eigenen Masse (ungleich der Elektronenmasse) und einer Ladung $+q$ aufgefasst werden, welches sich frei im Kristall bewegen kann. Seine Energie entspricht der des Valenzbandes. Diese Tatsache erlaubt in vielen Fällen eine Beschreibung seines Verhaltens mit den Grundsätzen der klassischen Physik und der Elektrostatik.

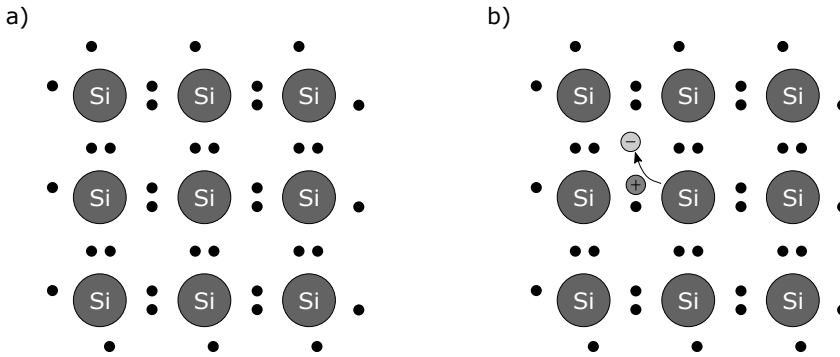


Bild 2.7 a) Schematische Darstellung des Silizium-Kristallgitters in der Ebene bei $T = 0$ K. b) Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares bei Eigenleitung



Mit der Erhöhung der Temperatur werden vermehrt Elektron-Loch-Paare im Halbleiter erzeugt. Die Konzentration n der Elektronen im Leitungsband und die Konzentration p der Löcher im Valenzband sind gleich der *intrinsischen Ladungsträgerdichte* oder *Eigenleitungsdichte* n_i . Diese Ladungsträger können sich frei im Kristall bewegen. Wirkt ein elektrisches Feld auf den Halbleiter ein, so bewegen sich Elektronen entgegen den Feldlinien, Löcher dagegen aufgrund ihrer positiven Ladung in Richtung der Feldlinien. Es fließt ein Strom, zu dem Elektronen und Löcher beitragen. Diese Eigenschaft wird *Eigenleitung* genannt.

In Silizium beträgt bei einer Temperatur von $T = 300$ K die intrinsische Ladungsträgerkonzentration ca. $n = p = n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Sie steigt mit einer Zunahme der Temperatur T und Verkleinerung der Bandlücke E_G exponentiell an.

■ 2.3 Fremdleitung

In der Technologie wird die Leitfähigkeit eines Halbleiters gezielt erhöht. Hierzu werden Fremdatome in das Kristallgitter eingebaut. Dieses Verfahren nennt man *Dotieren* des Halbleiters. Das Ziel ist dabei nicht nur, eine gewünschte und im Betriebsbereich des Schaltkreises weitgehend konstante Leitfähigkeit einzustellen. Vielmehr entsteht durch das Zusammenspiel eines Stromtransports durch Löcher oder Elektronen erst die aktive Funktion des Bauelements.

Als Dotierstoffe kommen bei Silizium Elemente der III. (Bor) oder V. Hauptgruppe (Phosphor, Arsen) zur Anwendung (siehe Bild 2.2).

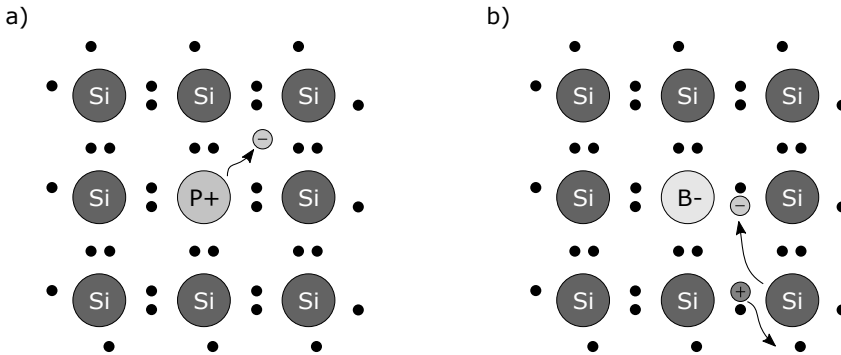


Bild 2.8 Schematische Darstellung eines mit Fremdatomen dotierten Silizium-Kristallgitters in der Ebene. a) Erzeugung eines freien Elektrons durch Dotierung mit einem Phosphor-Atom, b) Erzeugung eines freien Lochs durch Dotierung mit einem Bor-Atom

2.3.1 n-dotiertes Silizium

Elemente der V. Hauptgruppe besitzen nur fünf Valenzelektronen. Wird beispielsweise ein Phosphor-Atom in das Kristallgitter eingebaut, so benötigt es nur vier seiner Valenzelektronen, um mit vier benachbarten Siliziumatomen eine vollständige Bindung einzugehen. Bild 2.8a illustriert dies in einer schematische Darstellung in der Ebene. Das fünfte Valenzelektron ist quasi „überflüssig“. Es ist nur gering an sein Wirtsatom gebunden und kann dieses schon bei Zuführung geringer thermischer Energie verlassen. Es erreicht dann das Leitungsband und kann sich frei im Kristall bewegen und zur Leitfähigkeit beitragen. Im Unterschied zur Eigenleitung ist hierbei kein zusätzliches Loch entstanden.



Dotierstoffatome der V. Hauptgruppe in der Konzentration N_D werden durch die Abgabe ihres fünften Valenzelektrons positiv ionisiert. Sie werden als *Donatoren* (aus dem Lateinischen: *donator* – Geber, Spender) bezeichnet. Sie sind fest in das Kristallgitter eingebaut und können daher beim Anlegen eines elektrischen Feldes nicht zum Stromfluss beitragen. Die ins Leitungsband abgegebenen freien Elektronen können sich dagegen frei bewegen und zum Stromfluss beitragen. Diese Eigenschaft nennen wir *Fremdleitung* in einem *n-dotierten Halbleiter*. Man nennt ihn *n-leitend*.

2.3.2 p-dotiertes Silizium

Ein Element der III. Hauptgruppe besitzt nur drei Valenzelektronen. Typischerweise wird bei Silizium Bor verwendet. Bild 2.8b zeigt schematisch den Einbau eines Bor-Atoms in einen Siliziumkristall. Für eine vollständige Bindung mit vier benachbarten Siliziumatomen werden vier Valenzelektronen benötigt, es stehen im Bor-Atom jedoch nur drei zur Verfügung. Schon bei Zuführung geringer thermischer Energie löst sich ein Elektron aus einer benachbarten Doppelbindung und vervollständigt die Einbindung des Dotierstoffatoms in den Kristall.

Index

- V_T roll-off, 242, 277
- k -Raum, 83
- Ätzmaske, 116
- Ätzprozess
 - anisotrop, 116
 - isotrop, 116
 - nasschemisch, 117
 - Plasma-, 117
 - reaktiver Ionen- (RIE), 117
 - Sputtern, 118
 - trocken, 117
- äußerer Transistor, 155

- Absorption, 52
- Absorptionskoeffizient, 184
- Akkumulation, 287
- Akkumulationskanal, 167
- aktiv-normaler Betrieb, 147
- Aktivgebiete, 124
- Akzeptoren, 26, 69
- ambipolarer Betrieb, 294, 298, 302
- ASIC, 106
- Atommodell nach Bohr, 20, 47, 51
- Aufdampfen, 110
- Auger-Prozesse, 66
- Ausgangsleitwert
 - Bipolartransistor, 154
 - MOSFET, 175
- Austrittsarbeit, 68

- Bändermodell, 60, 66
 - Bipolartransistor, 147
 - Diode in Flussrichtung, 129
 - Diode in Sperrrichtung, 133
 - Double-Gate-MOSFET, 257
 - Esaki-Tunnelndiode, 137
 - Flash-Speicherzelle, 219
 - Heteroübergang, 82
 - JLT, 286, 291
 - MOSFET, 161, 232
- pin-Fotodiode, 187
- pn-Übergang, 72, 74
- Resonante Tunnelndiode (RTD), 139
- Schottky-Übergang, 77
- Schottky-Diode, 141
- TFET, 299
- Tunnelprozesse, 101
- back gate, 256
- Bahnwiderstand, 246
- Bahnzonen, 29
- ballistischer Transport, 97, 250, 266
- Bandübergang
 - direkt, 64
 - indirekt, 64
- Bandlücke, 61
- Bandstruktur, 17
- Barrierenhöhe
 - effektive, 80
 - intrinsische, 80
- Basis, 145
- Belichtung
 - Kontakt-, 113
 - Projektions-, 113
 - Proximity-, 113
 - Step-and-Repeat-, 113
- Besetzungsinversion, 183
- Beweglichkeit, 93, 234
- Bipolartransistor, 145
 - Ausgangsleitwert, 154
 - Transkonduktanz, 154
- bird's beak, 119
- Bitline, 214, 215
- Bohr'sches Atommodell, 20, 47, 51
- Boltzmann-Konstante, 28, 67
- Boltzmann-Näherung, 86
- Boltzmann-Verteilung, 68
- bound states, 61
- built-in voltage, 238
- Bulk, 158
- Bulk-Current-Mode, 287

- Bulk-MOSFET, 181, 225
- Buried-Layer, 157
- Buried-Oxide, 252

- Cache, Prozessor-Cache-Speicher, 216
- Channel-Stop-Implantation, 250
- Chemical-Vapor-Deposition (CVD), 108
- CMOS
 - Aktivgebiete, 124
 - Inverter, 206
 - Leistungsaufnahme, 212, 282
 - NAND, 212
 - NOR, 212
 - selbstjustiert, 124, 228
 - Technologie, 122, 158, 205
- CMP: chemical mechanical polishing, 107, 254
- Complementary MOS, 122, 205
- Control-Gate, 217
- Crystal Viewer Tool, 23
- current crowding, 246
- CV-Messung, 166
- CVD, 108
 - Low-Pressure, 108
 - Plasma-Enhanced, 108

- De-Broglie-Welle, 37
- density of states, 83
- depletion region, 29, 167, 287
- depletion type, 165
- Depletion-Mode, 287
- Diamantgitter, 21
- DIBL: Drain-Induced-Barrier-Lowering, 242
- Diffusion, 121
 - erschöpfliche Quelle, 121
 - unerschöpfliche Quelle, 121
- Diffusionskapazität, 135
- Diffusionskonstante, 98
- Diffusionslänge, 128
- Diffusionsmaske, 121
- Diffusionsspannung, 132
- Diffusionsstrom, 98
- Donatoren, 25, 69
- Dotierung, 69, 120, 264
- Double-Gate (DG) MOSFET, 257
- Drain, 158
- Dreieckbarriere, 54

- Driftgeschwindigkeit, 93
- Driftsättigungsgeschwindigkeit, 95, 236
- Driftstrom, 92
- Driftzone, 232
- Dualismus, 37
- Dunkelstrom, 186
- Durchbruchfeldstärke, 133

- Early-Effekt, 149, 154
- Early-Spannung, 149
- Ebers-Moll-Modell, 152
- effective mass approximation, 62
- effektive Masse, 62, 63
- effektive Zustandsdichte, 85
- Eigenenergie, 42, 45
- Eigenleitung, 24
- Einstein-Beziehung, 98
- Elektronenaffinität, 66
- Elementarzelle, 21
- Elementhalbleiter, 19
- Emission, 52
 - induzierte, 183
 - spontane, 183
 - stimulierte, 183
 - thermische, 292
- Emitter, 145
- Energiebänder, 61
- Energiebandschema, 60
- energy gap, 62
- enhancement type, 165
- entarteter Halbleiter, 71
- Epitaxie, 82, 110
- Exponentialansatz, 43
- Extreme-UV (EUV), 116

- Füllfaktor, 188
- Fallenzustände, 100, 302
- Fermi-Dirac-Integral, 86
- Fermi-Dirac-Statistik, 67
- Fermi-Level-Pinning, 296
- Fermi-Niveau, 67
- Fermi-Verteilung, 67
- FinFET, 271
 - Bulk, 273
 - SOI, 273
- Flachbandspannung, 161
- Flachbandzustand, 161, 287

- Floating-Gate, 217
- Flussrichtung, 73
- Fotodiode, 185
- fotoelektrischer Effekt, 52
- Fotoelement, 186
- Fotoleiter, 185
- Fotostrom, 185, 186
- Fototransistor, 186
- Fourier-Integral, 39
- Fourier-Transformation, 38
- Fremdleitung, 25, 26
- Fully-Depleted-SOI-MOSFET (FDSOI), 256
- funktioneeller Teil, 155

- GAA-FET (Gate-All-Around-FET), 271
- Gamma-Funktion, 86
- Gate, 158
- Gate-Underlap, 295, 302
- Gate-Voltage-Overdrive, 169
- gebundene Zustände, 61
- Generation, 63
- Generationsrate, 63, 185
- Gitterkonstante, 21, 60
- Gradual-Channel-Approximation, 169, 236
- Gruppengeschwindigkeit, 38
- Gummel-Poon-Modell, 153

- Halbleiter, 18
 - degeneriert, 71, 184
 - direkt, 64
 - indirekt, 64
- Halbleiterlaser, 183
- heavy holes, 63
- Heisenberg'sche Unschärferelation, 41
- Heteroepitaxie, 110
- Heterostrukturen, 50, 82, 110, 139, 184, 300
- High-k-Materialien, 231, 241, 242, 285, 299
- High-Mobility-Channel-FET, 285
- Hochfeldzone, 160
- Hot-Carriers, 221, 248

- I-MOS, 284, 305
- IFET, 284, 305
- Image-Charge-Effect, 80
- Immersionolithografie, 115
- Impact Ionization, 133
- Impact-Ionization-FET, 284, 305

- Implantation, 121
- Implantationsdosis, 122
- Injektion
 - hohe, 132
 - schwache, 128
- innerer Transistor, 155
- Interbandübergang, 63
- intrinsisch, 67
- intrinsische Ladungsträgerdichte, 24
- Inversbetrieb, 147, 152
- Inversion, 168
 - schwache, 237, 262
 - starke, 163, 234, 262
- Inversion-Mode-MOSFET, 282
- Inversionskanal, 160
- Ionenimplantation, 121
- Isolatoren, 18

- junction capacitance, 135
- Junctionless-MOSFET (JLT), 286

- Kanallängenmodulation, 170
- Kanalleitwert
 - klassisch, 268
 - ballistisch, 268
- Kathodenzerstäubung, 111
- Kleinsignalersatzschaltbild
 - Bipolartransistor, 154
 - MOSFET, 180
- Kollektor, 145
- komplexes Frequenzspektrum, 39
- Kontinuitätsgleichung, 99
- Kristallgitter, 21
- kritischer Pfad, 210
- Kurzkanaleffekte, 241
- Kurzschlussstrom, 188

- Laser, 183
- Laserbedingungen, 183
- Lasermoden, 183
- Lawinendurchbruch, 28, 76
- Lawineneffekt, 76
- LDD: Lightly-Doped-Drain, 248
- Lebensdauer, 65
- Leckstrom, 243
- LED, 181
- Leerlaufspannung, 188

- Leitungsband, 62
- light holes, 63
- light-emitting diode, 181
- Linearer Arbeitsbereich
 - MOSFET, 158
- linearer Arbeitsbereich
 - Bipolartransistor, 147
- Lithografie, 112
 - Elektronenstrahl-, 116
 - optische, 113
 - Röntgen-, 116
- Local-Oxidation-of-Silicon (LOCOS), 119, 250
- Logikpegel, 208
- Low-k-Materialien, 229
- LPCVD, 108
- lucky electron, 218
- Lumineszenzdiode, 181

- Majoritäten, 26
- Massenwirkungsgesetz, 27, 86
- Materiewellen, 40
- Matthiesen-Regel, 93
- Memory
 - DRAM, 214
 - Flash, 217
 - non-volatile, 214, 218
 - RAM, 213
 - SRAM, 215, 304
 - volatile, 214, 216
- Metalle, 18
- Metallisierung
 - Aluminium, 112
 - Kupfer, 112
- Meyer-Modell, 177
- Miller'sche Indizes, 21
- Miller-Kapazität, 228
- Minoritäten, 26
- Minoritätenkonzentration, 128
- mittlere freie Weglänge, 93
- mobility, 93
 - bulk low-field, 234
 - surface, 234
- Moore'sches Gesetz, 226
- MOS-Kapazität, 166
- MOSFET, 157, 158, 165
 - V_T roll-off, 277
 - Ausgangsleitwert, 175
 - back gate, 256
 - Bulk-, 181, 225
 - Bulk-FinFET, 273
 - CMOS, 122, 205
 - DIBL: Drain-Induced-Barrier-Lowering, 242
 - Double-Gate (DG), 257
 - Fully-Depleted (FDSOI), 256
 - Gradual-Channel-Approximation, 169, 236
 - Impact-Ionization, 305
 - Inversion-Mode, 282
 - Junctionless-, 286
 - Kanalleitwert: ballistisch, 268
 - Kanalleitwert: klassisch, 268
 - Multiple-Gate, 257
 - Negative-Capacitance (NC), 306
 - Partially-Depleted (PDSOI), 256
 - Schottky-Barrier-, 291
 - schwache Inversion, 237
 - selbstleitend, 165
 - selbstsperrend, 165
 - Silicon-On-Insulator (SOI), 252
 - Skalierung, 226
 - SOI-FinFET, 273
 - Steilheit, 173
 - Subthreshold-Bereich, 237
 - Subthreshold-Slope, 240
 - Subthreshold-Swing, 240
 - Transkonduktanz, 173
 - Tunnel-FET (TFET), 296
 - Ultra-Thin-Body (UTB), 252
 - Volumeninversion, 256
- Multi-Core-Prozessor, 213
- Multiple-Gate-MOSFET, 257

- Nanodraht, 51
- nanowire, 51
- Nanowire-MOSFET, 272
- Negative-Capacitance-MOSFET (NC-MOSFET), 285, 306
- Negative-Capacitance-Tunnel-FET (NC-TFET), 285
- neutrale Basiszone, 147

- Oberflächenpotenzial, 163, 237
- Orbital, 52
- Oxidation

- bird’s beak, 250
- feuchte, 118
- thermische, 118
- trockene, 118
- Vogelschnabel, 250

- parasitärer Teil, 155
- Partially-Depleted-SOI-MOSFET (PDSOI), 256
- Pauli-Prinzip, 61
- PECVD, 108
- Phasenschiebermaske, 115
- Phononen, 52
- Phosphorsilicatglas, 124
- pin-Fotodiode, 187
- Planartechnologie, 105
- Planck’sches Wirkungsquantum, 37
- pn-Übergang, 27, 128
- pn-Diode, 71, 128
- Poisson-Gleichung, 31
- Polysilicon-Depletion-Effect, 231
- Potenzialtopf, 43, 60
- Power-Delay-Produkt, 282
- punch through, 241

- Quanten-Kaskaden-Laser, 184
- Quantenstrukturen, 50
- Quantenwirkungsgrad, 186
- quantum well, 43
- quantum wire, 51
- Quantum-Confinement, 47, 87, 139, 258
- Quasi-Fermi-Niveau, 75
- quasistatisch, 155, 176

- Rückwärtsbetrieb, 147, 152
- Raumladungszone, 29
- RDF – Random-Dopant-Fluctuation, 249, 266, 291
- Rechteckbarriere, 54
- Reflexion, 53
- Reflexionskoeffizient, 53
- Reflow-Prozess, 125
- Rekombination, 63
 - nichtstrahlende , 66
 - strahlende, 65, 181
- Rekombinationsrate, 63
- Replacement-Metal-Gate (RMG), 231

- Richardson-Konstante, 142, 249

- Sättigungsbereich
 - Bipolartransistor, 147, 151
 - MOSFET, 160
- Sättigungsgeschwindigkeit, 95
- Sättigungsspannung, 160
- Sättigungsstrom
 - der pn-Diode, 130
 - der Schottky-Diode, 143
- Schalenmodell, 51
- Schmalkanaleffekte, 250
- Schottky
 - barrier lowering, 80, 294
 - Diode, 76, 141
 - Kontakt, 76
- Schottky-Barrier-MOSFET (SB-MOSFET), 291
- Schrödinger-Gleichung, 38, 42, 52
- schwache Injektion, 128
- Schwellspannung, 161, 164
- Schwellspannungsimplantation, 164
- Schwellstromdichte, 184
- selbstjustiert, 124, 228
- Shallow-Trench-Isolation (STI), 119, 206, 249, 252
- Shichman-Hodges-Strommodell, 168
- Shockley’sche Diodengleichung, 28, 130
- Shockley-Read-Hall-Rekombination, 66
- Silicon-On-Insulator (SOI), 252
- Silizid, 291
- Simulationstools
 - Band Structure Lab, 63
 - BJT Lab, 152
 - Carrier Statistics Lab, 87
 - MOSCap, 168
 - MOSFET Simulation, 173
 - NanoMOS, 256, 271
 - Periodic Potential Lab, 61
 - PN Junction Lab, 76, 137
 - Quantum Dot Lab, 52
 - Resonant Tunneling Diode Simulation with NEGF, 141
- Skalierung, 278
- Smart-Cut-Prozess, 254
- Solarzelle, 186, 188
- Source, 158

- Spacer, 246, 247
- Spaltfunktion, 39
- Speicher
 - dynamisches RAM (DRAM), 214
 - flüchtig, 214, 216
 - Flash, 217
 - nichtflüchtig, 214, 218
 - RAM, 213
 - statisches RAM (SRAM), 215, 304
- Sperrrichtung, 76, 133
- Sperrschichtkapazität, 135
- Sperrstrom, 76
 - am pn-Übergang, 130
 - am Schottky-Übergang, 143
- Sperrwirkung, 28
- spezifische Leitfähigkeit, 94
- Sputter-Ätzen, 118
- Sputtern, 111
- Square-Root-Approximation, 236
- Störabstand, 208
- Standard-Buried-Collector-Prozess (SBC), 155
- Steep-Slope-Switches, 284, 296, 305
- Steilheit, 154
 - MOSFET, 173
- Stoßionisation, 133, 305
- strained silicon, 229
- Strompfad, 273
- Stromverstärkung
 - in Basisschaltung, 150
 - in Emitterschaltung, 150
- Subbänder, 50, 87, 88, 260
- subbands, 50, 87, 88, 260
- Substrateffekt, 164, 165
- Substratfaktor, 164
- Subthreshold-Bereich, 237
- Subthreshold-Slope, 240, 243, 292, 302
- Subthreshold-Swing, 240, 243, 292, 302
- surface conduction, 287
- surface roughness scattering, 94, 236, 290
- surface states, 161
- switching energy, 282

- TAT, 100, 302
- thermische Emission, 141
- thermisches Gleichgewicht, 71
- Tiegelziehen nach Czochralski, 107

- Transitzeit, 135, 148, 177
- Transkonduktanz
 - Bipolartransistor, 154
 - MOSFET, 173
- Transmission, 53
- Transmissionskoeffizient, 53
- Trap-Assisted-Tunneling, 100, 302
- traps, 100, 302
- trench capacitor, 108, 117
- Tunnel-Feldeffekttransistor (TFET), 284, 296
- Tunneldiode
 - Esaki-, 137
 - resonante (RTD), 139
- Tunneleffekt, 49, 53
- Tunneling-Generation-Rate (TGR), 299
- Tunneln
 - Band-zu-Band, 100, 296
 - direkt, 100
 - elastisches, 100
 - Fowler-Nordheim, 100, 218
 - inelastisches, 100
 - line tunneling, 300
 - point tunneling, 300
 - Single-Band, 100
 - Source-Drain-, 268
 - trap-assisted, 100, 302
- Tunnelstrom, 143
- Tunnelwahrscheinlichkeit, 53, 143
- two-well process, 206

- ultra-shallow source/drain, 242, 246
- Ultra-Thin-Body (UTB), 252
- unbound states, 61
- ungebundene Zustände, 61

- Vakuumlevel, 66
- Veraschen, 117
- Verbindungshalbleiter, 19
- Verlustleistung
 - dynamische, 213
 - statische, 212
- Vogelschnabel, 119
- volume conduction, 287
- Vorwärtsbetrieb, 151, 152

- Wasserstoffatom, 51
- Welle-Teilchen-Dualismus, 37
- Wellenpaket, 38

- Wentzel-Kramers-Brillouin-Approximation
(WKB), 56, 145, 299
- Widerstandsbereich, 160
- Wirkungsgrad
 - LED, 182
 - Solarzelle, 188
- Wordline, 214, 215
- work function, 68
- Zener-Bereich, 28
- Zener-Diode, 133
- Zener-Effekt, 133
- Zinkblendegitter, 21
- Zonenziehverfahren, 107
- Zustandsdichte, 69, 83
- Zwischengitterplätze, 122