

Inhaltsübersicht

1	Halbleiterkristalle	1
1.1	Materialien	1
1.2	Kristallstruktur	2
1.3	Kubische Gitter	4
1.4	Kristallrichtungen und Kristallebenen	5
1.5	Diamant- und Zinkblendestruktur	7
1.6	Energiebänder	10
1.7	Mischungshalbleiter	12
2	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen	19
2.1	Maxwellsche Gleichungen	19
2.2	Wellengleichung	22
2.3	Energiefluß in elektromagnetischen Feldern	24
2.4	Ebene Wellen	26
2.5	Randbedingungen	30
2.6	Reflexion bei senkrechtem Einfall	32
2.7	Schräger Einfall: TE-Wellen	34
2.8	Totalreflexion: TE-Wellen	36
2.9	Schräger Einfall: TM-Wellen	39
2.10	Totalreflexion: TM-Wellen	41
2.11	Absorption in AlGaAs und InGaAsP	42
2.12	Brechungsindex in AlGaAs und InGaAsP	45
3	Planare Filmwellenleiter	49
3.1	Wellenleiterstruktur	49
3.2	Diskrete Natur geführter Wellen	50
3.3	Ausbreitungskonstanten von Filmwellen	53
3.4	Feldverteilung im planaren Wellenleiter	56
3.4.1	Geführte TE-Filmwellen	58
3.4.2	Substratmoden	60
3.4.3	Raumwellen	61
3.5	Grenzflächendeformationen	62
3.5.1	Beugung an einer deformierten Grenzfläche	63
3.5.2	Wellenleiter mit sinusförmig gewellter Grenzfläche	66
3.5.3	Dämpfung durch Streuung an Grenzflächen	68
3.5.4	Dämpfung durch Wellenleiterkrümmungen	69
3.6	Gradientenfilme	71

4	Streifenwellenleiter	75
4.1	Rechteckförmige Wellenleiter	76
4.1.1	Wellenführung im Zick-Zack-Modell	76
4.1.2	Feldverteilung im rechteckförmigen Wellenleiter	77
4.1.3	Beispiele für rechteckförmige Streifenwellenleiter	80
4.2	Wellenführung durch Höhenprofile	83
4.2.1	Reflexion und Brechung von Filmwellen	83
4.2.2	Rippenwellenleiter und Effektiv-Index-Methode	84
4.2.3	Streifenbelastete Filmwellenleiter	86
4.3	Theorie allgemeiner dielektrischer Wellenleiter	88
4.3.1	Transversale und longitudinale Felder	89
4.3.2	Phasenbeziehungen zwischen den Feldkomponenten	90
4.3.3	Leistungsfluß, Energie und Gruppengeschwindigkeit	91
4.3.4	Phasengeschwindigkeit	93
4.3.5	Phasenmodulation	94
4.4	Moden	95
4.4.1	Reziprozitätstheorem	96
4.4.2	Orthogonalität	97
4.4.3	Normierung	98
4.4.4	Feldentwicklung nach Eigenwellen	99
4.4.5	Ortsabhängigkeit der Entwicklungskoeffizienten	101
4.4.6	Leistung	102
4.5	Übergänge	102
4.5.1	Stirnseitige Einkopplung	103
4.5.2	Wellenleiterknicke und Rundungen	104
4.5.3	Querschnittsänderungen und Taper	106
5	Kopplung von Moden	109
5.1	Behandlung gekoppelter Moden	109
5.1.1	Kodirektionale Kopplung	110
5.1.2	Kontradirektionale Kopplung	111
5.1.3	Filter	113
5.2	Theorie der Modenkopplung	114
5.2.1	Reziprozität bei Vorhandensein von Quellen	115
5.2.2	Differentialgleichungen für die Entwicklungskoeffizienten	115
5.2.3	Quellenverteilungen	116
5.2.4	Koppelkoeffizienten für skalare Störungen	117
5.2.5	Synchronisation	119
5.2.6	Streuung an periodischen Störungen	121
5.2.7	Streuung an Ultraschallwellen	123
5.3	Modenkopplung in anisotropen Medien	125
5.3.1	Lichtausbreitung und Indikatrix	126
5.3.2	Der lineare elektrooptische Effekt	127
5.3.3	Spezialfälle elektrooptisch induzierter Anisotropie	129

5.3.4	Elektrooptischer und dielektrischer Tensor	133
5.3.5	Störpolarisation in praktisch wichtigen Koordinaten	135
5.3.6	TE-TM-Modenkonzersion	137
5.3.7	Phasenanpassung für TE-TM-Konzersion	138
6	Richtkoppler	141
6.1	Funktionsweise	141
6.1.1	Theoretisches Modell	141
6.1.2	Differentialgleichungen für die Feldamplituden	142
6.1.3	Amplitudenverlauf im symmetrischen Koppler	145
6.1.4	Abschätzung des Koppelfaktors	146
6.1.5	Leistungssteiler	147
6.1.6	Durchschaltung und Umschaltung	149
6.1.7	Richtkopplerfilter	151
6.2	Elektrooptische Steuerung	152
6.2.1	Geschalteter Richtkoppler	152
6.2.2	Geschalteter Richtkoppler mit Phasenumkehr	153
6.2.3	Abstimmbares Wellenlängenfilter	156
6.2.4	Dynamik geschalteter Richtkoppler	157
6.2.5	Steuerleistung geschalteter Richtkoppler	159
6.2.6	Richtkoppler als Lauffeldmodulator	160
6.3	Supermoden	163
6.3.1	Zweiarmige Richtkoppler	163
6.3.2	Mehrmarmige Richtkoppler	167
7	Elektronen im Halbleiter	171
7.1	Grundlagen der Quantentheorie	171
7.1.1	Wellenfunktion und Operatoren	171
7.1.2	Die Schrödinger-Gleichung	173
7.1.3	Eindimensionales Kastenpotential	175
7.1.4	Potentialtopf unendlicher Höhe	178
7.1.5	Das freie Elektron	179
7.1.6	Eindimensionales Kristallgittermodell	180
7.2	Die Bandstruktur von Halbleitern	183
7.2.1	Wellenfunktionen in dreidimensionalen Kristallen	183
7.2.2	Die Energiebandstruktur von GaAs	185
7.2.3	Die Bandstruktur von InP	188
7.2.4	Die Bandstruktur von Si	189
7.3	Bewegung freier Ladungsträger	191
7.3.1	Elektronen	191
7.3.2	Löcher	194
7.4	Zustandsdichten	196
7.4.1	Die Zustandsdichte im k-Raum	196

7.4.2 Die Zustandsdichte auf der Energieskala	197
7.4.3 Zustandsdichten für ein parabolisches Band	198
7.4.4 Zustände von Fremdatomen	200
7.5 Besetzungswahrscheinlichkeiten	202
7.5.1 Bandbesetzung im thermodynamischen Gleichgewicht	203
7.5.2 Besetzung bei Vorhandensein von Störstellen	206
7.5.3 Störung des Gleichgewichts	209
7.5.4 Überschußdichte und Lage der Quasifermi-Niveaus	214
7.6 Systeme mit eingeschränkter Teilchenbewegung	215
7.6.1 Quantenfilme	215
7.6.2 Quantendrähte	219
7.6.3 Quantentöpfe	220
8 Emission und Absorption	223
8.1 Übergangsraten	223
8.1.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Halbleiterelektronen	223
8.1.2 Strahlung im thermodynamischen Gleichgewicht	227
8.1.3 Relationen für die Einstein-Koeffizienten	228
8.1.4 Der Absorptionskoeffizient	229
8.1.5 Zusammenhang zwischen Absorption und Lumineszenz	230
8.1.6 Verstärkung	231
8.1.7 Abschätzung der Einstein-Koeffizienten	232
8.1.8 Die Grenzen des Modells	233
8.2 Quantenmechanik strahlender Übergänge	235
8.2.1 Kristallelektron im Feld einer elektromagnetischen Welle	235
8.2.2 Zeitabhängige Störungstheorie	237
8.2.3 Harmonische Störung	239
8.2.4 Wechselwirkung mit einer ebenen Welle	242
8.3 Direkte Band-Band-Übergänge	242
8.3.1 Kristallimpulserhaltung	243
8.3.2 Absorption bei parabolischem Bandverlauf	244
8.3.3 Verstärkung durch Übergänge zwischen parabolischen Bändern	246
8.3.4 Abschätzung des Matrixelements	248
8.3.5 Intrabandrelaxation	250
8.3.6 Absorption und Verstärkung in Quantenfilmen	253
8.3.7 Verstärkung in Quantendrähten und Quantentöpfen	259
8.3.8 Energieabhängiges Matrixelement	261
8.3.9 Abhängigkeit der Verstärkung von der Anregung	261
8.4 Einfluß von Störstellen	264
8.4.1 Band-Störstellen-Übergänge	264
8.4.2 Bandausläufer	268
8.4.3 Dichteabhängige Lage der Störstellenniveaus	270

9	Heteroübergänge	275
9.1	Energiebanddiagramme	275
9.1.1	Leitungs- und Valenzbanddiskontinuitäten	275
9.1.2	Diffusionsspannung	277
9.2	Abrupter Übergang im Gleichgewicht	278
9.2.1	Stromdichten	278
9.2.2	Potentialverlauf am abrupten Heteroübergang	280
9.2.3	Bandverlauf im thermodynamischen Gleichgewicht	283
9.3	Stromfluß über den pn-Heteroübergang	283
9.3.1	Potential- und Bandverlauf bei Stromfluß	284
9.3.2	Ladungsträgerdichten in der Sperrschicht	287
9.3.3	Ladungsträgerdichten im Bahngebiet	289
9.3.4	Elektronen- und Löcherstromdichten	290
9.3.5	Quasifermi-Niveaus	292
9.3.6	Kapazität des Heteroübergangs	293
9.4	Doppelheterostrukturen	294
9.4.1	Isotype Heteroübergänge	294
9.4.2	GaAs-AlGaAs-Doppelheterostrukturen	295
9.4.3	Ladungsträgereinschluß	297
10	Laserdioden	301
10.1	Moden und Bilanzgleichungen	301
10.1.1	Fabry-Perot-Resonator	301
10.1.2	Schwellverstärkung und Resonatormoden	302
10.1.3	Bilanzgleichungen	305
10.1.4	Füllfaktor	307
10.1.5	Bilanzgleichungen mit Füllfaktor	309
10.2	Stationäres Verhalten einmodiger Laserdioden	310
10.2.1	Lösungen der Bilanzgleichungen	310
10.2.2	Schwellverstärkung mit Füllfaktor	312
10.2.3	Schwellstromdichte	312
10.2.4	Ausgangsleistung	314
10.2.5	Axialer Intensitätsverlauf	316
10.3	Laserstrukturen	317
10.3.1	Indexgeführte Laserstrukturen	318
10.3.2	Oxidstreifenlaser und Gewinnführung	322
10.4	Emissionsspektrum	326
10.4.1	Experimentelle Ergebnisse	326
10.4.2	Mehrmodenratengleichungen	327
10.4.3	Spontaner Emissionsfaktor	330
10.5	Modulationsverhalten	332
10.5.1	Kleinsignalnäherungen für die Bilanzgleichungen	332
10.5.2	Kleinsignalamplitudenmodulation	333
10.5.3	Großsignalamplitudenmodulation	336

10.5.4	Mehrmodenoszillation bei Pumpstrommodulation	338
10.5.5	Frequenzmodulation	340
10.6	Rauschverhalten einmodiger Laserdioden	342
10.6.1	Schwankungen durch spontane Emission	342
10.6.2	Rauscheinströmungen und Bilanzgleichungen	345
10.6.3	Kleinsignalnäherungen mit Rauschen	347
10.6.4	Leistungsspektren von Rauschsignalen	349
10.6.5	Intensitätsrauschen	350
10.6.6	Frequenz- und Phasenrauschen	351
10.6.7	Mittlere quadratische Phasenabweichung	353
10.6.8	Feldkorrelation	354
10.6.9	Emissionsspektrum und Linienbreite	355
10.7	Spezielle Laserdioden	357
10.7.1	Halbleiterlaser mit integriertem Bragg-Reflektor (DBR-Laser)	358
10.7.2	Halbleiterlaser mit verteilter Rückkopplung (DFB-Laser)	359
10.7.3	Halbleiterlaser mit gekoppelten Resonatoren	363
10.7.4	Elektronisch durchstimmbare Laserdioden	366
10.7.5	Laserdiodenarrays und Abstrahlungscharakteristik	368
10.7.6	Oberflächenemittierende Laserdioden und Schwellstromanalyse	374
10.7.7	Quantenfilmlaser	377
10.7.8	Quantendrahtlaser	381
11	Photodetektoren	383
11.1	Grundlagen	383
11.1.1	Photostrom und Lichtintensität	383
11.1.2	Spektrale Leistungsdichte des Photostroms	385
11.1.3	Spektrale Leistungsdichte zufälliger Impulsfolgen	386
11.1.4	Schrotrauschen	387
11.1.5	Thermisches Widerstandsrauschen	389
11.2	Photodioden	392
11.2.1	Wirkungsweise	392
11.2.2	Quantenausbeute und pin-Diode	394
11.2.3	Einfluß der Driftzeit	397
11.2.4	Frequenzverhalten	400
11.2.5	Rauschen und Detektionsempfindlichkeit	402
11.2.6	Rechteckmodulation und Quantenrauschgrenze	404
11.2.7	Heterodyne Detektion	406
11.2.8	InGaAs-pin-Photodioden	407
11.2.9	Schottky-Photodioden	412
11.3	Lawinphotodioden	414
11.3.1	Wirkungsweise und Ionisierungskoeffizient	414
11.3.2	Strommultiplikation	416
11.3.3	Getrennte Absorptions- und Multiplikationszone	419
11.3.4	Dynamik der Lawinenmultiplikation	420
11.3.5	Zusatzrauschen durch Lawinenmultiplikation	424

11.3.6	Signal-Rausch-Verhältnis	426
11.3.7	Bauformen von InGaAs-InP-Lawinendioden	428
11.4	Photodetektoren mit Vielschichtsstruktur	431
11.4.1	Ionisierung in Schichten mit veränderlichem Bandabstand	431
11.4.2	Vervielfachung in Strukturen mit Übergittern	432
11.4.3	Festkörper-Photovervielfacher	433
11.4.4	Periodische pn-Strukturen	435
11.4.5	Lawinenmultiplikation in periodischen pn-Strukturen	437
11.5	Photoleiter	439
11.5.1	Störstellenphotoleitung	439
11.5.2	Eigenphotoleitung	441
11.5.3	Dynamik	443
11.5.4	Generations-Rekombinationsrauschen	444
11.5.5	Signal-Rausch-Verhältnis	446
12	Optoelektronische Modulatoren	447
12.1	Elektrisch gesteuerte Modulatoren	447
12.1.1	Elektroabsorption	447
12.1.2	Elektrorefraktion	452
12.1.3	Ladungsträgerinjektion	454
12.1.4	Sperrschichtweitenmodulation	456
12.2	Optisch gesteuerte Modulatoren	458
12.2.1	Bandauffüllung	458
12.2.2	Transmissionsmodulatoren in InGaAsP	460
12.2.3	Bandauffüllung in Quantenfilmen	464
12.2.4	Exzitronische Effekte	465
12.2.5	AlGaAs-GaAs-Quantenfilm-Reflexionsmodulator	468
12.3	Feldinduzierte Modulation in Quantenfilmen	471
12.3.1	Stark-Effekt	471
12.3.2	Pin-Absorptionsmodulator	474
12.3.3	Selbststeuerung im SEED	476
12.3.4	Modulation mit dynamischem Stark-Effekt	477
13	Optoelektronische Integration	479
13.1	Laser-Transistor-Integration	479
13.1.1	MESFET auf semiisolierendem GaAs	480
13.1.2	MESFET-Laser-Integration auf GaAs	482
13.1.3	Transistor-Laser-Integration auf InP	485
13.2	Detektor-Transistor-Integration	486
13.2.1	Rauschen einer Photodiode mit FET-Vorverstärker	486
13.2.2	Detektionsempfindlichkeit für digitale Signale	488
13.2.3	GaAs-pin-Diode mit MESFET-Vorverstärker	494
13.2.4	GaAs-Schottky-Diode mit MESFET-Vorverstärker	495

13.2.5 InGaAs-pin-Diode mit MESFET-Vorverstärker	495
13.3 Andere Integrationsformen	497
13.3.1 DFB-Laserdiode mit Modulator und Detektor	497
13.3.2 Pin-FET-SEED-Kombination	498
13.3.3 Integration auf Silizium	499
Anhänge	501
A. Physikalische Konstanten	501
B. Daten einiger indirekter Halbleiter	502
C. Daten einiger direkter Halbleiter	503
Literaturverzeichnis	504
Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	514
Sachverzeichnis	521