

Inhaltsverzeichnis

Summary	I
Zusammenfassung	1
1 Einleitung	5
2 Selbstorganisiertes Wachstum und Charakterisierung von Quantenpunkten	9
2.1 Stranski-Krastanow-Wachstum	9
2.2 Herstellung der Quantenpunkte und Charakterisierungsmethoden	13
2.2.1 Herstellung der Quantenpunkte	13
2.2.1.1 Molekularstrahlepitaxie	13
2.2.1.2 Wachstum mit nicht rotierendem Substrat	14
2.2.1.3 Aufbau der Proben	15
2.2.2 Charakterisierungsmethoden	15
2.2.2.1 Photolumineszenz	15
2.2.2.2 Rasterkraftmikroskopie	18
2.2.2.3 Transmissionselektronenmikroskopie	18
2.2.2.4 Röntgenstreuung	19
2.3 Einfluss der Wachstumsparameter auf die Quantenpunktflächendichte	19
2.3.1 InAs-Menge	19
2.3.2 Wachstumstemperatur	21
2.3.3 Wachstumsmodell	21
2.3.4 Zusammenfassung	25
2.4 Einfluss der Wachstumsparameter auf die optischen Eigenschaften	25
2.4.1 InAs-Menge	25
2.4.2 V/III-Verhältnis	27
2.4.3 Wachstumsrate	29
2.4.4 Wachstumstemperatur	30
2.4.5 Zusammenfassung	34
2.5 Einflüsse dünner AlAs-Deckschichten	34
2.5.1 Abhängigkeit der optischen Eigenschaften	34
2.5.2 Quantenpunkte mit Lumineszenz bei $1,3\text{ }\mu\text{m}$	39

2.6	Stapeln von Quantenpunkten	40
2.6.1	Gestapelte Quantenpunkte bei einer Wachstumstemperatur von 530°C	41
2.6.2	Gestapelte Quantenpunkte bei einer Wachstumstemperatur von 480°C	44
2.6.3	Zusammenfassung	47
2.7	Thermische Stabilität	48
2.8	Strukturelle Eigenschaften	50
2.8.1	Röntgenstreuung	51
2.8.2	Transmissionselektronenmikroskopie	53
2.8.2.1	Benetzungsschicht	53
2.8.2.2	Freistehende Quantenpunkte	54
2.9	Zusammenfassung	57
3	Modellierung der Quantenpunkte	59
3.1	Theoretische Berechnung der Energiezustände und Wellenfunktionen	60
3.1.1	Geometrische Struktur des Problems	60
3.1.1.1	Benetzungsschicht	60
3.1.1.2	Quantenpunkt	62
3.1.2	Pseudomorpher InGaAs-Quantenfilm	66
3.1.3	Quantenpunkt	68
3.1.4	Zustandsdichten	76
3.2	Optische Übergänge	79
3.2.1	Absorption/Gewinn	79
3.2.2	Spontane Rekombination	80
3.2.3	Matrixelemente und reduzierte Zustandsdichten	80
3.2.3.1	Übergänge zwischen dreidimensionalen Zuständen	82
3.2.3.2	Übergänge zwischen zweidimensionalen Zuständen	82
3.2.3.3	Übergänge zwischen eindimensionalen Zuständen	82
3.2.3.4	Übergänge zwischen nulldimensionalen Zuständen	83
3.2.3.5	Übergänge zwischen zwei- und nulldimensionalen Zuständen	83
3.2.3.6	Gesamtsystem	84
3.3	Abhängigkeit von der abgeschiedenen InAs-Menge	86
3.4	Inhomogene Verbreiterung	91
3.4.1	Abhängigkeit von der Breite der Volumenverteilung	92
3.4.2	Abhängigkeit von der InAs-Menge	95
3.5	Optischer Gewinn	97
3.6	Diskussion	102

4 Homogene Linienbreite aufgrund von Temperaturfluktuationen	103
4.1 Einführung	103
4.2 Berechnung der Linienverbreiterung aufgrund von Temperaturfluktuationen	107
4.2.1 Thermische Verbreiterung der Quantenpunkt-Energieniveaus	107
4.2.2 Übergangsrate	109
4.2.3 Temperatur-Rauschen	111
4.3 Näherungen der Geometrie der Wellenfunktion	112
4.3.1 Rechtwinklige Näherung	112
4.3.2 Radialsymmetrische Näherung	115
4.4 Diskussion	118
5 Untersuchung der Gewinneigenschaften anhand kantenemittierender Laserdioden	121
5.1 Warum Quantenpunktaser?	121
5.1.1 Überblick	121
5.1.2 Dimensionsabhängige Gewinneigenschaften	123
5.2 Untersuchte Proben und Charakterisierungsmethoden	126
5.2.1 Probenaufbau	126
5.2.2 Prozessierung	129
5.2.3 Charakterisierungsmethoden	130
5.2.3.1 Photolumineszenz	131
5.2.3.2 Strom-Leistung-Kennlinien und Emission	132
5.2.3.3 Temperaturabhängigkeit	134
5.3 Experimentelle Bestimmung der Gewinneigenschaften	134
5.3.1 Strom-Leistung-Kennlinien und Emissionswellenlänge	135
5.3.1.1 Bestimmung der Schwellstromdichte, der Emissionswellenlänge und des differentiellen Quantenwirkungsgrads	135
5.3.1.2 Abhängigkeit der Schwellstromdichte von der Laserlänge	136
5.3.1.3 Interne Verluste und interner Quantenwirkungsgrad	137
5.3.1.4 Gewinnverhalten	140
5.3.2 Messen von Gewinnspektren	142
5.3.2.1 Messmethode	142
5.3.2.2 Ergebnisse	143
5.4 Temperaturabhängige Eigenschaften	148
5.4.1 Messergebnisse	148
5.4.2 Diskussion	151
5.4.2.1 Relaxation und Ladungsträgeraustausch	151

5.4.2.2	Temperaturabhängigkeit des Schwellstroms	155
5.4.2.3	Emissionsspektren	155
5.5	Modellierung der Gewinneigenschaften	157
5.5.1	Vergleich mit dem Experiment	157
5.5.2	Modellierung der Gewinneigenschaften von InAs-Quantenpunkten mit langwelliger Emission	161
5.6	Zusammenfassung	163
6	Mikrozyylinder-Laserdioden	165
6.1	Einführung	165
6.2	Probenaufbau und -prozessierung	168
6.3	Quantenfilm-Mikrozyylinderlaser	169
6.4	Quantenpunkt-Mikrozyylinderlaser	171
6.5	Diskussion der Ergebnisse	173
7	Oberflächenemittierende Laserdioden	177
7.1	Einführung	177
7.2	Proben, Prozessierung und Messmethoden	178
7.2.1	Überblick	178
7.2.2	Hydrolytische Oxidation	180
7.2.3	Probenaufbau	182
7.2.4	Prozessierung	186
7.2.5	Charakterisierungsmethoden	187
7.3	Oberflächenemittierende Laserdioden mit Quantenfilmen als aktives Material	188
7.3.1	Abhängigkeit entlang des Waferdurchmessers	188
7.3.2	Abhängigkeit vom Aperturdurchmesser	190
7.3.2.1	Optische Eigenschaften	190
7.3.2.2	Elektrische Eigenschaften	192
7.3.2.3	Thermischer Widerstand	197
7.4	Oberflächenemittierende Laserdioden mit Quantenpunkten als aktives Material	197
7.5	Vergleich der oberflächenemittierenden Laser	199
A	Konstante und Materialparameter	203
Abbildungsverzeichnis		210
Tabellenverzeichnis		211

Literaturverzeichnis	230
Liste der Veröffentlichungen	231
Danksagung	235