LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG



Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterscheibenlasers

Herbert Utz Verlag UIZ



Laser in der Materialbearbeitung Forschungsberichte des IFSW

T. Kübler Modellierung und Simulation des Halbleiterscheibenlasers

Laser in der Materialbearbeitung Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe "Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW" soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Modellierung und Simulation des Halbleiterscheibenlasers

von Dr.-Ing. Thomas Kübler Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft München Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Ortwin Hess (University of Surrey, United Kingdom)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2009

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2009

ISBN 978-3-8316-0918-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Kurzfassung

Lasersysteme und deren Anwendungen sind aus dem heutigen Leben, ob im privaten, industriellen oder medizinischen Umfeld, nicht mehr wegzudenken. Infolge dieser breiten Anwendungsmöglichkeiten besteht der Wunsch nach kostengünstigen und effizienten Laserquellen mit guter Strahlqualität.

Für Bereiche wie z.B. die Spektroskopie oder Projektionssysteme scheint der Halbleiterscheibenlaser ein geeignetes System zu sein.

Wie beim Festkörper-Scheibenlaser besteht auch bei diesem System die aktive Zone aus einer dünnen Scheibe, welche jedoch aus periodisch angeordneten, durch Spacerschichten separierten Quantenfilmen, den eigentlich laseraktiven Zonen, aufgebaut ist. Auf der Rückseite dieser Scheibe ist ein Bragg-Spiegel epitaktisch aufgewachsen, welcher zusammen mit dem Auskoppelspiegel den Laserresonator bildet. Der Halbleiterscheibenlaser eignet sich hervorragend für die Frequenzverdopplung, da er durch die geringe Auskopplung eine hohe resonatorinterne Leistungsdichte hat. Im Zusammenspiel mit dem möglichen Wellenlängendesign über die Quantenfilme lassen sich somit frequenzverdreifachte, gepulste Festkörpersysteme in der Spektroskopie durch frequenzverdoppelte Halbleitersysteme ersetzen.

Der Halbleiterscheibenlaser, als optisch angeregter Oberflächenemitter hat, gegenüber den herkömmlichen, über die Spacer gepumpten VECSEL den Vorteil, dass die Pumpstrahlung direkt in den Quantenfilmen absorbiert wird, wodurch sich der Wärmeeintrag in die aktive Zone infolge des deutlich reduzierten Quantendefekts verringern lässt. Dieser Vorteil wird mit einem höheren Aufwand bei Design und Prozessierung der Scheibe erkauft. Durch die deutliche Reduktion der Absorptionslängen sind auch für die Pumpstrahlung Resonanzeigenschaften zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Modelle zur Simulation des Lasersystems entwickelt. Insbesondere wird der Pumpvorgang genauer beleuchtet und die Resonanzeigenschaften der Scheibe durch eine weitere Ratengleichung berücksichtigt. Es wird gezeigt unter welchen Voraussetzungen es für nulldimensionale und radiale Betrachtungen ausreichend ist, die stationäre Lösung für die Pumpratengleichung zu verwenden.

Inhaltsverzeichnis

K	Kurzfassung 5				
In	haltsv	verzeichnis	7		
Sy	mbol	e	11		
E	tend	ed Abstract	17		
1	Einl	eitung	23		
	1.1	Anforderungen	23		
	1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	25		
2	Das	Konzept	27		
	2.1	Optisch gepumpte Oberflächenemitter	28		
	2.2	Halbleiterscheibenlaser	32		
3	Nulldimensionales Modell				
	3.1	Modellansatz	35		
	3.2	Gainfunktion	38		
	3.3	Iso-Dichten	39		
	3.4	Notwendige Erweiterungen	40		
4	Con	finementfaktoren	43		
	4.1	Definition der Γ-Faktoren	43		
	4.2	Confinement von Oberflächenemittern	44		
		4.2.1 Confinement eines VCSEL's	45		
		4.2.2 Confinement des Halbleiterscheibenlasers	46		
		4.2.3 Die Bedeutung von Γ_{Δ}	50		
		4.2.4 Ankopplung einzelner Quantenfilme	51		
5	Tra	nsfermatrixmethode	53		
	5.1	Darstellung der Methode	53		
	5.2	Rechts- und linkslaufende Welle	54		
	5.3	Die Transfermatrix	54		

	5.4	Die Pro	opagationsmatrix	56		
5.5 Die Anwendung			1wendung	56		
	5.6	Die Ve	rwendung der Methode für den Halbleiterscheibenlaser	57		
6	Mod	lelle		59		
	6.1	Multin	node - Nulldimensional	59		
	6.2	Longit	udinale Erweiterung	60		
		6.2.1	Effektive Gainfunktion	62		
		6.2.2	Deutung der Erweiterung	64		
	6.3	Radial	e Erweiterung	65		
		6.3.1	Motivation des Ansatzes	66		
		6.3.2	Resonatorquelle $\mathbf{S_r}$	68		
		6.3.3	Deutung der Resonatorquelle	69		
		6.3.4	Die Verteilungsfunktion $v_{\mathbf{r}}$	71		
	6.4	Kombi	nation der Erweiterungen	72		
7	Pun	umpmodell - Quantenfilmpumpen 75				
	7.1	Vorbet	rachtung	75		
	7.2	Das M	odell	76		
		7.2.1	Der Modellansatz	76		
		7.2.2	Ermittlung der Confinementfaktoren	77		
		7.2.3	Vorbetrachtungen zur Pumpphotonenlebensdauer	78		
		7.2.4	Berechnung der Pumpphotonenlebensdauer	81		
	7.3	Das lo	ngitudinal aufgelöste Pumpmodell	82		
	7.4	Radiale Auflösung des Pumpvorgangs				
	7.5	Kombination der Erweiterungen 84				
	7.6	Verknü	ipfung mit den Ratengleichungen	85		
		7.6.1	Nulldimensional	85		
		7.6.2	Longitudinal	87		
	7.7	Lösung	g der stationären Pumpmodellgleichung	89		
		7.7.1	Motivation	89		
		7.7.2	Berechnung einer effektiven Absorptionsfunktion α	90		
	7.8	Transfo	ormationsverhalten des k_p - Vektors	94		
8	Verg	gleich Si	imulation - Experiment	99		
	8.1	Angep	asstes Modell	99		
	8.2	Experi	menteller Aufbau Quantenfilmpumpen	102		
		8.2.1	Confinementfaktoren der Proben	103		
			8.2.1.1 Ti: Al_2O_3 -gepumpt	103		

			8.2.1.2	Diodengepumpt	105
		8.2.2	Numeris	che Auswertung	107
			8.2.2.1	$Ti:Al_2O_3-gepumpt . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ .$	108
			8.2.2.2	Diodegepumpt	109
	8.3	Diode	ngepumpt	- longitudinal aufgelöst	112
		8.3.1	Confine	nent	113
		8.3.2	Numeris	che Auswertung - Longitudinal	114
	8.4	Ti:Al ₂	O ₃ -gepum	pt - radial aufgelöst	118
9	Zusa	ammen	fassung u	nd Ausblick	127
Literaturverzeichnis 131			131		
Al	obildu	ingsver	zeichnis		137
Da	Danksagung 139			139	

Symbole

Lateinische Symbole

A_m	Lasermodenfläche
A_p	Pumpfläche
A_{τ}	Störstellenrekombinationsrate
A	Elektrisches Feld
A_{amp}	elektrische Feldamplitude
A_{in}	elektrische Feldamplitude der Pumpstrahlung
$A_{0,a}$	Feldamplitude im Vakuumbereich
A_0	Feldamplitude im Halbleiterbereich
\vec{A}	Feldvektor; elektrisches Feld
\mathcal{A}	Elektrisches Feld; komplex
B_{τ}	Koeffizient der strahlenden Übergänge
B	rechtslaufende Welle
С	linkslaufende Welle
C_{τ}	Koeffizient für den Augerübergang
c	Vakuumlichtgeschwindigkeit
c_{ph}	Phasengeschwindigkeit; Licht
d_{cav}	Länge der Subkavität
d_g	Dicke des Halbleiterbereichs; i.d. R identisch zu d_{cav}
d_{QW}	Gesamtdicke aller Quantenfilme
d_{QW_i}	Dicke des Quantenfilms mit der Nr. i
d_{res}	effektive Resonatorlänge
D	Transfermatrix
E_{abs}	absorbierte Leistungsdichte
E_g	Bandlücke des Halbleitermaterials
E_p	Pumpleistungsdichte
$E_m^{(Phot)}$	Photonenenergie; Lasermode
$E_p^{(Phot)}$	Photonenenergie; Pumpmode
g	Gain
\tilde{g}	Gain für $e \cdot n_t$
G	Gainfunktion im Zeitraum

G_i	Gain eines einzelnen Quantenfilms
G_s	Systemgain; longitudinales Modell
\tilde{G}	Korrekturrate; radiales Modell (Resonatorgain)
j	Stromdichte
$\vec{k}_{p,e}$	Wellenvektor; einfallend; Pumpwellenlänge
\vec{k}_p	Wellenvektor; im Material; Pumpwellenlänge
k_a	Wellenzahl; Vakuumbereich
k_i	Wellenzahl; Halbleiterbereich
k_x	Wellenzahl; x-Komponente
k_{xm}	Wellenzahl; x-Komponente; Lasermode
k_{xp}	Wellenzahl; x-Komponente; Pumpmode
L	Verluste durch Auskopplung in %
L_g	Gesamtverluste; Subkavität
L_m^p	Laguerre-Polynom
L_n	Anteil aus L_g , der zu Ladungsträgergeneration führt
L_d	dissipativer Anteil aus L_g
\bar{n}_d	gemittelter Brechungsindex der Subkavität
n	Ladungsträgerdichte
n_g	Anzahl der Ladungsträger in Wechselwirkung mit der Mode
n_t	Transparenz-Ladungsträgerdichte
N	Anzahl aller Schichten in der Halbleiterstruktur
N_g	Anzahl der radialen Modengruppen mit identischem Eigenwert
N_m	Anzahl der longitudinalen Moden
N_{QW}	Anzahl der Quantenfilme
p	Photonendichte; gespeicherte Energie im Resonator
p_p	Pumpphotonenzahl; Gespeicherte Energie in der Subkavität
\tilde{p}_p	Energiedichteverteilungsfunktion in der Subkavität
P_{abs}	absorbierte Pumpleistung
Pout	Ausgangsleistung
$P_{p,0}$	einfallende Pumpleistung
P_s	P_{abs} an der Schwelle
Р	Propagationsmatrix
Q	Quellterm; allgemein
Q	Projektionsmatrix der GL-Moden
Q_n	Quellterm; Ladungsträger
R_m	Radius der Mode (auf Halbleiterscheibe)
R_p	Radius des Pumpfleck (auf Halbleiterscheibe)
R_{sp}	Rekombinationsrate der strahlende Übergänge

R_c	Auger-Rekombinationsrate
r	Fresnel-Reflexionskoeffizient
R_p	Radius des Pumpflecks
R_s	Spiegelradius
S_r	radiale Quellenfunktion
t	Fresnel-Transmissionskoeffizient
T	Verluste durch Transmission in %
T_{HL}	Temperatur in K des Halbleiters
$\Delta T_{\rm abs}$	Temperaturerhöhung durch Verlustprozesse in K/W
v_p	Verteilungsfunktion der Pumpleistungsdichte
v_r	Verteilungsfunktion; radiale Mode
V_w	Wechselwirkungsvolumen
V_g	Gesamtvolumen
w_e	Volumenenergiedichte des elektrischen Feldes
$w_{e,l}$	Längenenergiedichte des elektrischen Feldes
$w_{e,A}$	Flächenenergiedichte des elektrischen Feldes

Griechische Symbole

α	effektive Absorptionsfunktion
α_e	Einfallswinkel Pumpstrahlung; Winkel zur Senkrechten der
	Halbleiteroberfläche
α_{int}	interne Verluste
α_m	Verluste durch Auskopplung
β	Anteil der spontanen Rekombinationen in die Lasermode
Γ	Confinement Lasermode
Γ_c	Confinement-Faktor Subkavität Pumpmode
Γ_{eu}	Eulersches Integral zweiter Gattung
Γ_f	Füllfaktor
Γ_{f_i}	Füllfaktor des <i>i</i> -ten Quantenfilms
$\bar{\Gamma}_f$	gemittelter Füllfaktor
Γ_l	laterales Confinement
Γ_r	relatives Confinement
Γ_{r293K}	relatives Confinement bei 293K
Γ_{Δ}	Überhöhungsfaktor
$\Gamma_{\Delta 293K}$	Überhöhungsfaktor bei 293K
δ	Proportionalitätskonstante

Δ	Verhältnis der Amplitudenquadrate
ε_0	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
ε_r	relative Dielektrizitätskonstante
η_g	Geometriefaktor des angepassten nulldimensionalen Modells
$\eta_{g,n}$	Geometriefaktor entsprechend η_g im radialen Modell
$\eta_{g,r}$	resultierender Geometriefaktor des radialen Modells
η_p	Effizienzfaktor Pumpabsorption
$\Delta\lambda$	temperaturabhängige Verschiebung der Γ-Funktionen
$\Delta \lambda_s$	Steigung der Verschiebung der -Funktionen
λ_p	Wellenlänge der Pumpmode
λ_m	Wellenlänge der Lasermode
λ_v	verschobene Modenwellenlänge
μ_0	Permeabilitätskonstante; Vakuum
μ_r	relative Permeabilitätskonstante
ω_p	Kreisfrequenz der Pumpstrahlung
ψ_{mp}	GL-Mode
Ψ	Einhüllende; Wellenpropagation
$ au_e$	Ladungsträgerlebensdauer
$ au_m$	Photonenlebensdauer; Anteil der Auskopplung
$ au_p$	Photonenlebensdauer
$ au_r$	Verallgemeinerte Photonenlebensdauer; radiales Modell
$ au_S$	radiale Photonenlebensdauerfunktion
$ au_u$	Umlaufzeit im Resonator
$ au_{up}$	Umlaufzeit in der Subkavität
$ au_{pp}$	Lebensdauer der Pumpphotonen

Abkürzungen und Begriffe

AlAs	Aluminium-Arsenid
AlGaAs	Aluminium-Gallium-Arsenid
AlGaAsP	Aluminium-Gallium-Arsenid-Phosphit
DBR	Distributed Bragg Reflector; Bragg-Spiegel
GRIN	Kontinuierliche Indexvariation innerhalb der Heterostruktur;
	Graded Index
GL-Mode	Gauß-Laguerre-Mode
GaAs	Gallium-Arsenid
Heterostruktur	Schichtenfolge verschiedener Halbleitermaterialien