

Spektrale Stabilisierung und inkohärente Überlagerung von Diodenlaserstrahlung mit Volumenbeugungsgittern

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Stefan Hengesbach

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juli 2014

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Berichte aus der Lasertechnik

Stefan Hengesbach

**Spektrale Stabilisierung und inkohärente
Überlagerung von Diodenlaserstrahlung
mit Volumenbeugungsgittern**

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2985-7

ISSN 0945-084X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

DIESE wissenschaftliche Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als Mitarbeiter im Kompetenzfeld *Laser und Laseroptik* des *Fraunhofer Instituts für Lasertechnik* sowie am *Lehrstuhl für Lasertechnik* der RWTH Aachen in den Jahren 2009 bis 2013 entstanden. Für die freundschaftliche Zusammenarbeit, die konstruktiven Gespräche und das hervorragende Arbeitsklima möchte ich an dieser Stelle meinen Kollegen und insbesondere der Arbeitsgruppe 1.31 *Optik und Diodenlaser* meinen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A. für die Betreuung, die vielen Anregungen und das mir entgegengebrachte Vertrauen in meine Forschungs- und Lehrtätigkeiten - docendo discimus. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Markert für die Bereitschaft, den Prüfungsvorsitz zu übernehmen. Die meist spontanen fachlichen Gespräche über optische Systeme mit Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Peter Looßen haben mir viel Freude bereitet und ebenfalls zum Gelingen meiner wissenschaftlichen Untersuchungen beigetragen.

Für die Unterstützung, insbesondere bei Finanzierung und Projektdurchführung sowie für die Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen und Freiräume gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hoffmann und Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Martin Traub. Die vorliegenden Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Projektes *Spektralas* (Förderkennzeichen 13 N 9729) gefördert. Für die hervorragende Zusammenarbeit bedanke ich mich bei der den Verbundpartnern bestehend aus der *Dilas GmbH*, der *Grintech GmbH*, dem *Ferdinand Braun Institut für Höchstfrequenztechnik*, der *Jenoptik AG*, der *Ingeneric GmbH* und darüber hinaus den Mitarbeitern im Forschungsgebiet *Glas und mineralische Werkstoffe* des *Fraunhofer ISC*.

Für die gewissenhafte Forschung und die herausragenden Studienabschlussarbeiten danke ich Dipl.-Phys. Ulrich Witte, Dipl.-Phys. Sebastian Nippgen, Dipl.-Ing. Carlo Holly, Dipl.-Ing. Niels Krauch, Tobias Bonhoff B. Sc., David Rubel B. Sc. und Sarah Klein B. Sc.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir eine akademische Ausbildung ermöglicht haben und meiner geduldischen Freundin Melanie.

Aachen, im Juli 2014

Stefan Hengesbach

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung, Methodik und Zielsetzung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Wirtschaftliche Relevanz	3
1.3	Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2	Stand der Technik	7
2.1	Aufbau eines Hochleistungsdiodenlasers	7
2.2	Spektrale Leistungsdichte	10
2.3	Charakterisierung von HPDL	13
2.4	Spektral stabilisierte Diodenlasersysteme	15
2.5	Dichte spektrale Leistungsskalierung (DWDM)	16
2.6	Photosensitive Gläser	18
3	Erzeugung und Analyse von Volumengittern	23
3.1	Übersicht und Definitionen	23
3.2	Zweistrahlint interferenz	24
3.2.1	Modelltheoretische Grundlagen	24
3.2.2	Experimenteller Aufbau	28
3.3	Analyseverfahren	30
3.4	Hergestellte VBG	34
3.5	Diskussion	40
4	Beugung elektromagnetischer Wellen an VBG	43
4.1	Theorie der gekoppelten Wellen	44
4.1.1	Definitionen	44
4.1.2	Periodisch modulierte Dielektrika	46
4.1.3	Rigorous Coupled Wave Analysis (RCWA) für TE-Polarisation	47
4.1.4	Theorie nach H. Kogelnik und J. W. Goodman	47
4.1.5	Geltungsbereich	50
4.2	Erweiterung der Theorie um Grenzflächeneffekte	52
4.3	Polarisationsabhängigkeit	53
4.4	Beugung beliebiger Feldverteilungen	54
5	Modell eines Halbleiterlaser-Kantenemitters	57
5.1	Aufbau des Modells	58
5.2	Ratengleichungen	59
5.3	Effektive Wellenzahl	59
5.4	Halbleitermaterial und Verstärkung	60
5.5	Modellbildung der elektrischen Feldstärke	61
5.6	Thermische Modellbildung	62
5.7	Simulationsergebnisse ohne externes optisches System	63

6 Externe Resonatoren	65
6.1 Optikdesign	65
6.2 Biaxial divergente Rückkopplung - die VBG-FAC Linse	67
6.3 Uniaxial divergente Rückkopplung	72
6.4 Abbildende Rückkopplung mit Bildumkehr	73
6.5 Abbildende Rückkopplung ohne Bildumkehr	74
6.6 Konzeptvergleich	75
6.6.1 Wirkungsgrade	75
6.6.2 Stabilisierungsbandbreite (eindimensionales Verstärkungsmodell)	77
6.6.3 Spektrale Breite	81
6.7 Experimentelle Analyse	83
6.7.1 Einzelemittermessungen	83
6.7.2 Diodenlaserbarren	85
7 Dichte spektrale Leistungsskalierung	91
7.1 Effizienzanalyse der spektralen Leistungsskalierung	91
7.1.1 Divergenz kollimierter Diodenlaserbarren	91
7.1.2 Inkohärente spektrale Leistungsskalierung mit VBG	93
7.1.3 Die virtuelle Spiegelebene eines VBG	97
7.2 Optik Design und Optomechanik	99
7.3 Experimentelle Analyse	103
7.4 Apodisierte VBG	109
8 Zusammenfassung	115
9 Ausblick	119
Literaturverzeichnis	121
A Definitionen und Formeln	135
A.1 Strahlparameterprodukt und Strahlqualität	135
A.2 Strahldichte (radiance, brightness, luminance)	135
A.3 Brillanz (spectral brightness)	136
A.4 Fluenz (Energieflächendichte)	137
A.5 kontinuierliche Fourier-Transformation	137
A.6 Fourier-Theorem für elektrische Felder	137
A.7 Modell zur Belichtung des PTR-Glases mit Sättigungseffekt	138
A.8 Lorentz-Oszillator	139
A.9 Auskoppelgrad	140
A.10 Herleitung des eindimensionalen Verstärkungsmodells	141
A.11 Stabilisierte Diodenlaser in Littrow-Anordnung mit Blaze-Gittern	141
B Ergänzende Informationen zum Stand der Technik	143
B.1 Umsatzerlöse Lasermarkt	143
B.2 Patente und Schutzrechte	143
C Herstellung von Volumenbeugungsgittern	145
C.1 Messung des Interferenzkontrasts	145
C.2 Analyse der Störeinflüsse bei der Herstellung von VBG	146
C.3 VBG-Herstellung in kommerziellen PTR-Gläsern	151
C.4 VBG-Herstellung in Ge-dotierten Quarzgläsern	152
C.5 VBG-Herstellung durch Ultrakurzpuls laserstrahlung	153
C.6 VBG-Herstellung mit Calciumfluorid	155

C.7	Zusammensetzung und Herstellungsparameter der Gläser	156
C.8	Ergänzende Abbildungen	158
C.9	Optische Designs zur Herstellung der VBG	159
C.9.1	Beidseitig telezentrische Abbildung V-4.13	159
C.9.2	Beidseitig telezentrische Abbildung V-15.76	160
C.9.3	Beidseitig telezentrische Abbildung V-15.38 G ² T	160
C.10	Röntgenbeugungsanalyse	161
D	Maxwell-Gleichungen und Wellengleichung	163
D.1	makroskopische Maxwell-Gleichungen in differentieller Schreibweise	163
D.2	Materialgleichungen der Elektrodynamik	163
D.3	Wellengleichung für elektrische Felder in Dielektrika	164
D.4	Helmholtz Gleichung	165
E	Gültigkeitsbereich der Coupled-Wave Theorie	167
F	Simulationsparameter und Ergebnisse	169
F.1	Materialparameter des Halbleiterlasers	169
F.2	Biaxial Divergente Rückkopplung	169
F.3	Abbildende Rückkopplung mit Bildumkehr	170
F.4	Abbildende Rückkopplung ohne Bildumkehr	170
F.5	Rückkopplung durch einen Spiegel	170
F.6	Einhüllende der elektrischen Feldstärke	171
G	Spektrales Multiplexing	173
G.1	Anforderungen an ein Modul zur spektralen Überlagerung	173
G.2	Leistungsdaten der verwendeten Peltier-Elemente	173
G.3	Berechnungen des spektralen Überlagerungsmoduls	174
G.4	Analyse- und Charakterisierungsaufbau	176
G.5	Strahlengang Multiplexer	177

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	-	Linienverbreiterungsfaktor (engl. linewidth enhancement factor), 1982 eingeführt von Henry [1]
α_{DWDM}	°	Inzidenzwinkel an einem Filter oder diffraktiven Element bei der dichten spektralen Leistungsskalierung
α_i	10^{-6} K^{-1}	Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Werkstoffs i
α_i	V m^{-1}	Parameter zur Bestimmung der Lösung der CWT Differentialgleichungen, siehe auch [2]
α_{InGaAs}	eV K^{-1}	Temperaturparameter der Änderung der Bandlückenenergie von InGaAs
α_{int}	m^{-1}	Interner Verlustkoeffizient, siehe Lambert-Beer Gesetz
α_j	rad	Inzidenz- und Interferenzwinkel zur Herstellung von VBG mit den Indizes für Umgebungsmedium: $j = 0$, Quarzglaseinspannung: $j = 1$, Immersionsöl: $j = 2$, VBG-Substrat: $j = 3$
$\alpha_{\text{K,n}}$	$\text{W m}^{-2} \text{ K}$	Wärmeübergangskoeffizient am n-Kontakt
$\alpha_{\text{K,p}}$	$\text{W m}^{-2} \text{ K}$	Wärmeübergangskoeffizient am p-Kontakt
α_{VBG}	°	Inzidenzwinkel an einem VBG
β	m^{-1}	Mittlere Wellenzahl im VBG, gemäß [2, 3]
β_{InGaAs}	K	Temperaturparameter der Änderung der Bandlückenenergie von InGaAs
β_{R}	-	Resonatorselektivität
γ	s^{-1}	Phasenverschiebung, siehe [4]
γ_i	m^{-1}	Parameter zur Bestimmung der Lösung der CWT Differentialgleichungen, siehe auch [2]
Γ	-	Überdeckungsfaktor von Modenprofil und Verstärkungszone, englisch: confinement factor
$\delta\nu$	Hz	Frequenzhalbwertsbandbreite
$\delta\lambda_{95\%}$	nm	Spektrale Bandbreite mit 95% Leistungseinschluss
$\delta\lambda_i$	nm	Spektrale Bandbreite einer Strahlquelle i , sowie Absorptionslinienbreite des Mediums i
$\delta\lambda_{\text{VBG}}^{\text{FWHM}}$	nm	Halbwertsbreite der spektralen Selektivität eines VBG
δn	-	Durch Ladungsträger verursachte lokale Brechungsindexdifferenz
Δ	nm	Allg. Positionsänderung einer Komponente des Interferometers
Δ_{S}	mm	Versatz des Schwerpunktes der Feldstärke bei Beugung am VBG
$\Delta\epsilon$	$\text{A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$	Modulationsamplitude der Permittivität
$\Delta\theta$	rad	Winkelinkrement einer Rotationsachse

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\Delta\varphi$	-	Phasendifferenz
$\Delta\lambda$	nm	Zentralwellenlängenabstand mehrerer Strahlquellen
$\Delta\lambda_{\text{DWDM}}$	nm	Zentralwellenlängenabstand mehrerer Strahlquellen bei der dichten spektralen Leistungsskalierung (DWDM)
$\Delta\lambda$	nm	Spektrale Stabilisierungsbandbreite
Δl	m	Strecke der translatorischen Bewegung eines Interferometerspiegels
Δn	-	Amplitude der Brechzahlmodulation, siehe [2]
$\overline{\Delta n}$	-	Messtechnisch erfasster mittlerer Brechungsindex eines VBG
ΔT_i	K, °C	Temperaturdifferenz des Bauteils i
Δz	m	Schwerpunktsdifferenz zweier Interferenzmuster
$\Delta z,$	m	Longitudinale Schrittweite bei räumlich diskreter Propagation, Abstand zweier elektro-thermischer Ebenen
Δz_{ET}		
$\varepsilon(x, y, z)$	$\text{A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$	Permittivität
ε_0	$\text{A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$	Mittlere Permittivität eines VBG
ε_{00}	$\text{A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$	Permittivität des Vakuums
ε_1	$\text{A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$	Amplitude der Permittivitätsmodulation innerhalb eines VBG
$\varepsilon_{\text{I}}, \varepsilon_{\text{III}}$	$\text{A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$	Bereiche konstanter Permittivität
ϵ	rad	Elevationswinkel
ζ_i		Allg. Proportionalitätskonstanten
$\eta(\lambda)$	-	Spektrale Selektivität eines VBG
$\eta(\theta)$	-	Angulare Selektivität eines VBG
$\eta_{\vec{k}}(\theta, \lambda)$	-	Beugungseffizienz eines VBG
η_{A}	-	Wirkungsgrad bei Propagation von Strahlung durch die Apertur A
η_{Abs}	-	Wirkungsgrad bei Propagation von Strahlung durch ein absorbierendes Glas definierter Dicke
η_{B}	-	Wirkungsgrad der Beugung einer elektromagnetischen Feldverteilung an einem VBG
η_{DWDM}	-	Wirkungsgrad eines Multiplexers zur dichten spektralen Leistungsskalierung
η_i	-	Effizienz, Wirkungsgrad
η_{opt}	-	Elektro-optischer Konversionswirkungsgrad
η_{q}	-	Quanteneffizienz eines Halbleiterlasers
η_{S}	-	Wirkungsgrad der spektralen Stabilisierung
η_{Sp}	-	Wirkungsgrad eines Umlenkspiegels
η_{T}	-	Transmissionswirkungsgrad
η_{VBG}	-	Beugungseffizienz eines VBG
$\eta_{\text{VBG},\lambda,i,j}$	-	Spektrale Beugungseffizienz bei der Beugung der Strahlung der Strahlquelle i am VBG j
$\eta_{\text{VBG},\theta,i,j}$	-	Angulare Beugungseffizienz bei der Beugung der Strahlung der Strahlquelle i am VBG j
Θ_{GaAs}	K	Empirische Temperaturkonstante für GaAs
Θ_i	rad	Fernfelddivergenzwinkel unkollierter Diodenlaserstrahlung in vertikaler Θ_{v} oder lateraler Richtung Θ_{l}

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\theta_B(\lambda)$	rad	Bragg-Winkel am optischen Gitter
$\theta_{i,j}$	rad	Inzidenzwinkel bei Beugung am VBG, bzw. der Rekonstruktion des Hologramms
θ_i	rad	Fernfelddivergenzwinkel kollimierter Diodenlaserstrahlung in der Raumrichtung i , bzw. in vertikaler θ_v oder lateraler Richtung θ_l .
κ	-	Absorptionsindex
κ	-	Kopplungskonstante der Differentialgleichungen der CWT
λ	nm	Wellenlänge
$\lambda_B(\theta)$	nm	Bragg-Wellenlänge
λ_i	nm	Schwerpunktswellenlänge einer Strahlquelle i
$\lambda_{m,n}$	nm	Schwerpunktswellenlänge einer longitudinalen Mode mit den Modenindizes $[m, n]$
λ_S	nm	Schwerpunktswellenlänge der Strahlung zur Herstellung, respektive zum Schreiben der VBG
λ_{th}	$W m^{-1} K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
Λ	nm	Gitterperiode eines optischen Gitters
Λ_{PM}	nm	Periode einer Phasenmaske
μ	$V s A^{-1} m^{-1}$	Magnetische Permeabilität
μ_0	C m	Betrag des Übergangsdipolmoments an der Bandlücke
ν_i	GHz	Schwerpunkt der Emissionsfrequenzen der Strahlquelle i
ν_{rep}	Hz	Repetitionsrate
ν_{VBG}	-	Dimensionsloser Geometrie- und Materialparameter eines VBG nach [2], gemäß [5] wird der Parameter auch mit Φ bezeichnet
ξ	$eV K^{-1}$	Empirischer Bandlücken-Temperaturparameter
ξ_{VBG}	-	Dimensionsloser Gitterparameter der erweiterten Bragg-Abweichung nach [2], bei Bragg-Inzidenz ist $\zeta = 0$. In [5] ist $\zeta = \chi$.
ρ	-	Dimensionslose Gitterkennzahl zur Beschreibung des Beugungsregimes
ρ	$kg m^{-3}$	Spezifische Dichte
σ	m	Varianz einer Gauß-Funktion
$\sigma(x, y, z)$	$\Omega^{-1} m^{-1}$	Konduktivität (elektrische Leitfähigkeit)
σ_0	$\Omega^{-1} m^{-1}$	Konstanter Anteil der Konduktivität
σ_1	$\Omega^{-1} m^{-1}$	Amplitude der Modulation der Konduktivität
τ_{Exp}	s	Belichtungszeit, Integrationszeit einer Kamera
τ_i	s	Belichtungsintervall
τ_{nr}	s	Nichtradiative, mittlere Rekombinationszeit der Ladungsträger
τ_P	s	Dauer eines Laserpulses
τ_{rt}	s	Umlaufzeit im Resonator, von engl. round trip time
ϕ	rad	Inklinationsraumwinkel
ϑ_{VBG}	m^{-1}	Detuning-Parameter [2], Abweichung von der Bragg-Bedingung, wird in [5] mit ζ bezeichnet
φ_i	rad	Raumwinkel zur Beschreibung der Brechung am VBG, Umgebungsmedium: $i = 0$, VBG-Substrat: $i = 3$
$\vec{\Phi}_T^p(\vec{x})$	$V m^{-1}$	Einhüllende der elektrischen Feldstärke

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\Phi_{\text{th},i}(\vec{x})$	W m^{-3}	Wärmequellen und Wärmesenken in einem Volumenelement
χ	-	Suszeptibilität
ψ	°	Kippwinkel der Isopermittivitätsebenen im VBG; Transmissionsgitter: $\psi = 0^\circ$; Reflexionsgitter: $\psi = 90^\circ$
$\vec{\Psi}_{\text{T}}^p(\vec{x})$	V m^{-1}	Transversale elektrische Feldstärke der Frequenz ω_p
ω, ω_p	m^{-1}	Kreisfrequenz, diskrete Kreisfrequenz Nr. p
Ω	-	Dimensionslose Gitterkennzahl zur Beschreibung des Beugungsregimes
A	-	Vergrößerungsfaktor einer Abbildung
$\vec{A}_L(z)$	V m^{-1}	Elektrische Feldstärke der Beugungsordnung L
$A_L(z)$	V m^{-1}	Amplitude der elektrischen Feldstärke der Beugungsordnung L
$A_{L,M}(z)$	V m^{-1}	Amplitude der elektrischen Feldstärke der Beugungsordnung L und der Polarisationsrichtung M
$A_{m,p}$	V m^{-1}	Amplitude der elektrischen Feldstärke einer Normalmode mit den Modenindizes $[m, p]$
$A_{\text{R}}, A_{\text{O}}$	V m^{-1}	Amplituden der elektrischen Feldstärke von Referenz- und Objektwelle
b_{TRS}	mm	Stufenbreite eines Treppenspiegels zur Strahltransformation
B	$\text{W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$	Brillanz
$\underline{B}(\theta, \lambda)$	-	Bildmatrize
B_{P}	mm	Breite eines thermoelektrischen Moduls
B_{sp}	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Koeffizient der spontanen Emission
c, c_0	m s^{-1}	Lichtgeschwindigkeit im Medium, Vakuumlichtgeschwindigkeit $c_0 = 299792458 \text{ m s}^{-1}$
$c, c_{\text{R}}, c_{\text{S}}$	-	Projektionsparameter zur Energieerhaltung der CWT
c_{th}	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität
d	m	Geometrische Höhe eines Filmwellenleiters
D	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	Diffusionskoeffizient der Ladungsträger
d_{F}	m	Kerndurchmesser einer Stufenindexfaser
dn	-	Brechzahldifferenz diskretisierter VBG gemäß [6]
d_{Q}	m	Dicke eines Quantenfilms
d_{ST}	m	Dicke einer dielektrisch beschichteten Strahlteilerplatte
d_{VBG}	m	Dicke eines Glassubstrats, welches ein VBG beinhaltet
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	-	Einheitsvektoren
E	J	Energie
$\vec{E}(\vec{r}),$	V m^{-1}	Elektrische Feldstärke
$E(x, y, z)$		
$\vec{E}_{\text{B,D}}(x, y, z, t)$	V m^{-1}	Elektrische Feldstärke der gebeugten elm. Strahlung
E_{c}	J	Minimale Energie des Leitungsbandes eines Halbleiters, von engl.: conduction band
$E_{\text{g},i}(T)$	J	Bandlückenenergie im Medium i , von engl. energy gap
$\vec{E}_{\text{I}}(x, y, z, t)$	V m^{-1}	Elektrische Feldstärke der (einfallenden) elektromagnetischen Inzidenzstrahlung

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$E_{m,p}$	V m^{-1}	Elektrische Feldstärke einer Normalmode mit den Modenindizes $[m, p]$
E_P	J	Pulsenergie
E_{ph}	J	Energie eines Photons
$\vec{E}_T(x, y, z, t)$	V m^{-1}	Elektrische Feldstärke der transmittierten elektromagnetischen Strahlung
E_v	J	Maximale Energie des Valenzbandes eines Halbleiters
F	-	Füllfaktor bei der Anordnung von Diodenlaserstrahlung in Barren und Stapeln
F	J cm^{-2}	Fluenz eines Bestrahlungsprozesses
$\hat{\vec{F}}(k_x, k_y)$	V m^{-1}	Fourier-transformierte Feldstärke
f_e	-	Fermi-Dirac Verteilung für Elektronen
f_h	-	Fermi-Dirac Verteilung für Löcher
f_i	m	Brennweite, insbesondere f_{FA} : Brennweite zur Kollimation der vertikalen Achse (engl. Fast Axis), f_{SA} : Brennweite zur Kollimation der lateralen Achse (engl. Slow Axis), f_{FL} : Brennweite einer Fokussierlinse, f_{CL} : Brennweite einer Kollimationslinse (engl. Collimation Lens)
F_τ	J cm^{-2}	Fluenz, bezogen auf die Dauer eines Laserpulses mit Pulsdauer τ
$g(\omega, N, T)$	m^{-1}	Verstärkungs- und Absorptionsfunktion eines Halbleiterlasers, von engl. gain
$G(\theta)$	-	Normierte, angulare Intensität
$\underline{G}$	-	Matrixoperator, 4×4
$G_{m,p}$	-	Verstärkung der Normalmode mit den Indizes $[m, p]$
h	J s	Plancksches Wirkungsquantum, $6,62606957 \cdot 10^{-34} [\text{J s}]$
H	-	Normierte spektrale Intensitätsfunktion
$HR_{s,p}$	%	Reflexionsgrad dielektrischer Spiegel für s- und p-polarisierte Inzidenzstrahlung
i	-	Laufindex
$I(x, y)$	W cm^{-2}	Intensität
j	-	Imaginäre Einheit sowie Laufindex
J	A	Injektionsstrom (engl. injection current)
J_I	A m^{-3}	Injektionsstromdichte
J_{th}	A	Schwellstrom (engl. threshold injection current)
$\vec{k}$	m^{-1}	Wellenvektor
$\vec{K}$	m^{-1}	Gittervektor
k_0	m^{-1}	Wellenzahl im Vakuum
k_{eff}	m^{-1}	Effektive Wellenzahl in einem Filmwellenleiter
$\vec{k}_{i,L}$	m^{-1}	Wellenvektor am VBG in der Region i , mit der Beugungsordnung L
$k_{x,y,z}$	m^{-1}	Komponente des Wellenvektors
$K_{x,y,z}$	m^{-1}	Komponente des Gittervektors
l	mm	Geometrische Resonatorlänge eines Diodenlaserresonators, bzw. Strecke zwischen der Frontfacette und der Rückfacette
L	-	Beugungsordnung bei der Beugung elektromagnetischer Strahlung am VBG

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$L, \hat{L}$	-	Linearer Operator und Fourier-transformierter linearer Operator
L_I, L_{II}	nm	Schichtdicke eines diskretisierten VBG gemäß [6]
l_{koh}	mm	Kohärenzlänge
l_{Modul}	m	größte Abmessung eines Diodenlaser- oder Multiplexermoduls
L_P	mm	Länge eines thermoelektrischen Moduls
l_{tot}	-	Umlaufverluste in einem Resonator je Umlauf, von engl. total resonator loss
m	-	Modenindex für longitudinale Moden
$\underline{M}, \underline{M}_T$	-	Strahltransfermatrix
M_i^2	-	Beugungsmaßzahl in Richtung i
m_r	kg	Reduzierte Masse der Elektronen-Löcher
M_{TRS}	-	Anzahl der Stufen eines Treppenspiegels zur Strahltransformation
$\vec{n}$	-	Oberflächennormalenvektor eines VBG
N, M	-	Anzahl der Emitter je Barren, Stapel oder Array; sowie Anzahl der Isopermittivitätsebenen eines VBG. Ebenso Differenz der Isopermittivitätsebenen und Anzahl von VBG in einem Multiplexer.
N	nm^{-1}	Spektrale Kanaldichte
$N(\vec{x}, t)$	m^{-3}	Inversionsdichte
n_I, n_{II}	-	Konstanter Brechungsindex einer Schicht eines diskretisierten VBG, siehe [6]
N_ω	-	Anzahl diskreter Kreisfrequenzen ω_p
NA	-	Numerische Apertur
n_{ac}	-	Brechungsindex der aktiven Zone eines Diodenlasers
$N_{\text{Ce}^{3+}/4+}$	-	Konzentration der Elemente Ce^{3+} oder Ce^{4+}
N_{DWDM}	-	Anzahl der Strahlquellen bei dichter spektraler Leistungsskalierung, engl. Dense Wavelength Division Multiplexing
n_{eff}	-	Effektiver Brechungsindex
n_i	-	Brechungsindex des Mediums Nr. i . Zur Herstellung der VBG gilt Umgebungsmedium: $i = 0$, Quarzglaseinspannung: $i = 1$, Immersionsöl: $i = 2$, VBG-Substrat: $i = 3$
n_{Kerr}	-	Kerr-Koeffizient
N_P	-	Anzahl von Laserpulsen
n_{ref}^i	-	Brechungsindex in der Raumrichtung $i = x, y, z$
n_{ST}	-	Brechungsindex einer Strahlteilerplatte
$\vec{o}$	m	Oberflächennormale
OPD	nm	Wellenfrontdeformation, von engl. Optical Path Difference
p	-	Modenindex für transversale Moden
p	μm	Schwerpunkt Abstand zweier Emitter in einem Diodenlaserbarren, von engl. pitch
P_B	W	Am VBG gebeugte Leistung

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$P_{\text{EE}}, P_{\text{Stack}},$	W	Optische Ausgangsleistung eines Diodenlaser-Einzelemitters und eines Diodenlaserstapels, eng. Stack
$P_i(\lambda, \theta_V, \theta_l)$	W	Winkel- und wellenlängenabhängige optische Leistung der Strahlquelle mit Index i
P_{int}	W	In einem Resonator umlaufende mittlere Leistung
$\vec{p}_{L,M}$	m	Polarisationsvektor der Beugungsordnung L
P_{opt}, P_i	W	Optische Leistung und optische Leistung der Strahlquelle mit Index i
P_{out}	W	Aus einem Resonator ausgekoppelte optische Leistung
P_{T}	W	Am VBG transmittierte Leistung
P_{V}	W	Verlustleistung
q	C	Elementarladung
q_i	m	Komplexer Strahlparameter
Q	-	Dimensionslose Gitterkennzahl zur Beschreibung des Beugungsregimes
Q_{th}	W	Wärmeleistung
$\vec{r}$	m	Ortsvektor
$\vec{R}(z)$	V m ⁻¹	Elektrische Feldstärke der Referenzwelle
R_{el}	Ω	Elektrischer, ohmscher Widerstand
$r_{i,j}$	-	Reflexionskoeffizient an der Grenzfläche zwischen Regime i und j
R_i	-	Reflexionsgrad der optischen Oberfläche des Elements i
$R_{\text{sp}}(\omega, N, t)$	m ⁻³	Photonendichte der spontanen Emission
R_{th}	K W ⁻¹	Thermischer Widerstand
s	mm	Injektionsstrombreite eines Einzelemitters
s	mm	Abstand der virtuellen Spiegelebene eines VBG relativ zur Gitteroberfläche
S	W cm ⁻² sr ⁻¹	Strahldichte
$S(k_x, k_y)$	V m ⁻¹	elektrische Feldstärke der Signalwelle
$S(\vec{x}, t)$	m ⁻³	Photonendichte
$\vec{S}(z)$	V m ⁻¹	elektrische Feldstärke der Signalwelle
s_{Barren}	μm	Höhenschlagfehler eines Diodenlaserbarrens, von engl. smile error
SG	-	Super-Gauß-Faktor
S_{L}	-	Faktor zur Berücksichtigung der Abweichungen von der idealen Linsenform der Kollimationslinse in vertikaler Achse
t	s	Zeit
T	s	Belichtungsdauer
T, T_{oc}	-	Transmissionsgrad (allgemein) und Transmissionsgrad des Auskoppelspiegels eines Laserresonators
$T(\vec{x}, t)$	K	Temperatur einer elektro-optischen Schicht des Halbleiterlasers
T_0	K	Umgebungstemperatur
T_{g}	K	Transformationstemperatur eines Glases
$t_{i,j}$	-	Transmissionskoeffizient an der Grenzfläche zwischen Regime i und j
T_i	K, °C	Temperatur des Elements i oder der Temperstufe Nr. i

Zeichen	Einheit	Bedeutung
T_S	-	Schmelztemperatur
T_{VBG}	-	Transmissionsgrad eines VBG durch Absorption des Substratmaterials bei Nichterfüllung der Braggbedingung
T_{VBG}	K, °C	Mittlere Temperatur eines VBG
U	V	Spannung
$U_O(x, y, z)$	V m ⁻¹	Feldstärke der elektromagnetischen Objektwelle
$U_R(x, y, z)$	V m ⁻¹	Feldstärke der elektromagnetischen Referenzwelle
v	m min ⁻¹	Vorschub-, oder Ablenkgeschwindigkeit
V	-	Ellipsität, bzw. Strahlradiusvergrößerung bei der Herstellung der VBG im Index-Match Verfahren.
V	-	Interferenzkontrast
W	m	Transversale Breite eines Kantenemitters
$w_{0,i}$	m	Radius der Strahltaile in Raumrichtung i ; l : laterale Achse; v : vertikale Achse
w_s	m	Projizierter Strahlradius
$\vec{x}$	m	Ortsvektor
X	mm	Abstand zwischen Symmetrieachse des VBG-Substrats und dem Aufpunkt der Inzidenzlaserstrahlung auf der Quarzglaseinspannung beim Herstellungsprozess der VBG
z	m	Ortskoordinate in Propagationsrichtung
z_R	m	Rayleighlänge

Die in der Beugungstheorie verwendeten Vektoren sind konsistent indiziert gemäß $\vec{V}_{R,L,P}$ mit dem Index R für die Region, der Beugungsordnung L und der Polarisationsrichtung P .

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AFM	Rasterkraftmikroskop, von engl. Atomic Force Microscope
AZ	Azylinderlinse
B	Aperturblende eines optischen Systems
BFL	Schnittweite einer Linse, von engl. Back Focal Length
BPP	Strahlparameterprodukt, von engl. Beam Parameter Produkt
CCD	CCD-Sensor, von engl. Charge Coupled Device
cw	Kontinuierlich emittierend, von engl. continuous wave
CWDM	Spektrale Leistungsskalierung mit Zentralwellenlängenabstand > 15 nm, von engl. Coarse Wavelength Division Multiplexing
CWT	Beugungstheorie der gekoppelten Wellen von engl. Coupled Wave Theory
DBR	Distributed Bragg Reflektor - Laser
DDL	Durchstimmbarer Diodenlaser
DFB	Distributed Feedback - Laser
DOP	Polarisationsgrad, von engl. Degree Of Polarization
DSC	Eigenname einer Technik zur spektralen, inkohärenten Leistungsskalierung, engl. Dense Spectral Combining, [7]
DWDM	Dichte, spektrale Leistungsskalierung mit Zentralwellenlängenabständen < 3 nm, von engl. Dense Wavelength Division Multiplexing
ECL	Diodenlaser mit externem Resonator, von engl. External Cavity Laser
EFL, f, F	Effektive Brennweite, von engl. Effective Focal Length
FA	Vertikale Achse eines Diodenlasers, von engl. Fast Axis
FAC	Kollimation der vertikalen Achse, von engl. Fast-Axis Collimation
FWHM	Halbwertsbreite, von engl. Full Width Half Maximum
G2T	Optischer Konverter, der aus einer Gauß-förmigen Intensitätsverteilung eine homogenisierte Intensitätsverteilung generiert, von engl. Gauß-to-Tophat
HPDL	Hochleistungsdiodenlaser, von engl. High Power Diode Laser
KP	Keilplatte (optisches Element)
KS	Klappspiegel
LMA	Large Mode Area
LP	Linienpaar, zur Bestimmung der Grenzauflösung eines optischen Systems
MTF	Modulationsübertragungsfunktion, von engl. Modulation Transfer Function
PP	Planparallel polierte Platte aus Glas
PTR	Photo-Thermo-Reaktiv, Eigenschaft von Gläsern
qcw	Quasi-kontinuierlich emittierend, von engl. quasi continuous wave
RCWA	Theorie der rigorosen Analyse durch gekoppelte Wellen; von engl. Rigorous Coupled Wave Analysis
RMS	Quadratischer Mittelwert, Effektivwert, von engl. Root Mean Square
RT	Rotationstisch für optische Elemente
SA	Laterale Achse eines Diodenlasers, von engl. Slow Axis

Abkürzung	Bedeutung
SAC	Kollimation der lateralen Achse, von englisch Slow-Axis Collimation
SCH	Separiert geführte Heterostruktur, von engl. Separate Confinement Heterostructure
SK	Schnittweitenkorrektur eines optischen Systems
ST	Strahlteiler
STR	Strahltaile
SVE	Vernachlässigbar kleine Änderung der Einhüllenden der elektrischen Feldstärke, von engl. Small Varying Envelope
VBG	Volumenbeugungsgitter bzw. Volumen-Bragg-Gitter, engl. Volume Bragg Grating
VBG-FAC	Kollimation der vertikalen Achse, von engl. Fast-Axis Collimation, mit integriertem Volumenbeugungsgitter
WA-FD-BPM	Methode zur Propagation elektromagnetischer Felder mit vergleichsweise großen Winkeln mit Hilfe der Finite Differenzen Methode, engl. Wide Angle - Finite Diffraction - Beam Propagation Method
WBC	Eigenname einer Technik zur spektralen, inkohärenten Leistungsskalierung, engl. Wavelength Beam Combining, [8]