

Markus Lindemann

Ultraschnelle Spin-Laser für die nächste Generation der optischen Datenübertragung



Springer Vieweg

Ultraschnelle Spin-Laser für die nächste Generation der optischen Datenübertragung

Markus Lindemann

Ultraschnelle Spin-Laser für die nächste Generation der optischen Datenübertragung

 Springer Vieweg

Markus Lindemann
Photonik und Terahertztechnologie
Ruhr-Universität Bochum
Bochum, Deutschland

Ultraschnelle Spin-Laser für die nächste Generation der optischen Datenübertragung: Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Ruhr-Universität Bochum.

Vorgelegt durch Markus Lindemann aus Mülheim an der Ruhr.

1. Bericht: Prof. Dr. Martin Hofmann
2. Bericht: Prof. Dr. Rainer Michalzik

Tag der mündlichen Prüfung: 22. März 2019

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) –
Projektnummer: 250699912.

ISBN 978-3-658-28521-0 ISBN 978-3-658-28522-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-28522-7>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Während meiner Doktorarbeit habe ich die Hilfe und Unterstützung vieler Personen erfahren. Dafür möchte ich mich herzlichst bedanken! Mein besonderer Dank gilt Martin Hofmann für seine umfangreiche Unterstützung bei meiner Dissertation, die Übernahme des Erstgutachtens und die Unterstützung auch außerhalb der Promotion, sowie Rainer Michalzik für die Übernahme des Zweitgutachtens und die hilfreichen Diskussionen zum VCSEL. Besonders möchte ich auch Nils Gerhardt für seine große Geduld bei jeglichen Diskussionen rund um die Physik seit Anbeginn meines Elektrotechnikstudiums, für seine große Motivationsfähigkeit und für seine Begeisterung für den Spin-VCSEL danken. Ich danke Igor Žutić für die Möglichkeit, einen Forschungsaufenthalt in seiner Gruppe an der *State University of New York* in Buffalo verbringen zu können und für seinen erheblichen Einsatz beim Publizieren von Ergebnissen. Ich danke Tobias Pusch für die Entwicklung und Herstellung der hervorragenden VCSEL-Proben, ohne die große Teile meiner Dissertation gar nicht möglich gewesen wären, sowie Gaofeng Xu für die gute Zusammenarbeit in unserem Projekt. Weiterhin gebührt Dank Markus Burghard, Sebastian Gassel und Krisztian Neutsch, die als studentische Mitarbeiter hervorragende Arbeit in Labor und Büro geleistet haben, Rouven Pilny und Benedikt Hofmeister für den Support bei evolutionären Algorithmen und FEM, für alle produktiven und unproduktiven Diskussionen und die langjährige Freundschaft. Ich danke Pierre Mayr für die Unterstützung durch Laborausrüstung und für das Prozessieren von Proben, Henning Höpfner und Natalie Jung für die Unterstützung zu Beginn bzw. während der letzten Wochen meiner Promotionszeit. Ich danke Adamou Adinda-Ougba, Ali Alloush und Martin Saraceno für die gute Zeit im gemeinsamen Büro. Weiterhin möchte ich mich bedanken bei Nicole Lütkemöller und Stefan Boronowski (†) für ihre Hilfsbereitschaft bei chemischen und mechanischen Themen, bei Hauke Kuhlmann für die Unterstützung mit allen Formularen und Formalitäten sowie bei Carsten Brenner für alle inspirierenden Diskussionen. Weiterhin danke ich den aktuellen und ehemaligen Doktorandinnen

und Doktoranden am Lehrstuhl für Photonik und Terahertztechnologie für die gute Zusammenarbeit und eine hervorragende Arbeitsatmosphäre: Lena Göring, Vira Besaga, Marcel Lenz, Jens Möller, Rouven Pilny, Natalie Jung, Ali Alloush, Adamou Adinda-Ougba, Benjamin Döpke, Jared Ombiro-Gwaro, Nils Surkamp, Markus Finkeldey, Alexandra Gerling, Maxim Cherkashin, Krisztian Neutsch und Henning Höpfner. Besonderer Dank gilt meinen Eltern und Großeltern für ihre Unterstützung und Motivation solange ich denken kann und meiner Freundin Vera für ihre unendliche Liebe, Unterstützung und ihr Verständnis für meine langen Schreibabende zu Hause.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Optische Datenübertragung: Einführung	5
2.1.1	Halbleiterlaser	5
2.1.2	Intensitätsdynamik	7
2.1.3	Aktuelle Werte	11
2.1.4	Alternative Konzepte	12
2.2	Polarisation und ihre Messung	14
2.2.1	Stokes-Parameter	14
2.2.2	Müller-Kalkulus	15
2.2.3	Stokes-Polarimeter	16
2.3	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser	18
2.3.1	Aufbau	18
2.3.2	Doppelbrechung	19
2.3.3	Dichroismus	21
2.3.4	Polarisationsverhalten des VCSELs	21
2.4	Spin	23
2.4.1	Bahndrehimpuls, Eigendrehimpuls, Gesamtdrehimpuls	23
2.4.2	Optische Auswahlregeln	24
2.4.3	Spin-Relaxation	26
2.4.4	Spin-Transportlänge	28
2.5	Spin-Laser	29
2.5.1	Erweitertes Eimer-Modell	29
2.5.2	Spin-VCSEL	32
2.5.3	Polarisationsdynamik im Spin-VCSEL	35
2.6	Simulation der Laserdynamik	37
2.6.1	Spin-Flip-Modell	37
2.6.2	Bestimmung der Modell-Parameter	40

2.6.3	Zusammenfassung	41
3	Baustein (i): Kontrolle der Doppelbrechung	43
3.1	Grundlagen und Vorarbeiten	43
3.2	Experimenteller Aufbau	45
3.3	Neue Techniken	46
3.3.1	Punktweise Verspannung	46
3.3.2	Biegebalken-Methode	47
3.3.3	Piezoelektrisches Substrat	50
3.3.4	Thermisch induzierte Verspannung	50
3.4	Verspannung und Schwellstrom	51
3.5	Verspannung und Polarisaton	52
3.6	Zusammenfassung	54
4	Baustein (ii): Kontrolle der Polarisationsdynamik	57
4.1	Grundlagen und Vorarbeiten	57
4.2	Messaufbau	59
4.3	Polarisationsoszillation	62
4.4	Durchstimmen der PO-Resonanzfrequenz \tilde{f}_R über Δf	63
4.5	Zusammenfassung	67
5	Baustein (iii): Ultraschnelle Polarisationsdynamik	69
5.1	Grundlagen und Vorarbeiten	69
5.2	Messaufbau	69
5.2.1	Messbandbreite	70
5.2.2	Timing des Zeitfensters	71
5.3	Simulation	73
5.3.1	Generalisiertes Spin-Flip-Modell	73
5.3.2	Bestimmung des Parametersatzes	74
5.4	Messung	77
5.5	Amplitude der PO	79
5.6	Zusammenfassung	80
6	Baustein (iv): Polarisationsmodulation	83
6.1	Grundlagen und Vorarbeiten	83
6.2	Messaufbau	84
6.2.1	Theoretische Analyse der Polarisationsmodulation	86
6.2.2	Vermessung der Stabilität	90
6.3	Messung der Modulationsbandbreite	91
6.4	Performance-Vergleich von konventionellem und Spin-VCSEL	93
6.4.1	Konventionelle Intensitätsmodulation	93

6.4.2	Alternative: Polarisationsmodulation	95
6.5	Zusammenfassung	103
7	Baustein (v): Datenübertragung	105
7.1	Das Augendiagramm	105
7.2	Vorarbeiten	106
7.3	Ergebnisse	107
7.4	Analyse des Energiebedarfs	108
7.5	Zusammenfassung	110
8	Baustein (vi): Spin-VCSEL in der Anwendung	113
8.1	Elektrisch gepumpte Spin-Laser	113
8.1.1	Elektrische Spin-Injektion in Halbleiter	113
8.1.2	Realisierte Spin-Laser bei 300 K	117
8.1.3	Realisierte Spin-VCSEL	118
8.2	Neues Konzept für elektrisch gepumpte Spin-VCSEL bei 300 K	119
8.2.1	Grundlagen und Ziele	119
8.2.2	High-Contrast-Grating VCSEL	120
8.2.3	Semiconductor-Metal High-Contrast-Grating VCSEL	123
8.2.4	Semiconductor-Metal High-Contrast-Grating Spin-VC- SEL	123
8.3	Zusammenfassung	126
9	Zusammenfassung und Ausblick	127
A	Anhang	131
A.1	Einfluss des Pumpstroms auf \tilde{f}_R	131
A.2	Datenübertragung mittels Schalten der PO	133
A.3	Abschätzung der PO-Amplitude aus dem Spektrum	135
	Literaturverzeichnis	137

Glossar

Bo o. Beugungsordnung. 71

B1 1. Beugungsordnung. 70

CC Coupled cavity. 13

DR Distributed Reflector. 13

DUT Device under test. 45

EAM Elektroabsorptionsmodulator. 13

EOM Elektrooptischer Modulator. 13

Fe/Tb Eisen/Terbium-Schichtstapel. 116

FeCo Eisen-Cobalt-Legierung. 116

FEM Finite-Elemente-Methode. 47

FePt Eisen-Platin-Legierung. 116

GaAs Gallium-Arsenid. 18

HCG High-Contrast Grating. 120

HWHM Half-Width at Half-Maximum. 21

IM Intensitätsmodulation. 7

InAlGaAs/InP Indium-Aluminium-Gallium-Arsenid/Indium-Phosphid. 92

InAs Indiumarsenid. 118

-
- IRO** Intensitäts-Relaxationsoszillation. 8
- L-Mode** Mode im Lasing-Betrieb. 19
- LB** Leitungsband. 25
- LIV** Charakterisierung nach Lichtintensität (L), Strom (I) und Spannung (V). 109
- LL** Leichtlochband. 25
- LP** Linearpolarisator. 61
- LZ** Linkszirkular. 25
- LZP** Linkszirkular polarisiert. 25
- MCD** Magnetischer zirkularer Dichroismus. 118
- MgO** Magnesiumoxid. 115
- MnAs** Manganarsenid. 119
- MQW** Multi-Quantum-Well, Multi-Quantenfilm. 18
- MTF** Modulationstransferfunktion. 8
- NL-Mode** Mode im Nicht-Lasing-Betrieb. 19
- OSA** Optischer Spektrum-Analysator. 19
- PBS** Polarization dependent beam splitter. 84
- PC** Polarization controller. 84
- PM** Polarisationsmodulation. 35
- PO** Polarisationsoszillation. 59
- PS-Punkt** Polarisations-Schaltpunkt. 21
- PtCo** Platin-Cobalt-Legierung. 116
- QP** Quantenpunkte. 119

RZ Rechtszirkular. 25

RZP Rechtszirkular polarisiert. 25

SFM Spin-Flip-Modell. 37

SFPI Scanning Fabry-Pérot Interferometer. 21

SL Schwerlochband. 25

SO Split-off-Band. 26

SW Subwavelength. 120

TWEAM Traveling Wave EAM. 14

VCSEL Vertical-cavity surface-emitting laser. 2

Abbildungsverzeichnis

2.1	Der Laser und seine Funktionsweise.	6
2.2	Exemplarischer Verlauf einer Modulationsantwort für IM. .	10
2.3	Entwicklung der erreichten Modulationsbandbreite von intensitätsmodulierten VCSEL.	13
2.4	Aufbau eines Stokes-Polarimeters mit rotierender Viertelwellenplatte.	17
2.5	Schnitt durch eine vertikal emittierende Halbleiterlaserdioden (VCSEL).	19
2.6	Spektrale Eigenschaften eines VCSELs.	20
2.7	Mögliche Werte der z-Komponente des Drehimpulsvektors.	25
2.8	Optische Übergänge während der Absorption oder Emission eines RZ (LZ) polarisierten Photons in schwarz (grau) und die zugehörigen Übergangswahrscheinlichkeiten (im Kreissymbol) am Γ -Punkt in Volumenmaterial-GaAs.	27
2.9	Wassereimer-Modell und seine Erweiterung für Spin-Laser.	31
2.10	Erläuterung der Polarisationsoszillation.	36
3.1	Grundlegender experimenteller Aufbau zur Analyse der Polarisation des VCSELs.	45
3.2	Kontrolle der Doppelbrechung durch punktweise anisotrope Einleitung von Verspannung: Aufbau.	46
3.3	FEM-Simulation zur Verspannung.	48
3.4	Kontrolle der Doppelbrechung durch punktweise anisotrope Einleitung von Verspannung: Messung.	48
3.5	Prinzip-Skizze der Biegebalken-Methode.	49
3.6	Kontrolle der Doppelbrechung durch Verspannung auf Biegebalken.	50
3.7	Kontrolle der Doppelbrechung durch thermische Verspannung.	52
3.8	Schwellstrom-Reduktion durch Verspannung.	53

3.9	Vermessung der statischen Polarisation.	55
4.1	Grundlegender experimenteller Aufbau zur Analyse des VCSEL-Verhaltens.	60
4.2	Experimenteller Aufbau zur Erzeugung der optischen Pumpstrahlung.	61
4.3	Beispielhafte vollständige dynamische Stokes-Polarimetrie.	63
4.4	Kontrolle der Polarisationsoszillation über die Verspannung und somit über die Doppelbrechung.	64
4.5	Messung und Simulation von Modenaufspaltung und PO-Frequenz.	66
4.6	Polarisationsoszillation unter Variation der thermisch eingebrachten Leistung zur Verspannung.	67
5.1	Messbandbreite der Streak-Kamera für diverse Operationsparameter.	71
5.2	Positionierung des Zeitfensters.	72
5.3	Bestimmung des Dichroismus.	76
5.4	Polarisationsverhalten des Spin-VCSELS.	78
5.5	Amplitude der PO in Abhängigkeit der Modenaufspaltung.	80
6.1	Experimenteller Aufbau zur Erzeugung der optischen Pumpstrahlung.	84
6.2	Resultierende Modulation bei harmonischem Eingangssignal.	88
6.3	Resultierende Modulation bei harmonischem Eingangssignal mit verschiedenen $ \delta_0 > 0$ und $\hat{\delta} = 3\pi/8$	89
6.4	Fluktuation des Offsets δ_0 des zirkularen Polarisationsgrades.	90
6.5	Polarisations-Modulationsantworten für verschiedene Modenaufspaltungen.	92
6.6	Steigerung der Modulationsbandbreite für IM und PM.	96
6.7	Simulation der Polarisations-Modulationsantwort für realistische Pumpströme bei $\gamma_p/\pi = 200$ GHz.	98
6.8	Einfluss des Dichroismus.	99
6.9	Einfluss der Spin-Flip-Rate.	101
6.10	Fehlerhaftes Ausgangssignal bei zu kleiner Spin-Flip-Rate.	102
7.1	Details zur Erzeugung und Analyse von Binärsignalen für die optische Datenübertragung.	107
7.2	Augendiagramme für IM und PM.	108
7.3	Energie-Effizienz gemessen über die <i>Heat-to-Data-Ratio</i>	109

8.1	Spin-polarisierte Zustandsdichte $DOS_{\uparrow\downarrow}$ in einem ferromagnetischen Metall.	114
8.2	Beispielhafte Schichtfolge eines Spin-Injektionskontaktes mit Fe/Tb-Schichtstapel und MgO-Tunnelbarriere für das GaAs-Materialsystem.	116
8.3	Prinzip-Skizzen von konventionellem VCSEL und HCG-VCSEL im direkten Vergleich.	122
8.4	Semiconductor-Metal HCG-(Spin-)VCSEL.	124
A.1	Abhängigkeit der PO-Frequenz \tilde{f}_R vom Pumpstrom für sechs Werte der Verspannung.	132
A.2	Zwei-Puls inverse Modulationsbandbreite und Einzel-Puls-Referenzmessung.	134

Tabellenverzeichnis

4.1	Parameter für das Spin-Flip-Modell.	65
5.1	Messbandbreite der Streak-Kamera für diverse Parameter. .	72



1 Einleitung

Das Internet ist ein weltweiter technischer Flickenteppich und basiert teils noch auf Telefon-Technologie, die viele Jahre alt ist [1]. Kupferleitungen werden inzwischen durch die vorteilhaften Glasfasern für optische Datenübertragung ersetzt. Dies ermöglicht eine höhere Bandbreite und längere Übertragungsstrecken [2]. Trotzdem nähert sich der Bedarf an Bandbreite der verfügbaren Kapazität an und übersteigt diese sogar zeitweise [1]. Die erwartete immense Steigerung des Volumens der weltweit übertragenen Daten wird auf eine Verdreifachung in den fünf Jahren bis 2021 beziffert [3]. Die Bereitstellung von stabilem Internet mit steigenden Bandbreiten wird als kritische Voraussetzung für die weitere digitale Revolution [1] und als erheblicher Wirtschaftsfaktor gesehen [4], sodass ein hohes Interesse an der Verfügbarkeit von Komponenten mit hoher Übertragungskapazität besteht.

Ein großer Teil der optischen Breitband-Datenübertragung findet innerhalb von Rechenzentren zwischen den einzelnen Servern statt. Über drei Viertel des gesamten Datenaufkommens eines Rechenzentrums fällt auf diesen internen Kurzstrecken-Übertragungen an [5]. Der Energieverbrauch aller Rechenzentren stellte 2010 einen signifikanten Anteil von 1,3% am gesamten weltweiten Energieverbrauch dar [6] und weist eine steigende Tendenz auf. Beispielsweise erwartet eine Studie, dass in den USA in 2020 die Energieproduktion von 50 Großkraftwerken allein fürs Betreiben von Rechenzentren benötigt wird und somit immense Kosten und Umweltbelastungen durch Rechenzentren entstehen [7]. Ein großer Anteil dieser Energie wird für die Übertragungsstrecken benötigt [8].

Im Gegensatz zu optischen Transmittern für Langstreckenverbindungen zwischen den Rechenzentren, die auf möglichst hohe Übertragungsraten optimiert werden, ergeben sich die Anforderungen an die optischen Transmitter für die zahlreichen Kurzstrecken-Verbindungen anders. Hier sind eine möglichst integrierte Bauweise und eine gute Energie-Effizienz nötig, wobei unter den gegebenen Voraussetzungen die maximale Übertragungsrate erreicht werden soll.

Um diesen Anforderungen zu begegnen, werden heute üblicherweise direkt über den Pumpstrom modulierte Halbleiter-Laser verwendet, die vertikal aus der Oberfläche des Wafers emittieren [9]. Diese Laser werden vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) genannt. Vergleichbar zum grundlegenden Prinzip eines harmonischen Oszillators hat auch das über den Strom modulierte System aus gekoppelten Ladungsträger- und Photonendichten innerhalb dieses Lasers eine Resonanzfrequenz und eine sich daraus ergebende Modulationsbandbreite, die letztlich die Übertragungsrate bestimmt, mit der Daten gesendet werden können. Der aktuell höchste Wert für einen solchen VCSEL liegt bei einer Modulationsbandbreite von etwa 34 GHz [10]. Die Resonanzfrequenz ist abhängig von Materialparametern und Dimensionen. Für die Resonanzfrequenz ergeben sich im Design-Prozess des Lasers somit fundamentale Limitierungen. Außerdem besitzt der Arbeitspunkt einen Einfluss: Die Modulationsbandbreite steigt mit zunehmender Photonendichte, die über eine Steigerung des Pumpstroms erreicht werden kann. Die maximale Modulationsbandbreite wird daher auch durch die erforderliche Energie-Effizienz begrenzt.

Im folgenden Kapitel wird eine Übersicht über die Steigerung der erreichten Bandbreite direkt modulierter VCSEL über die letzten Jahre gegeben. Diese zeigt, dass die tatsächlich erreichte Bandbreite langsamer wächst als der Bedarf. Die Erforschung und Entwicklung alternativer Konzepte erscheint also dringend nötig, damit die digitale Revolution nicht ins Stocken gerät. In dieser Arbeit wird ein neues Konzept untersucht, das in einem sogenannten Spin-VCSEL angewendet werden kann und nicht den bisher genannten Limitierungen unterliegt. Im Gegensatz zu den konventionellen Konzepten, die sich auf die Modulation von Ladungsträger- und Photonendichte fokussieren, wird in Spin-Lasern der Ladungsträger- und Photonen-Spin genutzt [11, 12, 13, 14, 15, 16]. Über die Drehimpulserhaltung kann ein Ungleichgewicht im Ladungsträgerspin in eine Spin-Polarisation der Photonen und damit in eine zirkuläre Polarisation des durch den Laser emittierten Lichts umgewandelt werden [17]. Somit ist es möglich, über die Modulation der Spin-Polarisation eines Pumpprozesses die Polarisation des Lasers zu modulieren. Für die Modulation wird hierbei die Resonanz des gekoppelten Systems von Photonen- und Ladungsträger-Spin relevant, welche in dieser Arbeit durch die Resonanzfrequenz der Polarisationsdynamik dargestellt wird. Die konventionelle Limitierung der Resonanz des gekoppelten Systems von Ladungsträger- und Photonendichte, repräsentiert durch die Resonanzfrequenz der Intensitätsdynamik, entfällt hier vollständig.