

Modellierung des transienten Betriebsverhaltens EDFA-verstärkter optischer Übertragungstrecken unter Berücksichtigung des spektralen Lochbrennens

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Holtmannspötter
aus Warendorf

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung : 11. November 2016
Vorsitzender des Promotionsorgans : Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch
Gutachter : Prof. Dr.-Ing. B. Schmauß
Prof. Dr.-Ing. F. Küppers

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

Michael Holtmannspoetter

**Modellierung des transienten Betriebsverhaltens
EDFA-verstärkter optischer Übertragungsstrecken
unter Berücksichtigung des spektralen Lochbrennens**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5223-7

ISSN 1866-6043

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Wachstum des Datenvolumens optischer Netze	5
2.2	Erhöhung der Kapazität der Übertragungskanals	5
2.3	Erbium-dotierter Faserverstärker (EDFA)	7
2.4	Dynamische, transparente Netze	7
2.5	Herausforderungen für moderne optische Netze	8
3	Eigenschaften des EDFA	11
3.1	Elektronenniveaus des Erbiumions	12
3.2	Stark-Effekt	15
3.3	Verbreiterungsmechanismen	16
3.3.1	Homogen verbreiterte Übergänge	17
3.3.2	Inhomogen verbreiterte Übergänge	19
3.4	Gesamtprofile der Übergänge	20
3.5	Wechselwirkungsquerschnitte	22
3.5.1	Gesamtwechselwirkungsquerschnitt des Erbiumions in der Glasmatrix	23
3.6	Verstärkungsspektrum und Sättigung optischer Übergänge im Allgemeinen	25
3.7	Verstärkungsspektrum und Sättigung für den EDFA	26
3.7.1	Kompression und Sättigung	28
3.8	Verstärkungsprozess des EDFA	31
3.8.1	Vereinfachtes Termschema	31
3.8.2	Übergänge innerhalb des Erbiumions	34
3.8.3	Rauschen	35
3.9	Aufbau von Erbium-dotierten Faserverstärkern	40

3.9.1	Einstufiger Aufbau	40
3.9.2	Mehrstufiger Aufbau	41
3.9.3	Elektronischen Regelung	42
4	Einflüsse auf die spektrale Leistungsverteilung des Kanalmultiplex	47
4.1	Stimulierte Raman-Streuung (SRS)	48
4.1.1	Mechanismus des SRS bei Mehrkanaldatenübertragung	48
4.1.2	Einfluss der SRS auf die optische Übertragung	51
4.1.3	Integration des SRS in die Simulationsumgebung	52
4.2	Spektrales Lochbrennen (SHB)	54
4.2.1	Mechanismus des SHB im EDFA	55
4.2.2	Einfluss des SHB auf die optische Übertragung	58
4.2.3	Integration des SHB in die Simulationsumgebung	59
5	Ratengleichungen des EDFA	61
5.1	Standardmodell für EDFAs ohne SHB	61
5.1.1	3-Niveau-Ratengleichungen	61
5.2	Modelle für das spektrale Lochbrennen in EDFAs	65
5.2.1	Modell von E. Desurvire	66
5.2.2	Model M. Nishihara	67
5.2.3	Model von M. Bolshtyansky	68
5.3	3-Niveau-Modell für EDFAs mit SHB	71
5.3.1	Grundannahmen für die Herleitung	71
5.3.2	Eigenschaften der Abweichungsfunktion	73
5.3.3	Ratengleichungen der Einzel-Erbiumionen	76
5.3.4	Stationärer Zustand der Einzelionen	79
5.3.5	Mittelung des stationären Zustands der Einzelionen	80
5.3.6	Mittelung der Ratengleichungen der Einzelionen	91
5.3.7	Ratengleichungen für das 2-Niveau-Termschema	101
5.3.8	Isolierte Betrachtung des SHB	104
5.3.9	Betrachtung der Terme der Besetzungsdichten	109
5.3.10	Termschema für das SHB-Modell des EDFA	112
5.4	Fazit	113
6	Numerische Modellierung der Erbium-dotierten Faser	115
6.1	Implementierung des Rauschens	115

6.2	Numerische Lösung der Ratengleichungen des EDFA	117
6.2.1	Explizites Euler-Verfahren	117
6.2.2	Stationärer Zustand	118
6.2.3	Splittingverfahren	119
6.2.4	Dynamische Simulation	122
7	Heuristische Ermittlung der Kovarianzmatrix des spektralen Lochbrennens	125
7.1	Indirekter Ansatz	125
7.1.1	Methode der Differenzverstärkungsspektren	127
7.1.2	Vereinfachte Differenzspektrenmethode	131
7.1.3	Anfitten einer Zeile der SHB-Kovarianzmatrix	136
7.2	Messaufbau	140
7.2.1	Signalpfad	141
7.2.2	Pumppfad	141
7.2.3	Verstärkerpfad	142
7.2.4	Messpfad	142
7.3	Praxiseinsatz des heuristischen Verfahrens	143
7.3.1	Problemstellungen für die Messdatenerfassung	143
7.3.2	Lösungen für das eingangsseitige Spektrum	149
7.3.3	Lösungen für das ausgangsseitige Spektrum	158
7.3.4	Bestimmung der Parameter der EDF	161
7.3.5	Basislinie	166
7.4	SHB-Kovarianzmatrix	167
7.4.1	Symmetrie	168
7.4.2	Messung mit erhöhter Signaleingangsleistung als Vergleichswert	170
7.5	Fazit	174
8	Reaktion EDFA-verstärkter Übertragungsstrecken auf transiente Ereignisse	177
8.1	Auslösende Effekte und inhärente Zeitkonstanten	178
8.2	Dynamisches Verhalten des Verstärkergewinns eines einzelnen Verstärkers	180
8.2.1	Abhängigkeit von der Verstärkersättigung vor dem transienten Vorgang	181
8.2.2	Abhängigkeit von der Änderung des Gewinns	182

8.3	Verstärkerkaskaden	183
8.4	Gewinn-Regelung	185
8.5	Stimulierte Ramanstreuung als auslösender Effekt für Pegeltransienten	186
8.5.1	Dynamisches Verhalten	188
8.5.2	Bleibende Abweichungen nach transientem Ereignis	190
8.5.3	Gegenmaßnahmen	190
8.6	Spektrales Lochbrennen als auslösender Effekt für Pegeltransienten	191
8.6.1	Bleibende Abweichung nach transientem Ereignis	191
8.6.2	Dynamisches Verhalten	196
8.6.3	Gegenmaßnahmen	201
8.7	Optisches Übertragungssystem für Systemsimulationen	203
8.7.1	Hintergrund	203
8.7.2	Simulationsanordnung	204
8.7.3	Regelung	205
8.7.4	Gewinnglättungsfilter	206
8.7.5	Raman-Tilt-Filter	207
8.8	Fazit	208
9	Zusammenfassung	209
A	Fehlerabschätzung	213
	Literaturverzeichnis	219
	Bildverzeichnis	226
	Tabellenverzeichnis	234
	Summary	237
	Danksagung	241