Schaltdynamik und Rauschen von Laserdioden in optischen Sendern

Autor(en): **Jäckel, H. / Guekos, G. / Tenchio, G.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **70 (1979)**

Heft 15

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905405

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Schaltdynamik und Rauschen von Laserdioden in optischen Sendern

Von H. Jäckel, G. Guekos, G. Tenchio und R. Welter

621.38 : : 535 : 621.375.826.038.825;

In Laserdioden werden die Lichtsignale durch direkte Modulation des Diodenstromes erzeugt. Im GHz-Bereich machen sich dabei Resonanzerscheinungen im Modulationsfrequenzgang, Relaxationsoszillationen und Intensitätsrauschen des Lichtes störend bemerkbar. Bei älteren Laserdiodentypen treten zusätzlich ausgeprägte Modulations-Nichtlinearitäten, Selbstoszillationen und Excess-Rauschen auf. Neue Diodenstrukturen mit dielektrischer Führung des Lichts sind frei von diesen parasitären Effekten.

Dans des diodes laser, les signaux lumineux sont produits par modulation directe du courant de la diode. Dans la gamme des GHz, il en résulte des phénomènes perturbateurs de résonance dans la caractéristique de fréquence de la modulation, des oscillations de relaxation et du bruit d'intensité de la lumière. Avec les anciens types de diodes laser, il se produit en outre de nettes non-linéarités de la modulation, des auto-oscillations et un bruit excessif. Les nouvelles structures de diodes à guidage diélectrique de la lumière sont exemptes de ces effets parasitaires.

1. Einleitung

Der GaA1As-Doppelheterostruktur-Diodenlaser darf zurzeit wohl als wichtigster Sender für optische Kommunikationssysteme bezeichnet werden. In einer fast ein Jahrzehnt dauernden Entwicklungsphase wurde dieses Element zu einem leistungsfähigen, kommerziell verwendbaren optoelektronischen Bauteil perfektioniert. Im Gegensatz zu den Doppelheterostrukturlasern der ersten Generation verfügen die heutigen Laser über einen eingebetteten dielektrischen Wellenleiter im Dioden-pn-Übergang, dessen Eigenschaften im folgenden noch näher erläutert werden. Diese modernen Strahlungsquellen mit Emissions-Wellenlängen im nahen Infrarotbereich (800...900 nm) bieten folgende Vorteile:

1. Einfache Modulation. Die Lichtintensität ist bis in den GHz-Bereich hinauf direkt proportional zum Diodenstrom. Dank der steilen Licht-Strom-Kennlinie bewirkt eine kleine Veränderung des Diodenstromes eine relativ starke Modulation der Lichtintensität.
2. Kompaktheit, geringes Volumen.
3. Einzelne Bauformen emittieren bereits bei relativ geringen Betriebsströmen (20 mA).
4. Die äusserst kleine Emissionsfläche (μm-Bereich) erlaubt eine wirksame Einkopplung der Strahlung in optische Fasern.
5. Das optische Intensitätsspektrum ist sehr schmal. Diese Eigenschaft verbessert die Laufzeit-Dispersion in einem fiberoptischen System.

Die Lebensdauer von Laserdioden ist allerdings noch nicht so gut wie zum Beispiel diejenige der Leuchtdioden (LED), doch stehen bereits kommerzielle Bauelemente mit projektierter Lebensdauer bis zu 10^5 h zur Verfügung. Eine stetige Steigerung der Lebensdauer durch technologische Verbesserungen ist weiterhin zu erwarten.

Im folgenden soll besonders auf zwei für den nachrichtentechnischen Einsatz der Laser wichtige Aspekte eingegangen werden: das Modulations- und das Rauschverhalten der Halbleiter-Diodenlaser. Im besonderen wird gezeigt, inwieweit gewisse Nichtidealitäten älterer Laserdiodentypen, ohne laterale dielektrische Modeführung, mit neuesten Diodenbauformen weitgehend beseitigt werden können.

2. Streifenkontakt-Doppelhetero-Diodenlaser

Wie aus Fig. 1 zu entnehmen ist, weist dieser Diodentyp eine Mehrschicht-Sandwichstruktur der Halbleitermaterialien GaAs und GaA1As auf. Zwischen den beiden dickeren GaA1As-Schichten liegt eine sehr dünne GaAs-Schicht (0,1 μm). Diese Schicht, in der die eigentliche Lichterzeugung durch strahlende Rekombination der injizierten Elektronen und Löcher stattfindet, wird als aktive Schicht des Lasers bezeichnet.

Die Doppelheterostruktur erlaubt, die Minoritätsträgerdichte unter Stromfluss durch die Diode bis weit über die Gleichgewichtskonzentration der Majoritätsträger zu vergrössern [1]. Dieses extreme thermodynamische Ungleichgewicht bewirkt, dass die stimulierte Emission von Photonen die optische Absorption des Materials übertrifft. Die dünne GaAs-Schicht verhält sich somit für optische Strahlung, deren Photonenenergie etwa dem Dioden-Bandabstand entspricht, verstärkend. Da sich die aktive Schicht beim Laser zwischen zwei parallelen, senkrecht zur aktiven Schicht stehenden Spiegeln befindet (*Fabry-Perot*-Resonator), kann sich bei genügend hoher Stromdichte aus der spontanen Photonenemission eine monochromatische optische Welle in der Resonatorstruktur aufbauen. Diese resonante Feldstruktur wird als Resonatormode oder Lasermode bezeichnet.

Der wesentliche Vorteil der Doppelheterostruktur wird aus dem Bändermodell für einen in Vorwärtsrichtung gepolten Diodenlaser in Fig. 2 offensichtlich. Im Gegensatz zu Homostruktur-Übergängen, wo die injizierten Minoritätsträger bis zur Rekombination um mehrere μm (Diffusionslänge) vom pn-Übergang fortdiffundieren, unterbinden die eingebauten Potentialbarrieren in der Doppelheterostruktur eine Ausdiffusion der Träger aus der aktiven Schicht. Somit lassen sich schon mit geringen Diodenströmen hohe optische Verstärkungen der

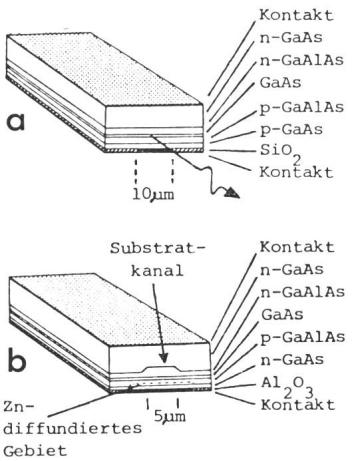

Fig. 1 Strukturen der untersuchten GaAlAs-Doppelheterostruktur-Diodenlaser

a Konventioneller Laser mit 10 μm breitem Streifenkontakt
b Channeled-Substrate-Laser (CSL) mit dielektrischer Modeführung

Vortrag, gehalten an der SEV-Informationstagung über «Informationsübertragung mit Glasfasern» am 13. Juni 1979 in Bern.

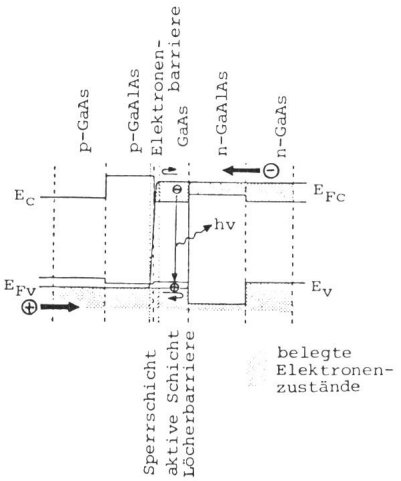

Fig. 2 Schematisches Bandkantenenergiediagramm des Doppelheterostruktur-Diodenlasers bei Vorspannung der Diode in Flussrichtung

E_c Bandkantenenergie des Leitungsbandes
E_v Bandkantenenergie des Valenzbandes
E_{Fc}, E_{Fv} Fermi-Niveau des Leitungs- bzw. Valenzbandes

aktiven Schicht erreichen, ohne die Kristalltemperatur unzulässig zu erhöhen. Die Ursache der Barrierenbildung liegt in den unterschiedlichen Bandabständen von GaAs bzw. GaAlAs [1].

Neben dieser als Trägerconfinement bezeichneten Eigenschaft der Doppelheterostruktur wirkt diese zusätzlich als zweidimensionaler, optischer Wellenleiter. Ähnlich wie bei der Glasfaser weist die eingeschlossene GaAs-Schicht gegenüber den angrenzenden Schichten einen etwas höheren Brechungsindex auf. Die zwischen den Spiegelflächen stehende, durch das Confinement auf die aktive Schicht konzentrierte Lichtwelle garantiert somit eine optimale Wechselwirkung zwischen den Photonen des Lichtfeldes und den angeregten Elektronen des injizierten Trägerplasmas.

Bei kontinuierlich emittierenden Lasern wird der Strom nur über einen schmalen Kontaktstreifen entlang der optischen Achse des Resonators injiziert (Fig. 1). Damit erreicht man einerseits eine minimale thermische Belastung des Laserkristalls und anderseits eine laterale Führung des Lichtmodes, indem nur unter dem Kontaktstreifen die Verstärkungsbedingung für den Lasereinsatz erfüllt wird [2]. Die lokale Verstärkung des GaAs ist von der Stromverteilung unter dem Kontaktstreifen abhängig, wobei diese Stromverteilung selbst wieder stromabhängig ist [3]. Dadurch treten bei diesen einfachen Streifenkontaktlasern charakteristische Nichtidealitäten auf. Diese Verstärkungsänderungen sind oft von Modeumwandlungen im Lichtfeld begleitet, die zu Nichtlinearitäten in der Strom-Licht-Charakteristik (Kinks), Selbstoszillationseffekten der Intensität [4; 5], zunehmendem Intensitätsrauschen oberhalb der Schwelle [5], Änderung der Intensitätsverteilung im Laser selbst und Degradationen des optischen Intensitätsspektrums [5] führen.

Die Entwicklung des Channeled-Substrate-Lasers (CSL) hat demgegenüber eine effektive Verbesserung der Lasercharakteristiken gebracht [5; 12]. Der ins Substrat geätzte Kanal erzeugt unter dem Streifenkontakt eine laterale Erhöhung des effektiven dielektrischen Brechungsindexes im Bereich des Substratkanals, womit eine laterale, stromunabhängige Führung des Lichtmodes erreicht wird. Die Einfachheit dieser Problemlösung soll nicht über die damit verbundenen herstellungstechnologischen Schwierigkeiten hinwegtäuschen.

3. Schaltdynamik von Diodenlasern

Schaltet man den Laserstrom sehr rasch ein, so wird während der Einschalt-Emissionsverzögerungszeit T_D im wesentlichen nur spontane Strahlung emittiert, danach erfolgt ein sehr rascher Anstieg der Lichtintensität mit Anstiegszeiten unter 100 ps, gefolgt von einer ausgeprägten Relaxationsschwingung, die typischerweise nach etwa 2...5 ns abgeklungen ist (Fig. 3). Diese Relaxations- oder Resonanzeffekte sind für Halbleiterdiodenlaser typisch und rühren von dynamischen Verzögerungseffekten zwischen dem zeitlichen Verlauf des Lichtfeldes und der die Amplitude des Lichtfeldes stabilisierenden Sättigung des aktiven Mediums her. Die Verzögerungszeit anderseits wird durch die Aufbaugeschwindigkeit des zur optischen Verstärkung notwendigen Trägerplasmas bestimmt. Fig. 3 zeigt, dass erwartungsgemäss die Verzögerung mit zunehmender Vorspannung der Diode abnimmt. Für praktische Anwendungen lassen sich diese Verzögerungseffekte durch Vorspannung des Lasers bis in den Subnanosekundenbereich reduzieren. Gleichzeitig tritt auch eine gewisse Verringerung der Relaxationsoszillation ein, die jedoch nicht vollständig unterdrückt werden kann.

Diese Resonanzphänomene zwischen Lichtfeld und Verstärkermedium wirken sich auch im Strom-Intensitäts-Modulationsfrequenzgang aus, wie er in Fig. 4 am Beispiel des Channeled-Substrate-Lasers dargestellt ist, und führen zu

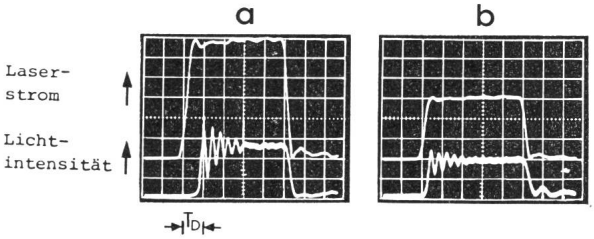

Fig. 3 Einfluss der Diodenvorspannung auf die Einschalt-Verzögerungszeit und die Relaxationsoszillationen des Laserlichts beim Channeled-Substrate-Laser

J_{th} = Laserschwellstrom
T_D Emissionsverzögerungszeit
Zeitachse 1 ns/Div
a Laserbias 0.9 J_{th}; max. Aussteuerung 1.3 J_{th}
b Laserbias 1.0 J_{th}; max. Aussteuerung 1.3 J_{th}

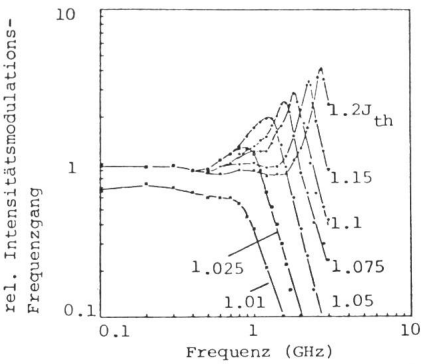

Fig. 4 Gemessener relativer Intensitätsmodulations-Frequenzgang des CSL für verschiedene Laserströme J

J_{th} Laserschwellstrom

ausgeprägten Modulationsresonanzüberhöhungen im GHz-Bereich.

Eine teilweise Reduktion des Resonanzverhaltens, das grundsätzlicher Natur ist, gelingt durch eine Reduktion des aktiven Laservolumens (Laserfilament), verbunden mit einer relativen Zunahme der Spontanemission [6], durch Einstrahlung von Licht in den Laser [7] oder durch Verwendung von Kompensationsnetzwerken in der Diodenansteuerung, wobei alle diese Massnahmen eine Zunahme der Anstiegszeit mit sich bringen. Die Effekte der Volumenreduktion sind in Fig. 5 an Lasern mit unterschiedlichem Volumen dargestellt, wobei allerdings die Auswirkungen von Trägerdiffusionseffekten noch differenzierter behandelt werden müssten [8].

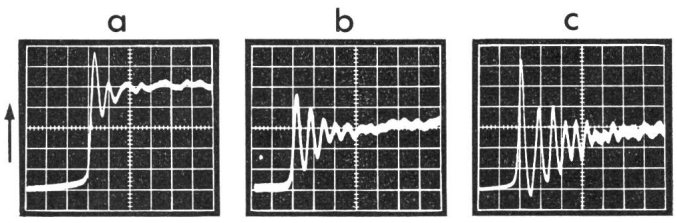

Fig. 5 Einfluss des aktiven Laservolumens auf das Einschwingverhalten des Laserlichts bei identischer normierter Aussteuerung des Lasers mit einem Stromimpuls

Aussteuerung aller Laser: 1.3 J_{th}
Zeitachse 500 ps/Div

a Buried-Heterostruktur-Laser. Breite des aktiven Laservolumens 2 µm
b Channeled-Substrate-Laser. Breite 5 µm
c Konventioneller Doppelheterostruktur-Laser. Breite 15 µm

4. Rauschverhalten von Laserdioden

Neben dem Modulationsverhalten von Lasersendern ist auch das Rauschverhalten des Bauelementes wichtig, da es die Empfindlichkeit eines optischen Kommunikationssystems beeinflussen kann. Laserdioden sind typische Vertreter von lichtemittierenden Bauelementen, deren optisches Rauschen durch Quantenfluktuationen, die in der internen Wechselwirkung zwischen Lichtfeld und den angeregten Elektronen des verstärkenden Mediums entstehen, erzeugt wird. Das thermische Rauschen des Lasers ist unwichtig, da die Belegung des Resonators mit thermischen Photonen im Vergleich mit den durch stimulierte Emission erzeugten Photonen für Wellenlängen im Bereich von 1 µm unwesentlich ist. Die fundamentale Ursache des Intensitätsrauschens liegt in der quantenstatistischen Natur der Partikelaustauschraten zwischen den Elektronen- und Photonendichten. Diese internen Anregungsaustauschraten des Lasers sind mit dem für Quantenprozesse typischen Schrotrauschen behaftet, welches sich über die Dynamik des makroskopischen Lasersystems in extern beobachtbaren Intensitätsfluktuationen äussert.

Der Laserrauschtheorie von *D.E. McCumber* [9] zufolge, kann das interne Quantenrauschen des Lasers durch Schrotrauschquellen in den das dynamische Verhalten des Lasers beschreibenden Ratengleichungen berücksichtigt werden. In Fig. 6 ist eine theoretische Berechnung des Relativen Intensitätsrauschens RIN $= \overline{\Delta I^2}(\omega)/\bar{I}^2$, d.h. der auf das Quadrat der mittleren Intensität $\bar{I}^2$ [W²] bezogenen Intensitätsrauschdichte $\overline{\Delta I^2}(\omega)$ [W²/Hz] in Funktion des Diodenlaserstromes und der Frequenz dargestellt worden. Diese sog. relative Intensitätsrauschdichte RIN [9] hat als Rauschmass den Vorteil, unabhängig von der Messanordnung zu sein, und erlaubt einen Vergleich verschiedener Laser. Interpretieren lässt sich das RIN als Quadrat des Rauschmodulationsgrades pro Frequenzeinheit. Typische Merkmale des Rauschverhaltens sind der starke Rauschanstieg an der Laserschwelle und das Auftreten von Rauschresonanzen im GHz-Bereich. Es lässt sich zeigen, dass die Resonanzfrequenzen von Rauschen und Modulation identisch sind, da die internen Rauschquellen ähnlich wie externe Modulationsquellen wirken.

Experimentelle Rauschuntersuchungen

Messtechnisch wurde das Intensitätsrauschen durch Messung des Stromrauschens der zur Detektion verwendeten Photodiode mit Hilfe eines phasensensitiven Mikrowellenradiometers bestimmt [10]. Der gemessene Verlauf des RIN als Funktion der Frequenz und des Stromes einer CSL-Laserdiode ist in Fig. 7 wiedergegeben. Für diesen recht idealen Diodenlaser entspricht die Messung, wie in [5] gezeigt, quantitativ sehr gut dem berechneten Verlauf. Mit älteren Laserdiodentypen ohne laterales optisches Confinement wurden zum Teil exzessive Licht-Rauschwerte gemessen, im Gegensatz zum erwarteten Verhalten. Der hohe Rauschpegel im Licht dieser Dioden widerspiegelt sich auch in einer erhöhten Rauschspannung über den Diodenklemmen [13].

Neben den typischen Quantenrauscheffekten im untersuchten Bereich von 10 MHz bis 10 GHz tritt unter etwa 1 MHz ein mit sinkender Frequenz zunehmendes Intensitätsrauschen auf, das sog. $1/f$-Rauschen (Fig. 8). Verschiedene Messungen [11] haben gezeigt, dass auch der Diodenstrom bei

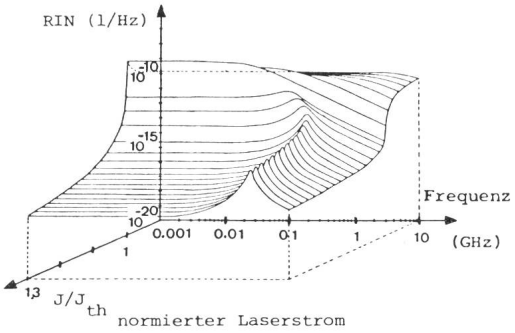

Fig. 6 Theoretischer Verlauf der relativen Intensitäts-Rauschdichte (RIN) für einen Monomode-Diodenlaser

J/J_{th} normierter Laserstrom

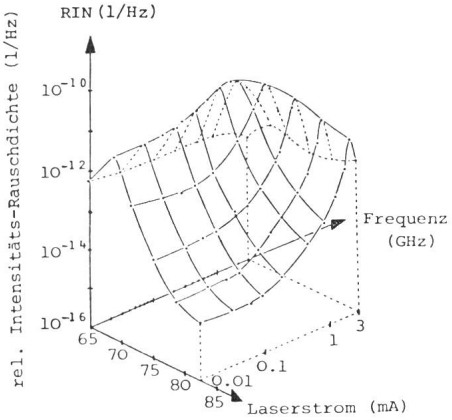

Fig. 7 Gemessener Verlauf der relativen Intensitäts-Rauschdichte für den CSL-Laser

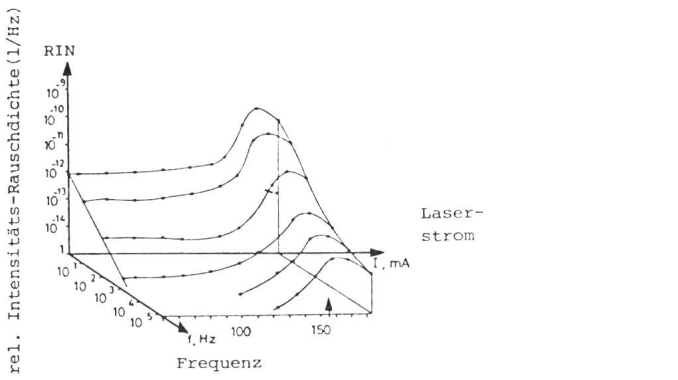

Fig. 8 Gemessener Verlauf der relativen Intensitäts-Rauschdichte im 1/f-Bereich

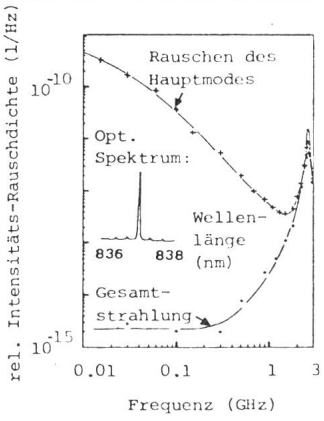

Fig. 9 Gemessener Einfluss der Modefiltrierung auf das relative Intensitäts-Rauschdichtespektrum

unterdrücktem Laserprozess praktisch unverändertes 1/*f*-Rauschen aufweist. Somit ist es naheliegend, das 1/*f*-Rauschen des Stromes als Ursache des Lichtintensitäts-1/*f*-Rauschens anzusehen.

Rauschdegradationen

Als eine Ursache von potentiellen Rauschdegradationen in optischen Übertragungssystemen ist das Einzelmode-Rauschen in Multimode-Lasern zu erwähnen. So beobachtet man, wie in Fig. 9 dargestellt ist, dass die Strahlungsintensität von einzelnen Moden, die aus dem Spektrum eines fast Monomode-Verhalten zeigenden CSL-Lasers herausgefiltert wurden, Fluktuationen aufweisen, deren Rauschdichten bis zu 4 Dekaden höher liegen als die Fluktuationsdichten der gesamten, unfiltrierten Intensität [10]. Diese Fluktuationspegel sind nun so hoch, dass sie nicht mehr vernachlässigt werden können. Ursache dieses Rauschverhaltens sind negativ korrellierte Intensitätsverteilungsfluktuationen zwischen einzelnen Moden. Beobachtungen am optischen Übertragungssystem weisen darauf hin, dass gewisse Filterwirkungen durch die Fiber oder die Fiberkopplungen auftreten können, die dann das Multimode-Rauschen des Lasers zum Vorschein kommen lassen.

Eine weitere Ursache von Rauschdegradationen sind externe optische Feedbackeffekte, wie sie auch leicht in optischen Systemen auftreten können. Zur Simulation wurde bei einer CSL-Diode mit Hilfe eines halbdurchlässigen Spiegels ein Teil der emittierten Strahlung in den Laser rückgekoppelt, wobei wegen positivem Rauschfeedback durch die externe Kavität starke periodische Degradationen der Rauschspektren auftreten. In ähnlicher Weise wirkt sich ein solcher optischer Feedback auch störend auf das Einschaltverhalten des Lasers aus, wie in Fig. 10 wiedergegeben.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Laser ein rauscharmer optischer Sender ist, dessen Intensitätsrauschen vermutlich nur bei sehr breitbandigen Übertragungssystemen gegenüber dem meist höheren Rauschen des detektorseitigen Vorverstärkers ins Gewicht fällt. Hingegen sind selbst ideale Laser sehr empfindlich auf externe Störungen und Modefiltrierungen, deren Rauschdegradation gegenüber dem Empfängerrauschen nicht mehr zu vernachlässigen ist. Rauschuntersuchungen stellen zudem eine sehr empfindliche Methode dar, um sehr geringe Störungen und Degradationen zu erkennen, und liefern zusätzlich Informationen über das dynamische Verhalten des Lasers.

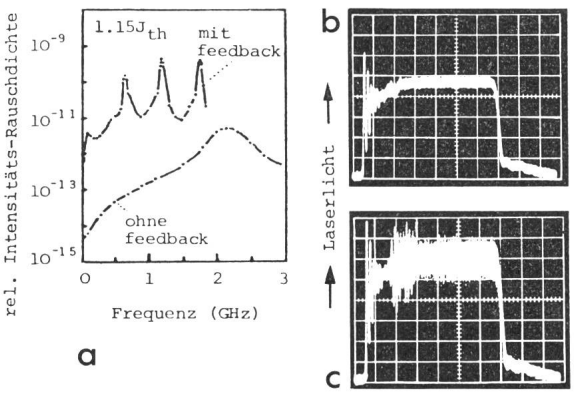

Fig. 10 Einfluss von externem optischem Feedback auf das Rausch- und Einschaltverhalten des Channeled-Substrate-Laser

a Frequenzgangkurven
b Oszillogramm ohne optisches Feedback
c Oszillogramm mit optischem Feedback

Literatur

[1] *H.C. Casey* and *M.B. Panish:* Heterostructure lasers. New York, Academic Press, 1978.

[2] *B.W. Hakki:* GaAs double heterostructure lasing behaviour along the junction plane. J. Appl. Physics 46(1975)1, p. 292...302.

[3] *W.T. Tsang:* The effects of lateral current spreading, carrier outdiffusion and optical mode losses on threshold current density of GaAs-$Al_xGa_{1-x}As$ stripe-geometry DH lasers. J. Appl. Physics 49(1978)3, p. 1031...1044.

[4] *T.L. Paoli:* Changes in the optical properties of CW (GaAl)As junction lasers during accelerated aging. IEEE J. Quantum Electronics 13(1977)5, p. 351...359.

[5] *H. Jäckel* and *H. Melchior:* Fundamental limits of the light intensity fluctuations of semiconductor lasers with dielectric transverse mode confinement. Proceedings of the 5th European Conference on Optical Communications and the 2nd International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communications, Amsterdam 1979.

[6] *Y. Suematsu* and *K. Furuya:* Theoretical spontaneous emission factor of injection lasers. Trans. Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan. Abstracts E60(1977)9, p. 467...472.

[7] *G. Arnold* a.o.: Modulation behaviour of double heterostructure injection lasers with coherent light injection. AEÜ 32(1978)32, p. 130...136.

[8] *N. Chinone* a.o.: Effects of lateral mode and carrier density profile on dynamic behaviours of semiconductor lasers. IEEE J. Quantum Electronics 14(1978)8, p. 625...631.

[9] *D. E. McCumber:* Intensity fluctuations in the output of CW laser oscillators. I. Physical Rev. 141(1966)1, p. 306...322.

[10] *H. Jäckel* and *G. Guekos:* High frequency intensity noise spectra of axial mode groups in the radiation from CW GaAlAs diode lasers. Optical and Quantum Electronics 9(1977)–, p. 233...239.

[11] *G. Tenchio:* 1/*f*-noise of continuous wave semiconductor lasers. Electronics Letters 13(1977)20, p. 614...616.

[12] *R. Aiki* a.o.: Transverse mode stabilized $Al_xGa_{1-x}As$ injection lasers with channeled-substrate-planar structure. IEEE J. Quantum Electronics 14(1978)2, p. 89...94.

[13] *G. Guekos* a.o.: Laser light noise and current noise of GaAs CW laser diodes. IEEE J. Quantum Electronics 6(1970)7, p. 423...428.

Adresse der Autoren

H. Jäckel, dipl. El.-Ing., IBM Forschungslaboratorium, 8803 Rüschlikon, und PD Dr. *G. Guekos*, dipl. El.-Ing., *G. Tenchio*, dipl. El.-Ing., und *R. Wetter*, dipl. El.-Ing., Institut für Elektronik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.