

Diss. ETH Nr. 8121

**UNTERSUCHUNGEN DER MODULATIONSEIGEN-
SCHAFTEN VON HALBLEITER LASERN FÜR
DIE OPTISCHE KOMMUNIKATIONSTECHNIK**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels eines

Doktors der Technischen Wissenschaften

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE

ZÜRICH

vorgelegt von

RUDOLF WELTER

Dipl. El. Ing. ETH

geboren am 8. November 1952

von Gottshaus TG

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. H. Melchior, Referent

Prof. Dr. W. Guggenbühl, Korreferent

Zürich 1986

Untersuchungen der Modulationseigenschaften von Halbleiterlasern der optischen Kommunikationstechnik.

Zusammenfassung

Halbleiter Laser mit guter Modenstabilisierung und "kink-freiem" Betrieb bis zu mehreren mW optischer Leistung erweisen sich als geeignet für die optische Glasfaserkommunikation. Als Sender in intensitätsmodulierten Uebertragungssystemen, im speziellen bei der Anwendung der analogen Lichtintensitätsmodulation, sind das Signal-Geräusch-Verhältnis und das Signal-Verzerrungsabstand ausschlaggebende Gütekriterien der Uebertragungsstrecke.

Die Untersuchungen von Verzerrungs- und Rausch-eigenschaften von Doppelheterostruktur Lasern mit Emissionswellenlängen bei 0.8, 1.3 und 1.5 μm bilden zwei Schwerpunkte der vorliegenden Abhandlung. Ein weiteres Kapitel ist ferner dem Studium von Nahfeld Licht-Verteilungen von modulierten 0.8 μm Laserdioden gewidmet. Die Motivation für diese Untersuchungen lieferte die Anwendung des Lasers in optischen Distanzmessgeräten, wo eine Limitierung der erreichbaren Messgenauigkeit festgestellt werden musste.

Verzerrungen

Obgleich moderne Doppelheterostruktur-Laser mit typischen Intermodulationsabständen von -40dB und mehr bei 8dBm optischer Signal-Leistung pro Spiegel einen sehr hohen Linearitätsgrad in ihrer Licht-Strom-Wandlung aufweisen, ist die fundamentale Grenze, die aus den einfachen Ratengleichungen abgeleitet werden nicht erreicht. Insbesondere für Intermodulationsverzerrungen 2.Ordnung differieren die experimentell ermittelten von den auf Grund der einfachen Ratengleichungen gerechneten recht stark. Unter einer Zahl von untersuchten Mechanismen, die die inhärente Linearität der Laserdiode maskieren, kristallisiert sich die Diffusion von Ladungsträgern innerhalb der Laserkavität als dominante

Quelle von zusätzlichen Verzerrungen heraus. Rechnungen, basierend auf den Ratengleichungen mit Einbezug der Diffusionseffekte ergeben Resultate, die in guter quantitativer Uebereinstimmung mit den Messungen sind. Nichtstrahlende Rekombinationsmechanismen, wie Augerrekombination oder die thermische Modulation des optischen Verstärkungsfaktors spielen im Vergleich zu den Diffusionseffekten eine untergeordnete Rolle. Daneben können aber in einer Uebertragungstrecke Faser-induzierte Effekte die Systemlinearität empfindlich herabsetzen. Allen voran zeigen sich optische Rückkopplungen und Filtrierungen des Laserspektrums, sowie auch Mode-Sprünge als häufigste Ursache von starken Verzerrungen in Glasfaser-Kommunikationssystemen.

Optische Intensitätsfluktuationen.

GaAlAs/GaAs sowie InGaAsP/InP-Laserdioden mit eingebauter dielektrischer lateraler Lichtführung zeigen ein Intensitätsrauschen, das in guter Uebereinstimmung mit den Ergebnissen der Rauschtheorie von D.E. McCumber ist. Die experimentell ermittelten Rauschcharakteristiken von GaAs-Strukturen mit aktiver Lichtführung lassen sich im Gegensatz dazu nicht mit linearisierten Ratengleichungen, erweitert mit Schrotrauschquellen die aus einer Partikelanschauung des optischen Feldes abgeleitet sind, in Einklang bringen. Die Verwendung von Rauschquellen, die dem Aspekt der Stehwelle in der Laserkavität besser gerecht werden, ergibt theoretische Resultate, die den gemessenen von Oxid-Streifen- und V-Groove-Lasern näher kommen.

Exzessrauschen, stets Ausdruck eines imperfekten Laserbetriebes, können oft selbst bei moderneren Laserdioden-Strukturen gemessen werden. "Mode-Competition" erscheint bei den meisten InGaAsP/InP-Lasern, aber auch bei vereinzelt GaAs-Typen als Ursache für ein schwaches Exzessrauschen bei starker Anregung.

Licht-Nahfeld-Modulation

In sinusmodulierten Lasern durch den Strom folgt das modulierte optische Feld in den Flanken mit einer grösseren zeitlichen Verzögerung als im Intensitätsmaximum. Erhebliche Variationen der Modulationsphase über die Breite des Nahfeldes wurden bei Lasern mit aktiver Lichtführung (Oxid-Streifen-Typ) gemessen. Ein Modell, das die laterale Trägerdiffusion in der Kavität berücksichtigt, erklärt die hauptsächlichsten Effekte.

Investigations of diode lasers for fiber-optic communication systems.

Abstract

Semiconductor lasers with well-behaved, kinkfree operation prove to be suited for their use in fiber-optic communication systems. As emitters in intensity modulated transmission links, in particular in systems using analog light intensity modulation, the signal-to-noise ratio and the signal-to-distortion ratio are of outmost importance for the signal quality at the receiver and for the transmission capacity.

This essay reports about the distortion and the noise properties of the double-hetero-structure laser diodes emitting at wavelengths of $0.8\mu\text{m}$ and $1.3\text{-}1.5\mu\text{m}$. The investigations include a variety of laserstructures of the "dielectric-waveguided" and the "active gain-guided" types.

A further chapter is devoted to the experimental and theoretical study of the nearfield light distributions of sine-wave- and pulse- modulated $0,8\mu\text{m}$ diode lasers. The incentive for this work was an observed limitation of the resolution and accuracy of optical range finders using diode lasers.

Distortions:

Even though double heterostructure lasers have attained a high degree of linearity at currents well above threshold with typical values of -20dB (optical) for intermodulations of 2nd order and -35dB for distortions of 3rd order at optical signal powers of $+8\text{dBm}$ (optical) per facet, the inherent distortions derived from the simple rate equations suggest lower limits. In particular large discrepancies between theoretical and experimental results are found for distortions of 2nd order which show a tendency to saturate

at relatively high values independent of the bias current, while a distinct decrease for increasing operation current is predicted by calculations based on the rate equations. Among a number of investigated mechanisms potentially adding up to a masking of the inherent linearity of the lasers, lateral and longitudinal carrier-diffusion appear to play a dominant role. The theoretical calculations based on improved rate equations, evaluated with measured specific parameters provide results quantitatively in good agreement with the experimentally measured distortions. The influence of nonradiative recombination mechanisms, thermal modulation, and mode-coupling in multimodelasers on the linearity of the light-current characteristics are discussed. Eventually, the impairment of the linearity due to side-effects such as mode-hopping, optical feedback, and filtering of the laserspectra, are illustrated by measurements and simulation results. Like the noise-behavior of lasers, the linearity as well appears to be highly sensitive to optical feedback, and modefiltering.

Noise.

It has been experimentally verified that lasers with a built-in dielectric waveguide, oscillating in the fundamental transverse mode generally exhibit an intensity noise behavior described by the noise theory of D.E. McCumber. The calculation uses linearized rate equations and classical Langevin-shotnoise sources, derived from the particle point of view of the optical field. In contrast, the noise characteristics of narrow stripe gain-guided lasers deviate from the calculated results with the above-mentioned approach. However, replacing the classical shotnoise sources for the electrons and the photons by corresponding noise sources, derived with the consideration of the wave-property of the stimulated light generation narrows the gap between the theory and measurements of gain-guided lasers.

Excessnoise, being generally an indicator for imperfections of laseroperation, is rather often observed even with ad-

vanced Fabry-Perot-laserstructures for the 1.3-1.5 μ m wavelength range and also with certain GaAlAs/GaAs-types.

Nearfield - light distribution

In a sinewave-modulated double-heterostructure laser the signal-response in the nearfield appears to be delayed in the wings in comparison with the response measured in the center of nearfield. Significant differences among various laser structures are observed. Gain-guided lasers are found to have a pronounced variation of the signal response in the nearfield along the junction. A model taking into account lateral carrier diffusion in cladding layers and in the cavity, solved numerically in a self-consistent manner explains the major effects.