

Diss. ETH Nr. 6447

Lichtemissionsrauschen und dynamisches Verhalten von
GaAlAs-Heterostruktur-Diodenlasern im
Frequenzbereich von 10 MHz bis 8 GHz

ABHANDLUNG

zur Erlangung
des Titels eines Doktors
der technischen Wissenschaften
der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Heinz Jäckel
Dipl. El. Ing. ETH
geboren am 7. Juli 1947
von Basel

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. H. Melchior, Referent
Prof. Dr. W. Guggenbühl, Korreferent

Zürich 1979

Haus Melchior

Lichtemissionsrauschen und dynamisches Verhalten von GaAlAs-Heterostruktur-Diodenlasern im Frequenzbereich von 10 MHz bis 8 GHz

von Heinz Jäckel

Zusammenfassung

Halbleiter-Diodenlaser zeigen ausgeprägte Fluktuationen der Strahlungsintensität beim Einsatz der kohärenten Lichtemission sowie Rauschresonanzphänomene im Mikrowellengebiet. Neben den rein quantenstatistisch bedingten, mit der Lichtgeneration im Laser fundamental zusammenhängen Intensitätsfluktuationen werden experimentell oft sehr viel höhere Rauschpegel gefunden, die, wie gezeigt wird, bei älteren Diodenlaser-Strukturen ihre Ursache in der stromabhängigen lateralen Lichtführung haben.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass Diodenlaser neueren Typs, die über eine laterale dielektrische stabile Resonatorstruktur verfügen, weitgehend frei von maskierendem Excessrauschen sind, so dass diese Laser hauptsächlich durch das fundamentale, quantenstatistische Rauschen des Lichtoszillators begrenzt sind.

Ein erster Teil der vorliegenden Arbeit enthält eine eingehende experimentelle Gegenüberstellung vor allem der Rauscheigenschaften und des dynamischen Verhaltens von Diodenlasern mit einer stromabhängigen, lateralen Modeführung durch die optische Verstärkung des Halbleitermaterials und Diodenlasern mit stabiler, strukturbedingter, dielektrischer, lateraler Wellenleiterstruktur. In dieser Gegenüberstellung konnte gezeigt werden, dass transversale Modeführung parasitäre Erscheinungen, wie Intensitäts-Excess-Rauschen, kontinuierliche Selbstoszillationen der Intensität und Nichtlinearitäten in der Lichtstrom-Charakteristik weitgehend eliminiert.

In einem zweiten Teil werden, basierend auf der Laser-Rauschtheorie von D.E. McCumber, die fundamentalen quantenstatistisch inhärent bedingten Intensitätsfluktuationen für einen untersuchten Diodenlaser mit dielektrischer Modeführung (Channeled-Substrate-Laser) berechnet und mit den experimentellen Ergebnissen des Rausch- und Modulationsverhaltens dieses Lasertyps verglichen. Hiermit konnte erstmals gezeigt werden, dass Laser mit dielektrischer lateraler Lichtführung die fundamentale Limite des Quantenrauschens über sehr grosse Aussteuerbereiche des Lasers erreichen und sich in sehr guter Uebereinstimmung mit der theoretischen Berechnung befinden. Daraus folgt, dass das Excess-Rauschen nicht fundamentaler Natur ist, und der Diodenlaser mit guter Genauigkeit durch eine angepasste McCumber-Laserrauschtheorie beschrieben werden kann. Im Gegensatz zu früheren Berechnungen wurde der Laser als Multimode-Laser behandelt und ist erstmals mit für GaAlAs-Diodenlasern realistischen Kopplungen zwischen Lichtfeld und aktivem Medium berechnet worden. Die Kopplung zwischen Lichtmode und Verstärkung wird durch die Energie der Lichtquanten und die spektrale Linienbreite der optischen Verstärkung von GaAlAs gegeben.

Um einen möglichst exakten Vergleich zwischen theoretischen Berechnungen und experimentellen Messungen zu gewährleisten, sind die, in die Berechnung eingehenden Parameter, möglichst direkt aus experimentellen Abhängigkeiten von statischen und dynamischen Eigenschaften des untersuchten Diodenlasers ermittelt worden.

Abschliessend wurden in einem dritten Teil noch experimentell und zum Teil auch theoretisch gewisse Effekte untersucht, die die Rausch- und Modulationseigenschaften eines Diodenlasers empfindlich stören können; insbesondere die externe optische Rückkopplung des Lasers und die räumliche Filtrierung von Strahlungsmoden beim Multimode-Laser.

Es konnte nachgewiesen werden, dass mit steigender Filtrierung der Laserstrahlung die sehr starken Fluktuationen der einzelnen longitudinalen Moden eines Mehrmodenlasers in Erscheinung treten und zu erheblichen Vergrößerungen der Intensitätsfluktuationen führen gegenüber den Fluktuationen der unfiltrierten Strahlung.

Abgesehen von solchen externen Störungen ist der GaAlAs-Doppelheterostruktur-Diodenlaser mit lateraler dielektrischer Modeführung ein sehr rauscharmer optischer Sender, dessen Fluktuationen sich in optischen Kommunikationssystemen kaum störend auswirken sollten, mit Ausnahme vielleicht von speziellen Modulationsarten und Digital- oder Analog-Systemen mit sehr hohen Bandbreiten.

Hingegen stellt das Intensitätsrauschen, wie gezeigt werden konnte, eine sehr empfindliche Messmethode dar, die es erlaubt, geringste interne oder externe Störungen oder Veränderungen des Lasers zu detektieren.

Light Intensity Fluctuations and Dynamic Behaviour of GaAlAs-Heterostructure Diode Lasers in the Frequency range of 10 MHz to 8 GHz

by Heinz Jäckel

Abstract:

Semiconductor diode lasers exhibit pronounced fluctuations in the optical radiation at the onset of coherent light emission as well as noise resonance phenomena in the microwave region. Ideal lasers are quantum noise limited devices but apart from the fundamental intrinsic quantum fluctuations of the laser light there is often severe excess-noise present in the radiation that deteriorates the low-noise behaviour of the laser. It will be shown in this investigation that the cause of excess-noise is often found in the lack of stable lateral mode-confinement provided by the particular diode structure.

On the other hand it is demonstrated here that a new type of GaAlAs doublehetero structure diode laser (Channeled Substrate Laser) with dielectric lateral mode-guiding is free of excess-noise and its light fluctuations reach the fundamental quantum noise limit.

In the first part of the investigations the static, the dynamic and the noise properties of a conventional double heterostructure diode laser providing simple gain-guiding of the lasing mode are systematically compared to those of a Channeled Substrate Laser with current independent lateral dielectric mode-confinement. The detailed measurements give clear evidence that dielectric lateral mode-guiding provides an effective mean to eliminate at the same time excess-noise in the light fluctuations, continuous self-oscillations of the light intensity as well as nonlinearities in the light-current-characteristic.

The second part deals with the theoretical calculations of the fundamental quantum fluctuations of the laser light intensity based on a rate-equation laser noise model developed by D.E.McCumber.

These theoretical calculations which have been adapted to the GaAs semiconductor diode laser were evaluated by using experimentally determined parameters of our lasers.

The important result of this comparison between the theoretical model and the experimental measurements is that a very good quantitative agreement between D.E. McCumber's noise theory and the noise- and modulation properties of GaAs double heterostructure diode lasers holds if a suitable dielectric lateral mode guiding structure is provided in junction plane. Laser structures as the Channeled Substrate Laser are free of excess-noise and reach the fundamental quantum noise limit over a large diode current range from threshold up to currents of twice the threshold current. By this it is obvious that intensity excess-noise in GaAs diode lasers is not fundamental.

Noise calculations have been based here for the first time as far as intensity noise is concerned on a full multimode laser model under the assumption that the optical transition in GaAs is homogeneously broadened.

To ensure an independent proof of the validity of McCumber's noise theory the parameters of the lasers have been determined only from the static or dynamic behaviour of the devices.

Finally certain effect that can degrade the noise- and modulation properties of the laser as external optical feedback and spatial or energy filtering of the laser radiation are treated theoretically and verified experimentally. The experiments show in good agreement with theoretical predictions that increased filtering of the radiation from a multimode-laser increases the intensity fluctuations drastically over several decades. The phenomenon is understood in terms of McCumber's noise theory as excitation-partition-noise between the different lasing cavity-modes. Without external disturbances the GaAs double heterostructure diode laser with suitable dielectric mode-guiding is an optical emitter with a very low intensity noise level that will rarely

create difficulties in optical communication systems with the potential exception of special modulation schemes and very high bandwidth digital or analog systems.

On the other hand the investigations of noise processes in semiconductor lasers provide a very powerful diagnostic tool to detect very small external or internal disturbances of the diode laser.