

Diss. ETH Nr. 8410

**TRANSVERSE-JUNCTION-STRIPE-LASER
UND OPTISCHE PULSERZEUGUNG DURCH
AKTIVES MODE-LOCKING**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels eines
Doktors der Technischen Wissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
JÜRIG WERNER
Dipl. El. Ing. ETH
geboren am 5. März 1956
von Schaffhausen/Merishausen SH

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

Zürich 1987

Druck: Speich AG Zürich

Transverse-Junction-Stripe-Laser und optische Pulserzeugung durch aktives Mode-Locking

Zusammenfassung

Optische Pulse im Picosekunden-Bereich wurden durch aktive Modenkopplung in Halbleiter-Lasern generiert und anhand von Modellen analysiert. Um stabile, störungsfreie Pulse zu erhalten, wurde eine Laser-Struktur mit zwei elektrisch getrennt kontrollierbaren, integrierten Segmenten für die optische Verstärkung und Modulation gebaut und in einer externen Gitter-Kavität betrieben. Die beiden Segmente der Laserstruktur weisen getrennte Diffusionen auf und sind daher elektrisch voneinander isoliert. Optisch sind sie durch einen Wellenleiter hoher Kopplungseffizienz verbunden. Für die Herstellung der Laser wurde ein Fabrikations-Prozess entwickelt und für die Anwendung auf integrierte Strukturen erweitert.

Dazu wurde eine bestehende Flüssigphasen-Epitaxieanlage für das AlGaAs-Materialsystem mit einem verbesserten System-Design neu aufgebaut und weitgehend automatisiert. Damit können reproduzierbar Heterostruktur-Schichten guter optischer und elektrischer Qualität für Halbleiter-Laser und andere Anwendungen hergestellt werden. Die gewählte Laser-Struktur vom "Transverse-Junction-Stripe"-Typ ermöglicht auf einfache Weise die Fabrikation von regulären Lasern wie auch der angestrebten Doppelsegment-Anordnung. Allerdings erfordert die laterale Indexführung des Lasermoden ein kontrolliertes Dotierungsprofil, wozu u.a. eine "tiefe"-Zn-Diffusion benötigt wird. Mit der Entwicklung einer neuen Diffusionsquelle, deren Präparation explosionsgefährliche Prozesse vermeidet, konnten frühere Probleme wie z.B. die Oberflächenerosion beseitigt werden. Die hergestellten Laser sind langlebig und zeigen nahezu Monomode-Verhalten. Die tiefsten Schwellstromwerte liegen bei 33 mA. Messungen der Spontanemission erlauben Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Wellenleiters und die Natur der Linienverbreiterung.

Die Doppelsegment-Laser wurden in einem Mode-Locking-System mit externer Gitter-Kavität eingesetzt. Es zeigt sich, dass damit sehr stabile Pulse ohne Substrukturen oder Mehrfachpulsationen generiert werden können. Die Pulsdauer liegt bei ca. 8 ps, die optische Spitzenleistung beträgt gegen ein halbes Watt. Eine Abschätzung anhand einfacher Ratengleichungen zeigt, dass durch die intensiven optischen Pulse eine beträchtliche Entleerung des Minoritätsträger-Reservoirs eintritt. Die Autokorrelationsfunktion folgt über beinahe 3 Dekaden einem exponentiellen Verlauf, was auf eine einseitig-exponentielle Pulsform hinweist. Für kleine Laser-Ströme ist die Autokorrelationsfunktion relativ breit. Mit wachsendem Laser-Strom wird diese schmaler und nimmt im optimalen Strombereich um 80 mA die erwähnte

exponentielle Form an. Das optische Spektrum ist ca. 8 mal ausgedehnter als die Transformations-Limite. Eine Analyse, welche Phasen-Selbstmodulation durch den optischen Puls miteinbezieht, zeigt, dass die Aufbreiterung und Form des Spektrums durch Chirping erklärt werden kann. Der Frequenz-Tuning-Bereich ist mit 496 ± 1 MHz oder $\pm 0.2\%$ sehr gross. An seinem Randbereich gegen niedrige Frequenzen hin findet man optimal kurze Pulse. Das Tuning-Verhalten kann anhand eines einfachen Modells verstanden werden. Als ein limitierender Faktor gegen eine weitere Pulsverkürzung wird das Zusammenspiel von Chirping und Gitter-Dispersion erkannt.

Für die Analyse von Laser-Systemen mit "schwacher" Moden-Kopplung existieren anschauliche analytische Modelle. Im Falle von intensiven optischen Pulsen muss allerdings auf numerische Modelle zurückgegriffen werden. Damit können komplexere, den Voraussetzungen besser angepasste Ansätze wie z.B. der gewählte Wanderwellen-Ansatz, welcher die Enveloppe des elektrischen Feldes vom optischen Träger trennt, betrachtet werden. Das Wanderwellen-Modell wird von Grund auf hergeleitet und für die spezielle Anwendung auf Halbleiter-Laser erweitert. Dabei sind im Modell geeignet erscheinende Aspekte mehrerer Theorien in neuer Kombination vereinigt. Um einen Vergleich mit der Literatur zu ermöglichen, werden die Gleichungen für den bekannten Fall des Fabry-Perot-Lasers im statischen Betrieb gelöst. Ausgehend vom Modell für das Dipolmoment des 2-Niveau-Atoms, erlaubt die Einführung phänomenologischer Frequenzgänge eine Verallgemeinerung des Polarisations-Modells. Die Spontanemission ist in der Form verteilter Langevin-Quellen berücksichtigt. Wanderwellen-Gleichungen für den allgemeinen und statischen Fall sowie für den dynamischen Fall unter Vernachlässigung der Frequenzabhängigkeit der optischen Verstärkung werden hergeleitet.

Transverse-Junction-Stripe Lasers and Optical Picosecond Pulse Generation by Active Mode-Locking

Abstract

Optical picosecond pulses have been generated by active mode-locking of semiconductor lasers operated in an external grating cavity. To get stable pulses free of disturbances, a twin-section laser structure was chosen, that allows separate control over the gain and the modulating segments. With two diffusions the sections are electrically isolated from each other. Optically they are efficiently interconnected by a waveguide. A fabrication process for lasers was developed and extended for application to integrated structures.

For this purpose a liquid-phase-epitaxy system was redesigned, its control improved and automated. It is now possible to grow heterostructures with good reproducibility and electrical and optical qualities as needed for integrated laser structures and other applications. As laser structure the "Transverse-Junction-Stripe" (TJS) type was chosen since it eases the realization of the desired twin-section configuration. The precisely controlled doping profile for the lateral index-guiding of the lasing mode is produced by a "deep" Zn-Diffusion. The use of a new diffusion source that avoids an explosion endangered preparation allowed to eliminate early problems with the erosion of the wafer-surface. The fabricated lasers show nearly monomode behavior and have minimum threshold currents around 33 mA. The TJS structure with its open access to the waveguide from the top allows measurements of spontaneous emission. From this insight is gained in the geometrical structure of the waveguide, gain saturation effects and the nature of the line-broadening mechanisms.

Possibilities and limitations of a mode-locking setup using a twin section laser-diode are studied. It turns out that this approach is very suitable to generate stable pulses of smooth shape, free of substructures or bursts. Its behavior was studied both experimentally and theoretically. The shortest pulse durations are around 8 ps. The optical peak power reaches nearly 0.5 W. An estimate based on conventional rate-equations indicates that the strong optical pulses result in a considerable depletion of the minority carriers in the gain region. The autocorrelation traces of the pulses follow an exponential dependence over nearly 3 decades indicating a one-sided exponential pulse shape. For small currents through the laser-section the autocorrelation function is relatively broad. With increasing current it becomes smaller and

approaches the exponential shape. The optical spectrum is about a factor of 8 larger than predicted by the transform limit of the pulse. It turns out that this broadening and the shape of the spectrum can be understood by chirping. The combination of both the chirping and the dispersion of the grating was identified as a limiting factor for a further reduction in pulse duration. The frequency tuning range is 496 ± 1 MHz or $\pm 0.2\%$, which is quite large. Optimally short pulses are generated at the lower end of the tuning range. A Model is developed to explain the observed tuning behavior.

Methods of analysis exist for a description of weakly mode-locked systems. However in the presence of strong optical pulses as is the case in the present experiments, one has to resort to more complex and numerical models. Customarily a travelling-wave "ansatz" is chosen that separates the fast varying optical carrier from the more slowly varying complex envelope of the electric field. The travelling-wave model for pulses is formulated in view of its application to semiconductor lasers. Starting with the Maxwell-equations it is derived from scratch. Thereby suitable aspects of a several theories are included in the model and combined in a new fashion. Proceeding from the differential equation for the dipole moment of a two-level atomic system, the polarisation model is generalized by introducing phenomenological frequency responses. Spontaneous emission is included by the use of distributed Langevin-sources. To allow for comparison with reported theoretical results, the equations are solved for the well known case of the Fabry-Perot laser in static operation. Towards treatment of the semiconductor lasers the travelling-wave equations are presented for the general and the static case and for conditions where the frequency dependence of the gain is negligible. For the latter case the equations are formulated for discrete space and time intervals too. The results can form a basis for the understanding of the experimental observations.