

Zusammenfassung

Trotz langjähriger Forschung sind die zugrundeliegenden physikalischen Vorgänge hinter dem dynamischen Verhalten von Transversalmoden in oberflächenemittierenden Lasern (VCSEL) und ihr Einfluss auf die intrinsische Laserdynamik und das Modulationsverhalten noch nicht vollends verstanden. Es bestehen weiterhin viele Unklarheiten hinsichtlich eines oft beobachteten Multippeak-Phänomens und Abfällen in der Kleinsignalmodulationsantwort dieser VCSEL.

In dieser Arbeit, wurde ein umfassendes analytisches Modell entwickelt, um die Kleinsignalmodulationsantwort von Ultrahoch- geschwindigkeits-VCSELs zu beschreiben. Weiterhin umfassen die neuartigen MM-Ratengleichungen, die zu diesem Zweck abgeleitet wurden, die Effekte der Gewinkompression und der inhomogenen Strominjektion zwischen den verschiedenen Lasermoden. Unter Verwendung der MM-Ratengleichungen wird eine analytische Anpassungsfunktion für die Modulationsantwort abgeleitet, die auf dem Ansatz des Ladungsträgerreservoirs basiert. Diese analytische Anpassungsfunktion ermöglicht das Extrahieren von einheitlich erweiterten Gütefaktoren und Leistungsindikatoren für diese Bauelemente. Das entwickelte Modell gewährleistet außerdem ein grundlegendes Verständnis der MM- Laserdynamik des Geräts und bietet einen besseren Zugang zum nichtlinearen modalen Verdrängungsverhalten für die Ladungsträgerdichte in der aktiven Zone von High-Performance-VCSELs.

Um die Auswirkung der extrinsischen Dynamik, welche die Gesamtmodulationsantwort des Systems überlagert, vollständig zu separieren, wurde ein erweitertes parasitäres Ersatzschaltbildmodell zur Extraktion der VCSEL-Chip parasitären Einflüsse entwickelt. Dies ist unbedingt notwendig, um die reine intrinsische Antwort von der gemessenen Gesamtmodulationsantwort des Systems isolieren zu können. Zusätzlich zu den Standardschaltkreiskomponenten, die üblicherweise zum Modellieren der grundlegendsten Chipeffekte verwendet werden, wurde ein induktives Element eingeführt, um die Induktivität der metallischen Leiterbahnelektroden zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind in diesem Modell auch ein frequenzabhängiger Kondensator und Widerstand enthalten, um die Pad-kapazität bzw. die BCB-Verluste darzustellen. Diese Elemente haben einen großen Einfluss auf die Systemantwort bei hohen Modulationsfrequenzen, insbesondere oberhalb von 20 GHz. Verglichen mit den stark vereinfachten parasitären-Modellen kann das hier dargestellte erweiterte Modell die strukturreichen gemessenen S_{11} -Daten insbesondere im Hochfrequenzbereich akkurater reproduzieren. Darüber hinaus befanden sich die extrahierten Schaltungsparameterwerte innerhalb ihrer physikalischen Bereiche. Aus den Kurvenanpassungsergebnissen geht deutlich hervor, dass fortgeschrittene Modellierung unabdingbar ist, um einen besseren Einblick in die extrinsische Dynamik zu erhalten und die Impedanz-Eigenschaften der VCSELs und die Modulationsleistung zu verstehen. Weiterhin wurden die Limitierungen der Systembandbreite untersucht und Verbesserungsvorschläge zur Erhöhung der Gesamtmodulationsgeschwindigkeit gegeben.

Die hier dargestellte erweiterte Kleinsignalanalyse führt abschließend zu folgenden Erkenntnissen. Erstens: die Verwendung des einpoligen Tiefpassfilters ist eine sehr ungenaue Schätzung für die Modellierung der extrinsischen Antwort. Zweitens führt die zweipolige Filterfunktion, die normalerweise zur Charakterisierung der Laserdynamik in Hochleistungs-VCSEL-Geräten verwendet wird, zu einer sehr geringen Genauigkeit und begrenzt ein tieferes Verständnis der Dynamik. Um die gewünschten Gesamtmodulationsgeschwindigkeiten zu erreichen und um die Bandbreitenbeschränkungen zu überwinden, die dem dynamischen Verhalten auferlegt sind, sind sowohl intrinsische als auch extrinsische erweiterte Modellierung unverzichtbar.

Summary

Despite the intensive research conducted to understand the underlying physics behind the transverse mode dynamic behaviour in single- and multi-mode oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs), and their impact on the intrinsic laser dynamics and the modulation response, many ambiguities still exist concerning the nature of the anomalous multi-peak phenomenon and the notches occurring in the small-signal modulation response of these VCSELs.

In this work, a comprehensive analytical model to describe the small-signal modulation response of ultra-high performance VCSELs has been developed. Furthermore, the novel MM rate equations which are derived for this purpose, include the effects of gain compression and inhomogeneous current injection between the different lasing modes. Using these MM rate equations, an analytical fitting function for the modulation response, which is based on the carrier reservoir splitting approach, is derived. This analytical fitting function allows the extraction of consistently expanded figures of merit and performance indicators for these devices. The novel model, also ensures deeper understanding of the device MM laser dynamics and gives a better access to the nonlinear modal competition behavior for the carrier density in the active region for such high-performance VCSELs. Consequently, it was noticed that inside our latest generation of VCSELs with highest carrier and photon densities, the common carrier reservoir splits up as a result of numerous effects such as mode competition, carrier diffusion and spatial hole burning (SHB). Analyzing the small-signal dynamics of VCSELs with the advanced model presented here, excellent fitting outcomes, especially compared to the oversimplified SM model that is commonly found in literature, are achieved. It can be noticed that the dynamic figures of merit splitting up due to mode competition like reported by the static LI characteristics. This detailed understanding of the VCSELs modulation response enables the further optimization of these lasers for the next generation high-speed devices.

To fully rule out the impact of the extrinsic dynamics which is superimposed on the device total modulation response, an advanced parasitics equivalent circuit model for de-embedding the VCSEL chip-parasitics has been developed. This is very critical for isolating the pure intrinsic response from the measured total device response. Besides the standard circuit components, which are commonly used to model the most basic chip effects, an inductive element to account for the metal track inductance is included. Furthermore, a frequency dependent capacitor and resistor are also included in this model to represent the pad capacitance and the BCB losses, respectively. These elements have a tremendous impact on the system response at high modulation frequencies, in particular above 20 GHz. Compared to the oversimplified parasitics models, the proposed advanced model can reproduce the very delicate measured S11 data, especially in the high-frequency domain. Moreover, the extracted circuit parameter values were found to be within their physical ranges. It is clear from the fitting results, that advanced modelling is indispensable to obtain better insight into the extrinsic dynamics, and to profoundly understand the devices impedance characteristics and the modulation performance. Additionally, the system bandwidth limitations have been investigated, and improvement suggestions to boost the total modulation speed are given.

Finally, the important outcomes from the conducted advanced small-signal analysis is that the single-pole low-pass filter representation is a very inaccurate estimation for modelling the extrinsic response. Secondly, the two-pole filter function which is normally used to characterise the laser dynamics in high-performance VCSEL devices, results in very poor accuracy and limits a deeper understanding of the device dynamics. Thus, to reach the desirable overall modulation speeds, and to overcome the bandwidth limitations imposed on the dynamic behaviour, both intrinsic and extrinsic advanced modelling become indispensable.