

Periodische und nichtperiodische Wellenleitergitter- und Laserkavitätskonzepte

Doctoral Thesis

Author(s):

Erni, Daniel Jürg

Publication date:

1996

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001658939>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

**Periodische und nichtperiodische
Wellenleitergitter- und
Laserkavitätskonzepte**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
DANIEL JÜRG ERNI
Dipl. El.-Ing. ETH / El.-Ing. HTL
geboren am 21. Oktober 1961
von Zürich (ZH)



Cate

angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. W. Bächtold, Referent
Prof. Dr. B. D. Patterson, Korreferent

Zürich 1996

Abstract

Introduction

An inexpensive monolithic laser diode emitting at a wavelength around 850 nm would be a very attractive light source for the development of low-cost high-precision time and distance measurement systems. Such single-longitudinal-mode laser emission requires special considerations of the optical field within the laser cavity. Well known attempts such as wavelength selective feedback can either be in the form of a distributed *Bragg* reflector (*DBR*) or can be incorporated into the active part of the laser providing distributed feedback (*DFB*). Both of these laser topologies employ a fine-scale periodic corrugation of relatively small index steps to interact with the electromagnetic wave. Such corrugations mostly have periods on the order of a few hundred nanometers. Such resolution requirements put high demands even on the state-of-the-art in lithographic reproduction, resulting in low manufacturing through-put and very high costs. In order to focus on a simple laser processing, large-scale periodic or non-periodic perturbations have been proposed. In the work presented here two totally different grating concepts are treated: first, the periodic doubly perturbed waveguide structure (*DPS*), and second, slowly varying non-periodic waveguide inhomogeneities or non-periodic cavity-sequences respectively.

Part 1: Scattering of waves in doubly perturbed waveguide structures

The objective of this first part is the analysis and optimization of short, resonant dielectric *DPS*. Instead of the commonly used singly perturbed *DBR* reflectors, where the 2nd order *Bragg* reflection and the corresponding radiation loss are related by a predefined grating profile dependent relationship, the *DPS* offers the possibility of an independent design procedure. We therefore focus our investigations on two canonical applications of the *DPS*: on a radiation minimized 2nd order *Bragg*-Reflector and a radiation enhanced resonant grating coupler topology, both for TE-polarization. Such *DPS* reflectors show distinct reflection minima at grating offsets $\delta = \Lambda/4$ and $\delta = 3\Lambda/4$ respectively. These minima are observed to be insensitive to variations of the grating separation $2d$ (e.g. equivalent waveguide thickness). The corresponding reflection maxima were found at values of $\delta = 0, \Lambda/2, \Lambda$. Considering an optimized grating coupler design, the effective length L_{eff} has been identified as a formal discrimination criterion, to determine whether the grating radiation is solely governed by the input reflection behavior or mainly by its radiation coupling. In comparison to the reflection coefficient the radiation loss is now strongly dependent on the grating separation $2d$ offering the flexibility of choosing either a reflection value or a radiation loss factor independently. This unique feature is highly recommended in the context of an adequate *DPS* design procedure. Our analysis of the

radiation properties has divided the *DPS* topology in two totally separate cases: *symmetrical* structures and *asymmetrical* ones. Such a characteristic refers to a different perturbation strength of the *DPS*'s two gratings, which is defined either by each grating depth or by the refractive index of the adjacent half-space. The functional dependence between the grating offset δ and the grating separation $2d$ for the optimum of the desired design goal has extensively been investigated. Experimental studies of *symmetrical DPS* structures are carried out on a 168 cm long microwave model (168 periods). The experimental results showed a strong correlation to theoretical predictions.

The lack of a strict dependency between mode and radiation coupling qualifies the *DPS* structure as a test case to validate powerful approximations such as the *coupled-mode analysis*. Using the semi-analytical, fully vectorial *MMP* method (*multiple multipole method*) for computational electromagnetics, all unique properties of such a *DPS* have been investigated in great detail. The neglected field coupling within the grating zone has been identified as the main inconsistency of all coupled mode based approximations. As an astonishing fact, also extremely short *DPS* (2 periods) are able to reproduce the radiation characteristics of infinitely long resonant waveguide gratings. Such a behavior also strongly reminds to the validity range of the effective mass approximation in solid-state physics.

Part 2: Analysis and optimization of non-periodic coupled multi-section laser structures

In this part of the presented work three different non-periodic multi-section laser topologies are investigated by the use of a *transfer-matrix* model. In terms of a distinct mode-selectivity and the minimal number of involved sub-cavities non-periodic structures, such as the *self-similar triadic Cantor* sequence or the *quasi-periodic Fibonacci* sequence turned out to be superior when compared to an equivalent slowly varying periodic cavity concept. Instead of solving the inverse-scattering problem in a rigorous manner to obtain only one solution, we additionally decided to use *genetic algorithms*. This kind of *heuristic* search procedure allows insight into which structures are well suited for the desired applications. During the optimization, we assume the laser specifications are fulfilled when laser threshold is reached at a lasing wavelength of 852 nm , the peak of the optical material gain spectrum coincides with this specified wavelength, and the mode-selectivity within the round-trip gain spectrum approaches a maximum. In conclusion *Cantor* topologies characteristically have the best mode-selectivity (total length $L = 428\text{ }\mu\text{m}$, 31 cavities), whether the *evolutionary* optimized solutions (total length $L = 690\text{ }\mu\text{m}$ resp. $645.6\text{ }\mu\text{m}$, 41 resp. 34 cavities) turned out to be much less sensitive to statistical variations in sub-cavity lengths.

Kurzfassung

Einleitung

Eine einfache, billige monolithisch integrierte Halbleiter-Laserdiode mit einer Emissionswellenlänge von ungefähr 850 nm stellt eine sehr attraktive Lichtquelle dar, die sich in der Messtechnik-Industrie im Zusammenhang mit hochpräzisen Frequenz- und Distanzmessungen einer sehr regen Nachfrage erfreuen würde. Nahezu monochromatisches Licht hoher Kohärenz bei dieser vorgegebenen Emissionswellenlänge bedingt aber, dass die Ausbildung eines einzigen Schwingungszustandes des elektromagnetischen Feldes in der Laserkavität zum einen bevorzugt und zum anderen auch kontrolliert werden muss. Dies erreicht man mit einer speziellen Ausgestaltung der Kavität selbst. So kann sie beispielsweise als räumliches Filter angelegt sein, welches in der Lage ist, die Topologie der Laserkavität wellenlängenselektiv wirksam werden zu lassen. In dieser Hinsicht wurden zwei völlig unterschiedliche Wellenleitergitterkonzepte genauer untersucht: die periodische Doppelgitterstruktur (*DPS*) und die langsam variierende nichtperiodische Wellenleiter- resp. Kavitätsinhomogenität.

1. Teil: Geführte Wellen in Doppelgitterstrukturen

Der 1. Teil der Arbeit befasst sich mit der Analyse und Optimierung von kurzen, resonanten dielektrischen Doppelgitterstrukturen (*DPS*). Dies vor allem im Hinblick auf das extremale Reflexionsverhalten bezüglich der geführten Modi im Wellenleitergitter und auf die extremale sowie unidirektionale Leistungsabstrahlung. Im Gegensatz zu den üblichen einfachen 2. Ordnungs-*Bragg*-Gittern, wo Gitterreflexion und Gitterabstrahlung über eine feste Beziehung miteinander verknüpft sind, bietet das Doppelgitter ein entkoppeltes Entwurfsvorgehen, bei dem sowohl die Reflexion als auch die Strahlungsdämpfung praktisch unabhängig voneinander eingestellt werden können.

Den Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung bilden der strahlungsarme 2. Ordnungs-*Bragg*-Reflektor und der resonante Gitterkoppler. *DPS*-Reflektoren zeigen Minima bei Gitterverschiebungen δ in der Umgebung von $\delta = \Lambda/4$ resp. $3\Lambda/4$, deren Lage wiederum insensitive auf Variationen der Gitterseparation $2d$ reagieren. Die Reflexionsmaxima sind analog dazu bei Gitterverschiebungen von $\delta = 0, \Lambda/2, \Lambda$ zu finden. Im Hinblick auf einen Kopplerentwurf wurde die effektive Länge L_{eff} als das quantitative Unterscheidungskriterium identifiziert, welches angibt, ob das Abstrahlverhalten nun von der Moden- oder von der Strahlungskopplung selbst dominiert wird. Ganz im Gegensatz zur Eingangsreflexion der *DPS*-Struktur verhält sich die Gitterabstrahlung in bezug auf Änderungen der Gitterseparation $2d$: Hier sind die Minima nun eine direkte Funktion von $2d$. Diese Flexibilität hinsichtlich der Optimierung eines resonanten Reflektors oder Kop-

plers räumt der Strahlungsdämpfung α im Entwurfsvorgehen eine weit grössere Bedeutung ein. Bei der Analyse des Abstrahlverhaltens von *DPS*-Strukturen differenziert man zwei unterschiedliche Betriebszustände: die Abstrahlung von der *symmetrischen* Struktur und diejenige vom *asymmetrischen* Wellenleitergitter. Das Prädikat *symmetrisch* resp. *asymmetrisch* entstammt aus einem Vergleich zwischen den Stärken der Gitterstörung einer jeden Gitterebene und wird entweder durch die Profiltiefe des einzelnen Gitters oder den Brechungsindex des angrenzenden Halbraums gekennzeichnet. Vollständig unidirektionale Abstrahlung bedarf, nebst der entsprechenden Gitterverschiebung, aber stets einer *asymmetrischen DPS*-Struktur. Die funktionalen Zusammenhänge zwischen der Gitterverschiebung δ und der Gitterseparation $2d$ im angestrebten Optimum des jeweiligen Betriebszustandes wurden eingehend untersucht und für den *symmetrischen* Fall anhand eines entsprechend skalierten, 168 cm (168 Perioden) langen Mikrowellenmodells messtechnisch verifiziert.

Im weiteren eignet sich die Topologie der periodischen Doppelgitterstruktur, gerade wegen der unabhängigen Einstellung von Modenkopplungs- und Strahlungsdämpfungs-konstante, besonders gut, um Näherungsansätze wie z.B. die *Coupled-Mode Analysis* auf ihre Leistungsfähigkeit hin auszutesten. Mit Hilfe der *Mehrfach-Multipol-Methode (MMP)* konnte so anhand einer vollvektoriellen Feldberechnung am kurzen Doppelgitter nachgewiesen werden, dass die Hauptinkonsistenz derartiger Näherungsmethoden vor allem von der Unterschlagung einer lokalen Feldkopplung im Bereich der Gitterzone her-rührt. Eine der erstaunlichsten Beobachtungen kann an extrem kurzen *DPS*-Strukturen gemacht werden, welche lediglich aus zwei Störperioden bestehen. Solche «Gitter» zeigen immer noch das typische Abstrahlungsverhalten langer resonanter Gitterstrukturen, eine Erkenntnis, die überrascht, einem aber gleichzeitig den Gültigkeitsbereich der Effek-tiven-Masse-Näherung in der Festkörperphysik in Erinnerung ruft.

2. Teil: Analyse und Optimierung von nichtperiodisch gekoppelten Mehrsektionen-Laserstrukturen

In diesem Abschnitt werden vier unterschiedliche *nichtperiodisch* gekoppelte Mehr-sektionen-Laserstrukturen beschrieben und drei davon mit Hilfe eines *Transfer-Matrix*-Ansatzes eingehend analysiert. *Selbstähnliche* oder *quasi-periodische* Topologien, wie es die *triadische Cantor*- oder die *Fibonacci*-Sequenz darstellen, zeigen im Vergleich zu einer langsamvariiierenden periodischen Kavitätsinhomogenität eine deutlicher ausgeprägte Modenselektivität bei einer signifikant kleineren Anzahl gekoppelter Kavitäten. Die heuristische Optimierung von Laser-Topologien mit Hilfe *genetischer Algorithmen (GA)* vermittelt, nebst dem Erhalt der gewünschten Laserstruktur, zudem einen tieferen Einblick in den Werdegang einer sogenannten *guten* Lösung, und vermag unter Umstän-

den sogar die allgemeineren Kriterien, die eine solche *gute* Struktur auszeichnen, anzugeben. Die Spezifikationen werden bei allen Optimierungen als erfüllt betrachtet, wenn der Laser an der Schwelle exakt bei einer Wellenlänge von 852 nm anschwingt, die optische Materialverstärkung bei der selben Wellenlänge ein Maximum aufweist und die Modenselektivität in bezug auf das Filterverhalten der *Round-Trip*-Verstärkung möglichst gross ist. Was die Modenselektivität anbelangt, so zeichnet sich eine starke Dominanz der *Cantor*-Topologie (Gesamtlänge $L = 428\text{ }\mu\text{m}$, 31 Kavitäten) ab. Umgekehrt zeigt eine *Monte-Carlo*-Analyse, dass sich die etwas schlechteren, *evolutionär* optimierten Strukturen (Gesamtlänge $L = 690\text{ }\mu\text{m}$ resp. $645.6\text{ }\mu\text{m}$, 41 resp. 34 Kavitäten) als weniger sensitiv auf statistische Variationen der einzelnen Kavitätslängen erweisen.