

Performance optimization of flat-top passband arrayed waveguide grating demultiplexers

Doctoral Thesis

Author(s):

Wildermuth, Eberhard

Publication date:

2000

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-003884096>

Rights / license:

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

Diss. ETH Nr. 13440

Performance Optimization of Flat-Top Passband Arrayed Waveguide Grating Demultiplexers

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zürich
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

EBERHARD WILDERMUTH

Dipl. Phys.
born August 20, 1967
in Tübingen, Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Melchior, examiner
Prof. Dr. P. Günter, co-examiner

1999

ABSTRACT

In the ongoing effort for constantly increasing data rates while simultaneously lowering the costs for data transmission, wavelength division multiplexing becomes more and more important. With it, the high bandwidth of an optical fiber can be utilized more effectively. Previously deployed fiber systems can economically be upgraded and newly implemented systems can transmit much higher data rates while keeping the requirements on the used components low.

This thesis deals with the optimized design, fabrication and characterization of low loss wavelength division multiplexers in silica on silicon.

Several publications with contradicting conclusions exist about the change of the effective refractive index in curved waveguides. The comprehension of this phenomenon is necessary for further reduction of device size. In order to fit more multiplexers on one wafer and also to keep the influence of process inhomogeneities at a minimum, modern designs more and more approach the limitations of the respective technology. The influence of decreasing bend radii is investigated. Decreasing the bend radius decreases the effective refractive index of the curved waveguide while at the same time increasing the effective optical path length. These two effects act against each other and it is important to determine the prevalent effect in order to optimize the design. Different devices without index correction as well as with positive and negative index correction were realized. It is found that a correction for silica waveguides has to lower the effective refractive index of the curved waveguide in order to reduce phase errors in the waveguide grating.

Further optimization of the design can be achieved by implementing various correction schemes. One of these schemes is the use of a focal point correction. A focal point correction takes into account that the wavefronts emitted from the array waveguides of the fiber grating already couple in the array waveguides thus pushing the focal point for the resulting wavefront farther back than the end point of the grating. Devices with various focal point corrections were implemented and fabricated. Measurements of the resulting demultiplexers show that in fact the crosstalk can be lowered in spite of the effect being relatively weak. The crosstalk reducing effect actually is

not caused by reducing the phase error in the grating but on the contrary by introducing commencing sidelobes into the wavelength response of the multiplexer. The power in these sidelobes is concentrated in the wavelength regions between the respective channels so that the crosstalk floor directly in the channel wavelength region stays lower.

To reduce the requirements concerning the frequency stability of the used lasers, a flat wavelength response in the respective channel wavelength regions is necessary. Different options for flat top passband were designed and produced in various multiplexers. The advantages and disadvantages of these different flat top options were investigated. Wavelength division multiplexers with very good performance and ideal flat passband were realized. The devices offer 16 channels and 200 GHz channel spacing. Fiber-to-fiber losses are below 5.5 dB and crosstalk is better than -35 dB while simultaneously being completely polarization independent. The wavelength multiplexers were fully packaged with fibers and temperature control.

In the theory chapter the limitations on the data rate imposed by the multiplexing device are investigated. A method for the theoretical determination of the device induced pulse broadening is presented. This method adds up all delays introduced by different optical path lengths in the multiplexer. For the flat top devices, additional spatial filtering is taken into account. For the use of this method, it is only necessary to know the geometric device parameters. Not even the wavelength response of the multiplexer is needed. The highest possible data rate is found to be 50 Gbit/s for Gaussian wavelength response devices and 110 Gbit/s for flat top passband devices.

These theoretical considerations are finally verified by high speed data transmission experiments with time division multiplexed input signals of 10, 20, 40 and 80 Gbit/s. The experiments clearly show that the fabricated wavelength division multiplexers induce no power penalty for data rates up to 40 Gbit/s which are usually used today in commercially available systems. The flat top multiplexers are even capable of transmitting 80 Gbit/s without introducing any power penalty.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch die fortwährenden Bemühungen, Datenraten zu erhöhen bei gleichzeitiger Kostensenkung, gewinnt Wellenlängenmultiplexing immer mehr an Bedeutung. Damit ist es möglich, die hohe Bandbreite einer optischen Faser effektiver auszunutzen. Früher verlegte Fasersysteme können sehr viel höhere Datenraten übertragen, ohne dass die Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten steigen.

Diese Dissertation behandelt den optimierten Entwurf, die Fabrikation und die Charakterisierung von Wellenlängendemultiplexern mit geringen Verlusten auf Siliziumbasis.

Zum Verhalten des effektiven Brechungsindex in Kurven existieren verschiedene Publikationen mit zum Teil sich widersprechenden Schlussfolgerungen. Das Verständniss dieses Problems ist wichtig, um eine weitere Reduzierung der Bautailgrösse zu erreichen. Durch die Bemühungen einerseits möglichst viele Demultiplexer auf einem Wafer unterzubringen und andererseits den Einfluss von Prozessinhomogenitäten zu minimieren, nähern sich moderne Entwürfe immer mehr den Beschränkungen der jeweiligen Technologie an. Der Einfluss sinkender Kurvenradien wird untersucht. Eine Verringerung des Kurvenradius führt zu einer Senkung des effektiven Brechungsindex des Wellenleiters während gleichzeitig die effektive optische Pfadlänge steigt. Diese beiden Effekte arbeiten gegeneinander und für eine weitere Entwurfoptimierung ist es wichtig, den vorherrschenden Effekt zu ermitteln. Verschiedene Demultiplexer, sowohl mit als auch ohne Indexkorrektur, wurden realisiert. Es ergibt sich die Notwendigkeit, als Korrektur eine Senkung des effektiven Brechungsindex für gekrümmte Wellenleiter einzuführen um Phasenfehler im Wellenleitergitter zu minimieren.

Eine weitere Optimierung des Entwurfes kann durch die Einführung zusätzlicher Korrekturschemata erreicht werden. Eines dieser Optimierungsverfahren ist die Verwendung einer Fokalkpunktkorrektur. Eine Fokalkpunktkorrektur berücksichtigt, dass die Wellenfronten, die von den Gitterwellenleitern ausgesendet werden, schon im Wellenleitergitter koppeln und so den Fokalkpunkt für die resultierende Wellenfront weiter als den Endpunkt des Gitters

nach hinten verschoben. Bauteile mit verschiedenen Fokalkpunktkorrekturen wurden implementiert und fabriziert. Messungen der resultierenden Demultiplexer zeigen, dass das Übersprechen tatsächlich verringert wird, wobei der Effekt relativ schwach ist. Die Verringerung wird hierbei nicht durch Reduktion der Phasenfehler im Wellenleitergitter erreicht, sondern im Gegenteil durch gezielte Einführung beginnender Nebenmaxima in die Wellenlängenantwortfunktion der Demultiplexer. Die Energie, die in diesen Nebenmaxima vorhanden ist, konzentriert sich auf die Wellenlängenregionen zwischen den jeweiligen Kanälen, so dass das Übersprechen direkt unter den Wellenlängenkanälen geringer ist.

Um die Anforderungen an die verwendeten Laser bezüglich Frequenzstabilität tief zu halten, ist eine flache Wellenlängenantwort in den jeweiligen Wellenlängenregionen der einzelnen Kanäle des Demultiplexer erforderlich. Einige Optionen zur Erzeugung einer flachen Frequenzantwort wurden entworfen und in verschiedenen Bauteilen realisiert. Die Vor- und Nachteile dieser verschiedenen Optionen wurden untersucht. Wellenlängendemultiplexer mit sehr guten Leistungsdaten und ideal flacher Frequenzantwort wurden realisiert. Die Bauteile haben 16 Kanäle und einen Kanalabstand von 200 GHz. Die Faser-zu-Faser-Dämpfung ist geringer als 5.5 dB und das Übersprechen ist kleiner als -35 dB bei gleichzeitiger totaler Polarisationsunabhängigkeit. Die Wellenlängendemultiplexer wurden in Module eingebaut und mit Fasern und Temperaturkontrolle versehen.

Im Theorieteil der Arbeit werden die Beschränkung der Datenrate durch die Verwendung eines Demultiplexer untersucht. Eine Methode zur theoretischen Bestimmung der durch das Bauteil verursachten Pulsverbreiterung wird vorgestellt. Diese Methode addiert alle durch verschiedene optische Pfadlängen im Demultiplexer hervorgerufenen Verzögerungen auf. Bei den Demultiplexern mit flacher Frequenzantwort wird spatiales Filtern mit in die Betrachtung einbezogen. Zur Verwendung dieser theoretischen Methode ist einzig die Kenntniss der geometrischen Bauteilparameter erforderlich. Nicht einmal die jeweilige Frequenzantwort des Multiplexer wird benötigt. Die höchstmögliche Datenrate ergibt sich zu 50 Gbit/s für Demultiplexer mit Gaussförmiger Frequenzantwort und zu 110 Gbit/s für Demultiplexer mit flacher Frequenzantwort.

Diese theoretischen Betrachtungen werden schliesslich durch ein Datentransmissionsexperiment mit zeitlich gemultiplexten Datenraten von 10, 20, 40 und 80 Gbit/s verifiziert. Das Experiment zeigt deutlich, dass die fabrizierten Demultiplexer keine Empfindlichkeitsreduktion für Datenraten bis 40 Gbit/s, welche normalerweise in kommerziell erhältlichen Systemen heutzutage verwendet werden, bewirken. Die Demultiplexer mit flacher Frequenzant-

wort ermöglichen sogar Datenraten bis zu 80 Gbit/s ohne irgendeine Empfindlichkeitsreduktion im System.