

**SILICON-BASED PLANAR PHOTONIC CRYSTALS
FOR APPLICATION TO
DISPERSION COMPENSATION**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor ingenieur (Dr. ing.)

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
(Fachbereich Ingenieurwissenschaften)
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Cécile Jamois
geb.: 19.04.1977 in Rennes

Gutachter:

1. Prof. Ulrich Gösele
2. Prof. Manfred Eich
3. Prof. Henry Benisty

Halle (Saale), 16. Juni 2004

urn:nbn:de:gbv:3-000007058

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000007058>]

Abstract

The principle and the feasibility of dispersion compensators in planar photonic crystals based on the insulator-on-silicon-on-insulator (IOSOI, $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$) system was demonstrated. This dispersion compensator should compensate for the dispersion of a single-wavelength channel with a bandwidth of 0.4 nm, corresponding to 40 GHz at 1.55 μm wavelength, and be integrated into a silicon chip, in order to be compatible with other electrical and optical integrated devices. Due to the small thickness of the silicon core and the high index contrast between the core and the oxide claddings, the behavior of the IOSOI system is fully three-dimensional and combines the properties of a two-dimensional photonic crystal with those of a planar waveguide. Performing theoretical studies on the properties of this planar photonic crystal, a design of a dispersion compensator taking into account several requirements for a good device functionality was elaborated and optimized. Issues like the light confinement, the radiation losses, the existence of cladding modes, as well as their consequences on the device properties were addressed. Light coupling from an integrated ridge waveguide into the photonic crystal waveguide used as dispersion compensator was also discussed. Though challenging, the experimental fabrication of such devices, compatible with the standard silicon technology, was demonstrated. Moreover, a theoretical estimate showed that the small experimental imperfections, arising from the process difficulties, may be compensated after fabrication by tuning via free-carrier injection.

Zusammenfassung

Das Prinzip und die Realisierbarkeit von Dispersionskompensatoren in IOSOI (insulator-on-silicon-on-insulator, $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$)-basierten planaren photonischen Kristallen ist bewiesen worden. Der zu realisierende Dispersionskompensator soll voll kompatibel zu anderen integrierten (elektrischen als auch optischen) Modulen werden. Dafür muss er in einen "silicon-on-insulator" (SOI) Chip integriert werden. Dabei ist die Zielvorgabe, die Dispersion eines einzelnen Kanals mit 40 GHz Bandbreite bei 1.55 μm Wellenlänge zu kompensieren. Wegen der dünnen Silizium Schichtdicke und dem hohen Indexkontrast zwischen dem Silizium und den zwei Oxyd Deckschichten, ist das Verhalten des planaren photonischen Kristalls dreidimensional, und es kombiniert die Eigenschaften eines zwei-dimensionalen photonischen Kristalls mit denen eines planaren Wellenleiters. Nach theoretischer Untersuchung der Eigenschaften des planaren photonischen Kristalls wurde ein Wellenleiterdesign ausgewählt und verbessert, um es als Dispersionskompensator einsetzen zu können. Fragestellungen wie die Lichtbeschränkung, die Radiationsverluste, oder die Existenz von "Claddingmoden" wurden untersucht. Zum Abschluss der Untersuchung wurde auch auf Fragen der Lichteinkopplung in den Wellenleiter eingegangen. Auch wenn die mit der Standardsiliziumtechnologie kompatible experimentelle Herstellung solcher Module sehr aufwendig ist, konnte gezeigt werden, dass sie möglich ist. Darüberhinaus wurde gezeigt, dass kleine experimentelle Unzulänglichkeiten, welche durch Prozessschwierigkeiten entstehen, durch die Injektion von freien Ladungsträgern nachträglich kompensiert werden können.

Contents

1	Motivation	4
1.1	Introduction	4
1.2	Dispersion Compensators: Background	6
1.2.1	Why Do We Need Dispersion Compensators?	6
1.2.2	Currently Used Dispersion Compensators	7
1.3	Photonic-Crystal-Based Dispersion Compensators: Principle	9
1.3.1	Two-Dimensional Photonic Crystals	9
1.3.2	Waveguides in Two-Dimensional Photonic Crystals	11
1.3.3	Photonic Crystals-Based Dispersion Compensators	15
1.3.4	Requirements	17
2	Study of the Bulk Photonic Crystal Slab	19
2.1	Selection of the Material System	19
2.2	Effects of the Vertical Confinement	20
2.2.1	Higher-Order Modes	20
2.2.2	Polarization Mixing	23
2.2.3	2D-3D Transition	24
2.2.4	Planar Waveguide Approximation	25
2.2.5	Selection of the Slab Thickness	27
2.3	Light Line and Resonant Modes	29
2.3.1	Guided Modes and Resonant Modes	29
2.3.2	Computation of Resonant Modes	30
2.3.3	Determination of Radiation Losses	31
2.4	Discussion of the Band Structure	33
2.4.1	Origin of the Modes	33
2.4.2	Cladding Modes and Surface Modes	35
2.4.3	Consequences on the Planar-Photonic-Crystal Properties	38
2.5	Conclusions	43
3	Design of the Dispersion Compensator	44
3.1	Dispersion Properties	44
3.1.1	Selection of the Waveguide Type	44
3.1.2	Study of the Selected Design	47
3.2	Propagation Losses	53
3.2.1	Radiation Losses	53
3.2.2	Coupling to Bulk Modes	55
3.3	Tunability	57
3.3.1	Liquid Crystal Infiltration	58
3.3.2	Free Carrier Injection	60
3.4	Coupling Issues	62
3.4.1	Impedance Matching	63

3.4.2	Mode Matching	64
3.4.3	Band Flatness	65
3.5	Conclusions and Full Design	67
4	Experimental Fabrication	69
4.1	Overview on the Fabrication Process	69
4.2	Electron-Beam Lithography	70
4.2.1	Design of the Masks	73
4.2.2	Results of Resist Patterning	75
4.3	Cr Etching	77
4.3.1	Preliminary Result	77
4.3.2	Optimization of the Gas Composition	78
4.3.3	Optimization of the RF Power	78
4.3.4	Further Optimization of the Process	79
4.4	Silicon and Silicon Dioxide Etching	82
4.4.1	Results for RIE Etching	82
4.4.2	Results for ICP Etching	83
4.5	Conclusions	89
5	Conclusion and Outlook	90
5.1	Theory and Design of the Dispersion Compensator	90
5.2	Experimental Fabrication	91
6	Appendix: Atlas of Waveguide Designs	93
	List of Abbreviations	105
	Bibliography	106
	List of Publications	113
	Acknowledgments	115
	Eidesstattliche Erklärung	116
	Curriculum Vitae	117