

GUIDED-WAVE MICRO-ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS (MEMS) OPTICAL SWITCHES FOR TELECOMMUNICATION APPLICATIONS

THÈSE N° 3269 (2005)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

Institut de microélectronique et microsystèmes

SECTION DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Roland GUERRE

Maîtrise de physique, DEA en microélectronique, Université Joseph Fourier, Grenoble, France
et de nationalité française

acceptée sur proposition du jury:

Prof. Ph. Renaud, directeur de thèse
Dr G.-L. Bona, rapporteur
Prof. N. de Rooij, rapporteur
Prof. Y.-A. Peter, rapporteur
Prof. H. R. Shea, rapporteur

Lausanne, EPFL
2005

ABSTRACT

The present thesis deals with Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) optical switches for telecommunication applications. The aim is to study new type of microsystems for guided-wave optical switching applications. Two projects have been investigated.

The first part addresses a novel technological and design study of $N \times N$ optical switch integration with planar waveguides and vertical displacement micro-mirrors. Novel suspended MEMS mechanical platform on SOI wafer were designed and realized and technological processes for optimization of micro-mirrors quality have been developed. The motivation of this study was related to initial collaboration with the company Memscap S.A. which was looking for compact and fast $N \times N$ optical switches based on planar waveguides. One of the key issue being waveguide integration, a concept of a hermetic packaging with two wafers assembly where a waveguide wafer is placed face down on top of MEMS electrostatic devices with vertical micro-mirrors has been developed. Vertical micro-mirrors have been fabricated in SU8 photopolymer or in single crystalline silicon. For integration of silicon mirrors, a new simple two-steps DRIE pattern transfer that allow simultaneous fabrication of good quality silicon mirrors and of recessed mechanical platform has been demonstrated. The platform has been analysed through its resonance behaviour. The strong effect of mechanical non-linearity which was observed in clamped suspension can be exploited to increase the control range of the electrostatic actuator.

During the first part of this work on MEMS optical switches based on planar waveguides, a totally new approach that use hollow waveguide instead of solid core waveguide has been developed. The primary motivation was whether it was possible to integrate a micromechanical switch composed of a vertical silicon cantilever beam mechanism inside the air core of the hollow waveguide. Silicon Planar Hollow Waveguides (PHW) have been designed, realized and tested with different optical coatings: a metallic gold coating, dielectric bilayers based on the principle of AntiResonant Reflective Optical Waveguide (ARROW) and bare silicon. The influence of ARROW layers on hollow planar waveguides has been investigated. The very first PHW with integrated 1×2 optical switching have been manufactured and characterized. Switching times better than $10 \mu\text{s}$ were measured with the produced devices. The switching speed was about 100 times higher to other MEMS optical switches based on micro-mirrors.

VERSION ABRÉGÉE

La présente thèse traite de commutateurs optiques de type MEMS (microsystèmes électromécaniques) pour des applications en télécommunication optique. Le but étant de créer de nouveaux types de microsystèmes pour des applications de commutation en espace guidé. Deux projets ont été menés.

La première partie repose sur une nouvelle étude conceptuelle et technologique pour l'intégration de matrice de commutateurs $N \times N$ utilisant des guides d'ondes optiques planaires et le déplacement vertical de micro miroirs. De nouvelles plateformes mécaniques suspendues de type MEMS sur substrat SOI (silicium sur isolant) sont étudiées, optimisées et fabriquées et les procédés de microfabrication pour l'optimisation de la qualité des micro miroirs sont développés. La motivation de cette étude est liée à la collaboration initiale avec la start-up Memscap S. A. qui souhaitait acquérir une technologie lui permettant d'obtenir des matrices de commutateurs optiques $N \times N$ compacts et rapides basés sur des guides d'ondes planaires. Un des paramètres important étant l'intégration des guides d'ondes, un concept de conditionnement hermétique basé sur l'assemblage de deux tranches de silicium a été développé. Une tranche comportant les guides d'ondes est renversée puis positionnée face à une tranche comportant des plateformes de type MEMS actionnées électrostatiquement sur lesquelles reposent des micro miroirs verticaux. Ces miroirs verticaux sont fabriqués en photo résine SU8 ou bien en silicium monocristallin. Pour l'intégration de micro miroirs en silicium, un nouveau procédé de transfert de motif en deux étapes de gravure sèche profonde a été démontré qui permet la fabrication simultanée de miroirs en silicium ayant de bonnes qualités optiques et la définition des structures de suspension ainsi que de la plateforme mécanique. La plateforme a été caractérisée au travers de son comportement à la fréquence de résonance. L'important effet mécanique non linéaire qui a été observé dans le cas de suspensions doublement encastrées peut être utilisé pour augmenter la partie contrôlée du déplacement de l'actionneur électrostatique.

Durant la deuxième phase de ce travail sur les commutateurs optiques de type MEMS basés sur les guides d'ondes planaires, une nouvelle approche basée sur l'utilisation de guides optiques creux au lieu de guides optiques à coeur solide a été développée. La première motivation était de savoir si l'on pouvait intégrer un commutateur micromécanique composé d'une poutre verticale de silicium en console à l'intérieur du coeur d'air d'un guide optique creux. Des guides d'onde creux en silicium ont été optimisés, fabriqués et testés avec différentes couches

optiques: une couche métallique d'or et une couche basée sur deux épaisseurs de matériaux diélectriques basés sur le concept ARROW (guide d'onde optique en antirésonance réfléchissant) ainsi qu'un guide creux en silicium sans couche optique. L'influence des couches ARROW sur les guides d'onde creux a été analysée. Le premier guide d'onde creux avec un commutateur optique 1×2 intégré a été fabriqué et caractérisé. Des temps de commutation inférieurs à $10 \mu\text{s}$ ont été mesurés. Cette vitesse de commutation est 100 fois plus rapide que les autres commutateurs à base de micro miroirs MEMS.

TABLE OF CONTENTS

Summary	i
Version abrégée	iii
List of abbreviations	ix
List of symbols	xi
1 Introduction	1
1.1 Optical networks	2
1.1.1 Dense Wavelength Division Multiplexing	2
1.1.2 Hierarchy of optical networks	4
1.2 All-optical switching versus electrical switching	6
1.3 Optical switching applications	9
1.3.1 Protection switching	9
1.3.2 Network provisioning	10
1.3.3 Optical Add/Drop Multiplexers	11
1.3.4 Optical Switching Monitoring	11
1.4 Overview of Optical switches technologies	11
1.4.1 Optomechanical switches	13
1.4.2 Electrooptic switches	13
1.4.2.1 LiNbO ₃ optical switches	13
1.4.2.2 Semiconductor Optical Amplifier (SOA) switches	15
1.4.2.3 Liquid Crystal (LC) switches	15
1.4.2.4 Electroholographic (EH) switches	15
1.4.2.5 Electronically switchable Bragg gratings (ESBG)	15
1.4.3 Thermo-optic switches	16
1.4.4 Acoustooptic switches	17
1.5 MEMS strength for optical switching	17
1.6 State of the art of MEMS optical switches	19
1.6.1 MEMS mirrorless driven switches	19
1.6.1.1 Mobile optical fibers or planar waveguides	19

Table of contents

1.6.1.2	Fluid and bubble based switches	20
1.6.2	Micro-mirrors based optical switches	22
1.6.2.1	In-plane micro-mirrors for 3D analog switches application	23
1.6.2.2	Vertical micro-mirrors for 2D digital switches application	24
a)	Surface micromachined standing-up micro-mirrors	25
b)	Wet etched crystalline silicon micro-mirrors	26
c)	Plasma etched silicon micro-mirrors	27
d)	Silicon moulding replica micro-mirrors	29
e)	UV-LIGA micro-mirrors	29
1.7	MEMS optical switches analysis	30
1.8	Motivation and challenge of the presented thesis	32
1.9	Thesis outline	33
References		35
2	Fabrication of vertical silicon optical micro-mirrors for out-of-plane actuation	45
2.1	Optical design considerations	47
2.1.1	Micro-mirror design	48
2.1.2	Optical losses	52
2.2	Electromechanical design	54
2.2.1	Voltage controlled parallel plate actuator	54
2.2.2	Suspended platform design	58
2.2.2.1	2-beam cantilever suspension design	58
2.2.2.2	4-beam doubly clamped suspension design	59
2.3	SU8 vertical micro-mirrors	61
2.4	Silicon micro-mirrors and pattern transfer	65
2.5	Device Integration	68
2.6	Electromechanical characterization	71
2.6.1	2-beam cantilever suspension characterization	72
2.6.2	4-beam doubly clamped hammock suspension	75

2.7 Summary	78
References	81
3 Planar Hollow Waveguides (PHW)	83
3.1 Overview of hollow waveguides	85
3.1.1 Hollow circular optical fibers waveguides	85
3.1.2 Planar Hollow optical waveguides	85
3.2 Optical coatings	89
3.2.1 Metallic coating	89
3.2.2 ARROW coating	89
3.2.3 Bare Silicon	91
3.3 Square silicon planar waveguide theoretical analysis and design	92
3.4 Manufacturing of hollow planar waveguides	96
3.5 Planar hollow waveguides optical characterization	96
3.5.1 Optical setup	97
3.5.2 Optical measurements	99
3.6 Thin Film Transfer Matrix method for ARROW	102
3.7 Simulated reflectances of optical coatings	105
3.8 Discussion on the validity of ARROW analytical formulas.	108
3.8.1 Solid ARROW waveguides	108
3.8.2 Comparison with hollow ARROW publications	112
3.9 Optimization of hollow ARROW coating	115
3.10 On the usefulness of hollow ARROW waveguides	116
3.11 Summary	118
References	121
4 Micromechanical Optical Switch inside Hollow Planar Waveguides	125
4.1 Innovative Concept	126
4.2 MEMS switch electromechanical design	128
4.3 Fabrication process	134

Table of contents

4.4	Critical steps in fabrication	137
4.4.1	Photolithography	137
4.4.2	Dry etching	138
4.4.3	Releasing of switches	140
4.4.4	Dicing	141
4.5	Packaging	141
4.6	Switch characterization	142
4.6.1	Electromechanical measurements	142
4.6.2	Static optical measurements	143
4.6.3	Dynamic opto-electromechanical measurements	145
4.7	Summary	146
	References	148
5	Summary and Outlook	149
5.1	Fabrication of vertical silicon micro-mirrors for out-of-plane actuation	149
5.2	Planar hollow waveguides	151
5.3	A microelectromechanical optical switch inside hollow planar waveguides	152
5.4	Outlook	152
	Annex 1: Thin film transfer matrix method	155
	Acknowledgements	169
	Curriculum Vitae	171