



Universitat Autònoma de Barcelona

Integrated Optics Technology on Silicon: Optical Transducers

A thesis submitted to the
Universitat Autònoma de Barcelona
For the Degree of Doctor of Philosophy by

Andreu Llobera Adan

Departament of Physics
Universitat Autònoma de Barcelona
September 2002

En Carlos Domínguez Horna, Professor d'Investigació del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC) a l'Institut de Microelectrònica de Barcelona (IMB-CNM).

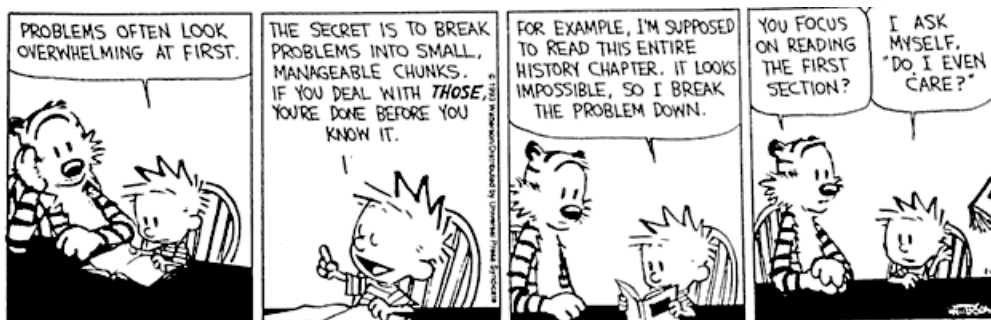
CERTIFICA:

Que la present memòria titulada "*Integrated optics on silicon: optical transducers*", ha estat realitzada sota la seva direcció per Andreu Llobera Adan, llicenciat en Físiques per la Universitat Autònoma de Barcelona, i que consisteix la seva Tesi per optar al Grau de Doctor en Físiques.

Bellaterra, Barcelona, Setembre 2002

Carlos Domínguez Horna

*A na Verònica
I a la meva família*



Agraïments

El problema dels agraïments es que mai saps com començar-los. Intentes fer-te mentalment un llistat de tota la gent als quals t'agradaria agrair el seu ajut. A més, escrius sota una gran pressió, ja que saps del cert que aquesta secció és la que tothom que pren un exemplar del treball a les seves manes, irremissiblement es llegeix. Espero no oblidar-me de ningú.

Voldria agrair principalment a en Carlos Domínguez Horna el seu constant suport i ajut durant els darrers cinc anys. Durant aquest temps, crec que hem passat de cap de grup i subordinat a companys de feina, e inclòs a companys de canyes. Sincerament crec que he tingut una gran sort al tenir un director de tesi com ell i espero seguir gaudint de la seva amistat en el futur.

També voldria començar els meus agraïments mencionant al meu tutor, en Jordi Pascual, per les seves constants indicacions i el seu recolzament. Així mateix, els seus comentaris sobre les propietats dels materials han sigut d'una gran vàlua a l'hora de realitzar aquest treball.

Asimismo, debo a Marifi, del Grup d'Òptica de la Universitat Autònoma de Barcelona el haber conocido a Carlos Domínguez. Tuve la suerte de tenerla como profesora durante la carrera y todavía más suerte al tenerla como amiga al acabarla. Su amabilidad y simpatía, así como su enorme conocimiento, la hacen merecedora de mi respeto y admiración.

També voldria agrair especialment al Grup de Transductors Químics Integrats: en Toni, n'Alfredo (i a la Fanny), na Nerina (i a l'Ernesto), na Cecilia, na Carme (i en Vicenç), na Roser, en PacoXavi, na Lia, en Javi, na Montse, n'Andrey, na Natasha, na Maria Jose i n'Angel per fer de cada dia a la feina un dia especial, en el qual hi cabien la feina dura, les bromes i els riures. De veritat, gràcies.

Me gustaría agradecer a Iñigo Salinas, Nacho Garcés, Paco Villuendas y Javier Pelayo, de la Universidad de Zaragoza, su ayuda en la caracterización de dispositivos, así como las posteriores discusiones, siempre creativas, tratando de explicar el comportamiento de los mismos.

Asimismo, el constante interés de Laura Lechuga, Francisco Prieto, Borja Sepúlveda, Ana Calle y Javier Tamayo del Insituto de Microelectrónica de Madrid han sido determinantes para la realización de dicha tesis. En particular, quisiera agradecer a Francisco los datos referentes a la caracterización de los interferómetros.

També voldria expressar la meva gratitud envers la Mar Puyol i en Julián Alonso, del departament de Química Analítica de la UAB. A fi de comptes, ells eren els que confirmaven si els sensors d'absorció tenien el comportament predit. Les seves dades i opinions han sigut extremadament valuoses per les millores del dispositiu. Agraeixo especialment a la Mar que

tingués la paciència (i s'ha de tenir molta) d'explicar-me el funcionament de les membranes, així com la cessió les dades presentades en aquest treball.

No es posible olvidar el agradecimiento a José Antonio Plaza. En él he encontrado a alguien que es capaz de realizar una labor investigadora de muy alto nivel, manteniendo siempre el buen humor y las bromas. ¡Sus ideas y su entusiasmo parecen no tener fin!

Siguiendo con José Antonios, e igualmente igual de importante es el recuerdo dirigido a José Antonio Rodríguez, de la Universidad de la Habana. Cada vez que he tenido la suerte de tenerlo cerca, he aprendido muchas cosas, tanto en el terreno científico como en el humano.

Voldria deixar palesa també la meva gratitud envers Na Isabel Alonso, en Miquel Garriga, en Narcís Mestres, de l'ICMAB i també a n'Alí Benmessaoud, per la caracterització per el-lipsometria espectroscòpica de les mostres i, en general, per ajudar-me a entendre les propietats òptiques dels materials.

I would also like to thank Don Johnson, Scott Heidemann and Mark Shaw, from Microchem® for their help, support and dedication that allowed obtaining the first SU-8 waveguides at CNM. I am fully convinced that polymer integrated optics would be a low-cost mass-production process and I hope that our collaboration will be even tighter in the following.

En ésta tesis, hay una parte importante de simulación. Ésta no habría sido posible sin la ayuda de David Jiménez, de la ETSEE (UAB) el cual siempre tuvo un momento para comparar mis simulaciones con las suyas.

També voldria agrair a en Salvador Hidalgo, n'Alberto Moreno, i en Toni Fauquet la seva ajuda durant els processos de tallat i polit de les mostres. Se que a vegades la feina era extremadament feixuga (especialment en oblies amb vidre) i la cura en el seu treball mereix ser valorada.

Voldria tenir unes paraules d'agraïment (i a la vegada demanar perdó) a tothom el personal de Sala Blanca (tant del CNM com de la UAB) que alguna vegada va tenir contacte amb els runs –WGT o –ORA (especialment aquests últims) se que generalment feiem processos no estàndards, i cada cop més arriscats i complicats, que a vegades duïen a desastres de proporcions èpiques (microelectrònicament parlant). Les trucades dient: *Andreu, tienes el Run XX-WGT en hold, mira en Baco* o *Andreu, tu Run ha terminado* generalment significaven l'èxit o el fracàs en l'obtenció de dispositius. Al principi de començar a fer processos, les trucades més freqüents eren les primeres. Afortunadament, les coses han anat canviant (però no del tot).

Agraeixo a en Raúl Arbues, en Humberto Mata y na Loreta Gutiérrez, de D+T Microelectrónica, per la seva total confiança i suport durant el projecte Ikerlan. Se que van haver-hi moments molt delicats en els quals el projecte perillava molt. La seva professionalitat en aquelles circumstàncies va ser providencial.

Tenir al voltant persones com en Pepe Millán, en Xavi Jordà, en Miquel Vellvehi, en David Flores, en Jaume Esteve o l'Enric Cabruja indubtablement feien la feina més amena. En

general, crec que a l'IMB hi ha un gran potencial, tant de feina com d'amistat. Espero i desitjo que encara vagi a millor en el futur pròxim. Entusiasme no manca.

També voldria mencionar als Serveis informàtics del CNM, Ramón Pallàs, Nieves González i Xevi Formatgé per la seva diligència i amabilitat a l'hora de solucionar-me problemes informàtics. Sembla que la informàtica i jo no som gaire bons amics, especialment en l'entorn UNIX.

Bona part d'aquesta tesi no s'hagués escrit sense l'ajut de la Maria, que va ser capaç de trobar articles relacionats que ni tan sols sabia que existien. També agraeixo a les noies d'administració per ajudar-me entre el mar de paperassa (i pels viatges!!). Tampoc puc oblidar-me dels mecànics, en Rus i en Felipo, per fer-me mil i un *jugetets* amb els quals fer mesures i per les *reunions* al bar.

Agraeixo als habitants nocturns del centre: en Fermín, en Juan, en José i també a en Xavi i a en Jaume, per la seva companyia durant les nits al centre escrivint aquesta tesi.

Voldria tenir un especial record als companys de la jaula de [l@s](#) fieras i rodalies, passats i presents, com en Miguel Ullan, en Joan Marc, n'Errachid, na Nadia, en Miguel Zabala, en Nourdin, n'Enrique, n'Anna, en Guillem o en Martin, per crear l'ambient de companyerisme i amistat que ens caracteritza (i que duri!!!).

Però com em moc massa, també feia vida a un segon despatx, on viu na Raquel, na Marta, en Juan Cazalla, en José Antonio, en Felipe i na Neus (i el seu Kisàs). Primerament vull excusar-me per estar de vegades més temps en aquest despatx que en el propi, però el projecte Ikerlan ho requeria. Voldria expressar-los el meu més cordial afecte i simpatia.

Agraeixo a la meva família, i al *tercer fill*, en Xavi, el tenir-los allà sempre que els he necessitat, disposats a ajudar en qualsevol moment o circumstància. Fer el doctorat significa, tant pel doctorand com per la seva família, tota una sèrie d'esforços i tensions. Crec que sense ells tot hauria sigut molt més difícil.

I si tenia dos despatxos, he tingut la sort de tenir dues famílies. Per tant, també agraeixo a la meva segona família, En Joan (petit), na Minerva, na Encarna, na Judith i en Joan (gran) per tots els entretinguts caps de setmana que he passat a casa seva, i que espero que continuïn en el futur.

When I first wrote to Heather, in 1989 (more or less) I couldn't imagine that we would keep in touch for so long. I was very lucky on meeting such a nice family: Brenda, Kalani, Kelly and Larry, thanks for everything. I hope that next time we meet won't be in ten years'time!

No se si algun dia llegiran aquestes ratlles, de totes maneres, voldria expressar el meu més sincer agraïment als meus antics companys de promoció: en Jordi (Soler), en Tino, en Lluís, na Txell, en Ramón, na Silvia, n'Annabel, en Jordi (Valls), en Sito i especialment a en

Roger Lecina per les innumerables hores que vaig tenir la sort de gaudir de la seva companyia i amistat.

També voldria agrair a tots els amics que he tingut a la meua vida, en especial na Meritxell, en Xavi, en Toni, na Elisenda, na Emi, na Tere Utrera, en Gabriel López, n'Alejandro Palomo, en Oscar Esteban, en David Carpio, na Toñi, els germans Ernesto e Ivan Plà o en Tayeb. Amb alguns, afortunadament encara mantinc el contacte, amb altres, no. De totes maneres, se que si alguna vegada ens trobem, reaccionarem com si només fes un parell de dies que no ens veiem.

Respecte als agraïments, hi ha una cosa que no entenc, i es que com pot ser que la persona més important vagi sempre la darrera. Li dec massa a na Verònica per dedicar-li només quatre ratlles. Se que sense ella, aquesta tesi mai hagués estat escrita. El seu amor i comprensió han estat els principals motors que m'han permès seguir endavant en els pitjors moments. Saber que la tenia allà quan la necessitava era, és i espero que continuï essent, el principal motiu per començar cada dia amb renovats ànims i il·lusions.

Se que em deixo algú, i és imperdonable, si algú creu que hauria d'estar a l'anterior llista però no s'ha trobat, segurament tindrà raó. Per aquest motiu, voldria donar un últim agraïment a totes aquelles persones que han fet possible, d'una manera o altra, aquesta tesi.

Moltes gràcies a tots.



Index

Chapter 1: Introduction	
Objectives of the Thesis	8
Chapter 2: Foundations and Proposals	
2.1 Introduction	11
2.2 ARROW Waveguides	15
2.2.1 Theoretical Expressions	16
2.2.2 Numerical Simulations	21
2.3 Design of Passive Integrated Optical Devices	35
2.3.1 Power Optical Devices	36
2.3.1.1 Chemical Application: Absorption Sensor	37
2.3.1.2 Physical Application: Uniaxial Optical Accelerometers	39
2.3.1.2.1 Diaphragm Uniaxial Optical Accelerometer	43
2.3.1.2.2 Misalignment Uniaxial Optical Accelerometer	45
2.3.2 Interferometry-based Devices	46
2.3.2.1 Interferometric Devices I: Mach-Zehnder Interferometer (MZI)	47
2.3.2.2 Interferometric Devices II: Multimode Interference Couplers (MMI)	49
2.3.3 Evanescent Field Devices	55
Chapter 3: Technological Aspects	
3.1 Introduction	63
3.2 Layers for Integrated Optics Applications	66
3.2.1 Evaporative Methods	66
Sputtering	67
3.2.2 Gas-phase Chemical Processes	68
3.2.2.1 Thermal Growth	68
3.2.2.2 Deposition Processes: Chemical Vapor Deposition (CVD)	70
Atmospheric and Low Pressure CVD	76
Plasma-enhanced CVD	79
3.3 Photolithography	82
3.3.1 Photoresist	83
3.3.2 Mask	85
3.3.3 Exposition	87
3.4 Etching	89
3.4.1 Wet Etching	89
3.4.1.1 Anisotropic Etching on Silicon	91
3.4.1.2 Isotropic Etching	95
3.4.2 Dry Etching	96
3.5 ARROW Structures: Fabrication	101
3.6 Cutting and Polishing	120
Chapter 4: Numerical Analysis and Optimization	
4.1 Introduction	125
4.2 Waveguides	125
4.3 Directional Couplers	135
4.4 3dB Splitters/Junctions	148
4.5 Mach-Zehnder Interferometer	155
4.6 Absorption Sensor	162
4.7 Diaphragm Uniaxial Optical Accelerometer	164
4.8 Misalignment Uniaxial Optical Accelerometer	171

Chapter 5: Fabrication and Characterization	
5.1 Introduction	179
5.2 Experimental Setups	179
5.3 Waveguides	182
5.3.1 Rib Waveguides	182
5.3.2 ARROW-2D	188
5.4 Directional Couplers	194
5.4.1 Rib Directional Couplers	194
5.4.2 ARROW-2D Couplers	198
5.5 3dB Splitters/Junctions	200
5.6 Mach-Zehnder Interferometers	202
5.7 Absorption Sensor	208
5.8 Diaphragm Uniaxial Optical Accelerometer	219
5.9 Misalignment Uniaxial Optical Accelerometer	227
Conclusions	241
Future Work	249
Historical Overview	



Aquesta Tesi es va acabar d'escriure el 20 de Juliol de 2002