

Capítol 5.

Estudi de la propagació de la llum en guies modificades localment

Fins ara ens hem centrat en el que podríem anomenar una caracterització convencional de guies fabricades per tècniques microelectròniques. Estudiant el comportament modal i determinant l'índex efectiu de propagació a través del perfil del camp evanescent hem obtingut important informació que els tecnòlegs i dissenyadors han d'aplicar alhora de realitzar nous i millors dispositius. Aquesta però, no és l'única faceta en què l'SNOM pot ser de gran utilitat. La possibilitat d'obtenir imatges òptiques d'alta resolució localment el fa extremadament interessant per obtenir informació sobre la propagació òptica per sota del límit de resolució. Aquesta informació serà de vital importància per comprendre el funcionament de dispositius optoelectrònics cada cop més petits, i també per obtenir noves regles de disseny per miniaturitzar els components òptics integrats. Com a exemple d'estudi de dispositius podem citar el treball de Vander Rhodes et al [1] on estudien l'emissió d'una VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser) localment, obtenint la distribució espacial del bombeig d'intensitat en funció de la longitud d'ona, o el treball de Balistreri et al [2] on estudien la distribució òptica d'una microcavitat en funció de la posició i la longitud d'ona, validant el model teòric per simular aquesta estructura que pot ser utilitzada com a filtre. En ambdós casos la resolució és inferior a $\lambda/2$, límit de resolució pel microscopi òptic convencional.

També es pot utilitzar l'SNOM per estudiar fenomenologia més bàsica. Exemples d'això en són els treballs de Bourzeix et al [3] on visualitzen experimentalment per primer cop un efecte descrit a finals dels anys 60 anomenat efecte Tien, i que té a veure amb la modulació que sofreix la propagació de la llum degut a no tenir un perfil d'índex perfectament ideal del tipus esglaó. Vander Rhodes et al [4], per altra banda, visualitzen

ones estacionàries formades entre les dues cares de la guia com si d'una cavitat es tractés. Finalment, també podem citar el treball de Balistreri et al [5] sobre la interferència entre els modes fonamentals TE i TM verticals i que ja hem descrit al tercer capítol. Aquests estudis ens donen informació per sota del límit de resolució òptic dels microscopis òptics convencionals, de forma que aquesta informació serà de gran utilitat quan es vulguin dissenyar dispositius nous i més petits.

Per últim, i gairebé podríem dir que com a aplicació perfecta i única per l'SNOM, cal parlar de les cada cop més interessants i desenvolupades tècniques per a construir *bandgaps* fotònics en estructures basades en guies d'ona, tal i com fan, per exemple, Foresi et al [6]. En aquest treball creen sobre una guia de Si una estructura periòdica de forats de forma que aquesta estructura periòdica genera un *bandgap* fotònic, impedit que es propaguin tota una banda de longituds d'ona. A més a més, introduint un defecte en aquesta estructura, que no és més que la falta d'un dels forats, creen un filtre passa banda molt selectiu per una certa longitud d'ona. Les possibilitats d'aquests nous tipus de materials i estructures amb un *bandgap* fotònic són enormes, i per tant el seu interès va creixent constantment. Basats en estructures d'aquestes, Chutinan et al [7] proposen nous dispositius òptics integrats de dimensions molt menors a les convencionals, com ara moduladors o multiplexors, així com corbes de 90° que preserven la propagació. Així doncs, la caracterització SNOM d'aquestes noves estructures i dispositius serà sense cap mena de dubte la més apropiada. Un exemple d'això és el treball de Phillips et al [8], on observen per primer cop l'estructura òptica formada en una estructura de fotònic *bandgap*.

En aquest capítol descriurem dues tècniques diferents per modificar guies d'ona convencionals, per tal d'aconseguir nous dispositius, i la seva caracterització amb l'SNOM. En primer lloc tractarem de modificacions per escriptura directa amb làser sobre la guia, de forma que s'elimina la necessitat de màscares addicionals per realitzar el dispositiu, tot i que la resolució alhora de dibuixar-los no és superior a les tècniques litogràfiques convencionals. En segon lloc tractarem de modificacions mitjançant litografia per AFM, amb una resolució superior a l'anterior, permeten crear nous dispositius de dimensions nanomètriques, i al l'igual que abans sense necessitat de màscares addicionals. A part del procés de fabricació veurem la caracterització òptica d'aquestes modificacions, i veurem algun efecte òptic nou fins ara. Els resultats aconseguits demostren la possibilitat de realitzar noves estructures de dimensions submicromètriques, i la possibilitat d'estudiar la propagació a aquesta escala. A les referències [9,10] es troben reflectits els resultats d'aquest capítol.

5-1. Modificació de guies de Si₃N₄ mitjançant litografia LASER.

Mitjançant la litografia làser es pot aconseguir escriure directament sobre materials sensibles a la llum incident, provocant canvis en l'estructura del material. Svalgaard et al [11] ho utilitzen per definir directament guies sobre una superfície fotosensible mitjançant un làser Ultraviolat (UV) provocant canvis locals en l'índex de refracció de l'estructura. El mateix autor ha utilitzat l'SNOM per caracteritzar l'estructura formada

[12], tot i que només pot realitzar mapes de l'índex de refracció de la mostra, de forma que observem com ha quedat definida l'estructura, però no com és la propagació a través de l'estructura.

Al nostre cas, utilitzarem guies rectes de nitrur de silici prèviament fabricades, i modificarem l'estructura definint formes geomètriques sobre la guia, per tal de provocar canvis en la propagació de la llum. Aquestes estructures es realitzaran eliminant una part de la guia que volem modificar, i es realitzaran mitjançant una combinació d'escriptura làser i atac RIE. Les modificacions que descriurem a continuació s'han realitzat durant una estada d'una setmana al laboratori de nanotecnologia del Dr.F.Grey al Microelektronik Centret de Dinamarca, seguint el sistema descrit per Boisen et al [13]. Aquest sistema consisteix en el següent procés: primer es diposita per *electron beam deposition* (EBD) una capa d'entre 5nm a 10nm d'Alumini sobre la guia de nitrur de silici. D'aquesta forma escrivint amb el làser evaporarem l'alumini de la zona que volem definir. Això es degut a que focalitzem el làser amb prou potència per provocar un escalfament prou alt de l'alumini com per evaporar-lo. Això explica perquè no podem escriure directament sobre el nitrur, ja que la fusió del material és a temperatura molt superior. Un cop eliminat l'alumini podem utilitzar la resta d'alumini com a màscara per un atac RIE, de forma que finalment obtenim l'estructura desitjada. Finalment s'elimina l'alumini mitjançant un atac químic en una solució d'àcid fosfòric.

El procés per realitzar aquesta modificació està esquematitzat a la figura 5-1. Un làser d'Argó de fins a 2W de potència es focalitza sobre la mostra sobre la qual es vol incidir. La mostra es troba sobre un sistema motoritzat automatitzat que permet definir una màscara sobre la qual el làser incidirà, així com la potència de làser i la velocitat d'escriptura.

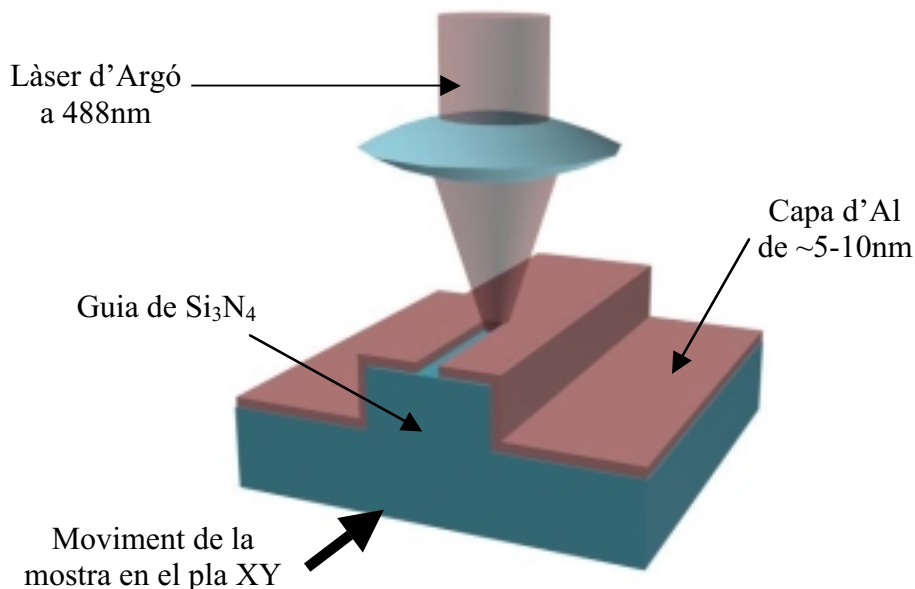
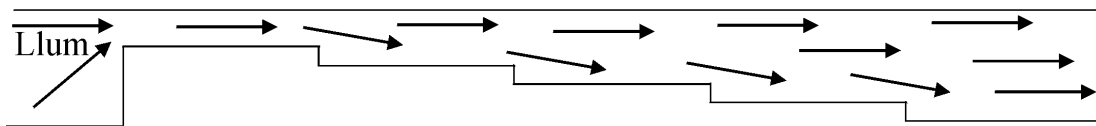


Figura 5-1. Esquema del procés de modificació mitjançant làser. Un làser d'Argó incideix focalitzadament sobre una zona de la mostra fent evaporar l'alumini de la zona dibuixada pel làser. D'aquesta forma s'obre una finestra a la guia per un possible atac RIE.

La mínima resolució amb aquest sistema està al voltant de la micra, de forma que l'estructura de les modificacions que definirem seran de tamany relativament gran. A la figura 5-2 presentem dos exemples del tipus de modificació que es poden realitzar amb aquest sistema. La figura 5-2a correspon a una constricció en forma d'escala. La guia sobtadament esdevé molt més estreta, i en esglaons successius retorna a la seva amplada anterior. D'aquesta forma hi ha un procés d'amotllament de la distribució modal d'un costat a l'altre que per analogia pot servir per estudiar *tapers* o estructures que acomoden la propagació de la llum en estructures d'amplada diferent, minimitzant les pèrdues [14]. La figura 5-2b correspon a un acoblador. En aquest cas la distància d'acoblament és aproximadament d'1 μ m, i per tant la longitud d'acoblament és de 576 μ m, molt inferior al cas de l'acoblador ARROW mesurat. En ambdós casos les modificacions es realitzaran sobre diverses guies, ja que al ser el primer cop que es realitza aquest procés en alumini sobre nitrur de silici, no sabem a priori quina és la potència mínima necessària per evaporar l'alumini, i per tant es realitzarà a potències creixents des de pocs mW fins a uns centenars de mW.

Taper en forma d'escala



Acoblador



Figura 5-2. Dos exemples de modificacions proposades per a realitzar per escriptura làser. La primera correspon a una estructura que deforma el mode de propagació i la segona és un acoblador de dimensions reduïdes.

El primer que podem comentar dels resultats obtinguts és que el sistema no ha tingut èxit, ja que no s'ha aconseguit evaporar l'alumini en cap cas. A potències baixes, semblants a les utilitzades per l'òxid de silici, simplement no s'ha aconseguit res. Això podria ser degut a que el muntatge no estava optimitzat, de forma que no s'ha focalitzat correctament el làser sobre l'estructura, i per tant no s'ha arribat a la temperatura necessària per evaporar l'alumini. Al passar a potències més altes, en canvi, tot i no haver evaporat l'alumini, si s'ha modificat la guia. Tal i com suggereixen Boisen et al [13], probablement no s'ha arribat al valor llindar per a l'evaporació, però al ser un procés tèrmic, s'ha aconseguit una aliatge d'alumini, òxid d'alumini i nitrur de silici.

A la figura 5-3 podem observar el resultat de la primera modificació, consistent en una escala creixent a la guia. Tal i com ja hem comentat, no s'ha aconseguit eliminar l'alumini, de forma que l'estructura queda amb una capa de material a sobre que la fa

més alta. A més a més, aquesta modificació no ha quedat ben centrada, de forma que els últims esglaons queden fora de la guia. La llum incideix des de la part esquerra.

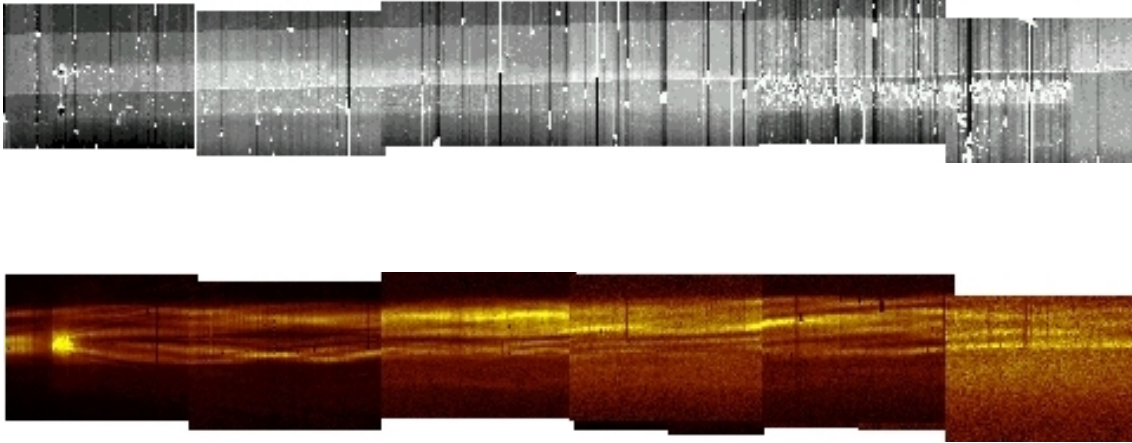


Figura 5-3. Imatges topogràfica i òptica de la primera modificació descrita a la figura 5-2. El rang des imatges són de $39\mu\text{m}\times 550\mu\text{m}$. La guia fa $16\mu\text{m}$ d'amplada. La modificació consta de 5 esglaons de $100\mu\text{m}$ d'allargada per $2\mu\text{m}$ d'amplada.

També es poden observar uns forats a la part esquerra de la modificació, que corresponen a l'encès del làser, ja que aquest escriu per línies en la direcció de la guia, de forma que quan realitza el camí de retorn s'apaga, i al realitzar l'encès sobre la mateixa zona s'ha eliminat l'alumini, i fins i tot part del nitrur de silici, ja que el forat té gairebé 100nm de profunditat. A la imatge òptica podem veure com el punt situat dins la guia provoca molta dispersió, reflectida en un punt molt intens a la imatge que podem observar més clarament al zoom de la figura 5-4.

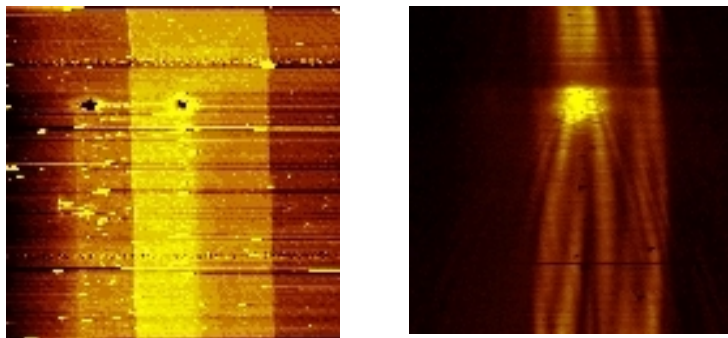


Figura 5-4. Imatges topogràfica i òptica de $39\mu\text{m}\times 88\mu\text{m}$ sobre l'inici de la modificació on el làser ha perforat la guia.

Tot i la llum dispersada, es pot observar la propagació modal amb claredat. És important notar com la llum es propaga tant per la guia no modificada com per la zona modificada, de forma que l'objectiu inicial d'impedir la propagació a la zona modificada no és compleix, però alhora ens indica que el material format és un compost amb comportament dielèctric, ja que permet la propagació de la llum sense dispersió. També podem observar que el tipus d'interferència modal és superior a la zona modificada, mentre que a la zona sense modificar pràcticament és del mateix tipus que a les guies convencionals estudiades al capítol 3. Això vol dir que en la zona modificada la llum excita modes d'ordre superior, i per tant l'índex efectiu de propagació és menor a la zona modificada. Per assegurar-nos d'aquesta afirmació fora bo realitzar rampes intensitat-distància punta-mostra per avaluar el camp evanescent, cosa que realitzarem sobre la següent modificació mostrada a la figura 5-5.

A la imatge topogràfica de la figura 5-5 es pot distingir clarament l'estructura que defineix l'acobrador, tot i que amb més relleu, de forma que igual que abans, no s'ha aconseguit evaporar l'alumini, i en canvi s'ha produït un nou material que ha crescut per sobre l'alçada de la guia. També en aquest cas la llum viatja per tota la guia, tant a la part modificada com la no modificada. La separació entre guies a la zona estreta on s'ha intentat realitzar l'acobrador és de $3.5\mu\text{m}$, superior a la prevista teòricament.

Igual com a la imatge anterior les interferències són superiors a la zona modificada, i això és nota tant al principi com al final, de forma que es passa de tenir guia+modificació (amb més interferències a la zona modificada) a tenir modificació+guia (amb més interferències igualment a la zona modificada).

A la figura 5-6 es mostra un zoom sobre una zona de la guia, amb uns perfils topogràfic i òptic. En aquest cas és pot observar més clarament el diferent comportament modal a cada zona. Del perfil topogràfic es desprèn que la modificació sobrepassa entre 5 i 10nm la guia, i tenint en compte que inicialment es dipositaren aproximadament 5nm d'alumini, sorprèn que el comportament modal sigui tant marcadament diferent, ja que aparentment semblaria que aquesta modificació només pot provocar un efecte superficial, però en canvi això no explicaria aquesta gran quantitat d'interferències.

De forma molt més simple es podria pensar, observant els perfils òptic i topogràfic de la figura 5-6, que potser només es tracta d'una modulació degut a la rugositat. Si ens fixem a la zona modificada, la rugositat és important en relació a la zona modificada, de forma que potser la llum només reflexa el canvi d'intensitat degut al perfil que segueix la punta, que té molts alts i baixos. Això també explicaria la major quantitat d'interferències observades, ja que simplement reflexaria el tamany d'aquesta rugositat, i la propagació quedaria emmascarada sota d'aquest efecte, tot i que curiosament no provocaria cap mena de dispersió.

Tot i que sembla una explicació plausible, per assegurar-nos de la seva validesa podem realitzar unes rampes verticals, i veure si la longitud de decaïment és la mateixa a les dues zones, de forma que certificaria que la modificació no produeix un efecte real sobre la propagació, sinó només un efecte d'interferències superficials.

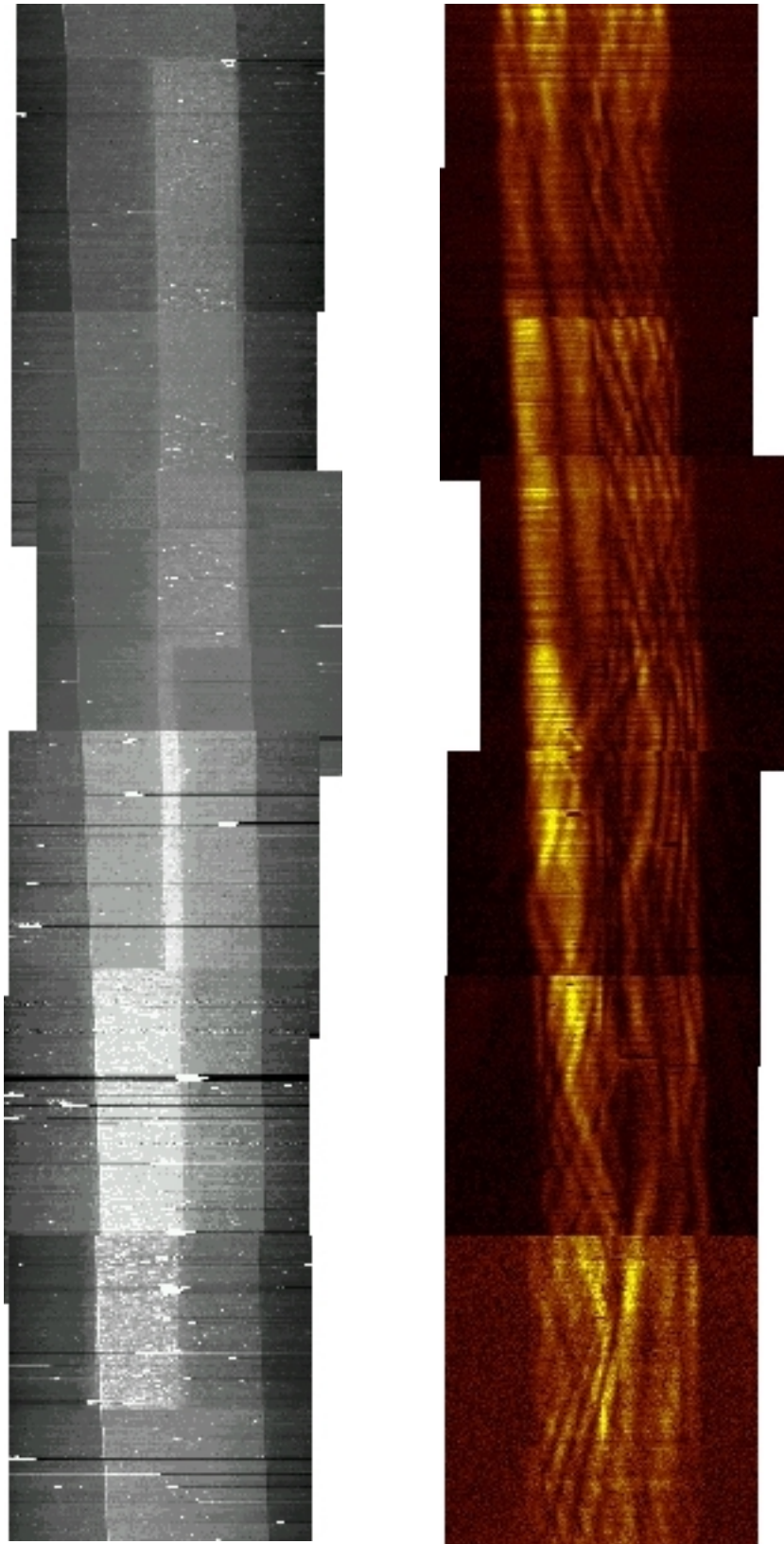


Figura 5-5. Imatges topogràfica i òptica d'una modificació làser en forma d'acoblador. El rang de les imatges és de $44\mu\text{m}\times 700\mu\text{m}$. La guia té $25.5\mu\text{m}$ d'amplada. La distància entre les dues guies a la zona amb la modificació més estreta és de $3.5\mu\text{m}$.

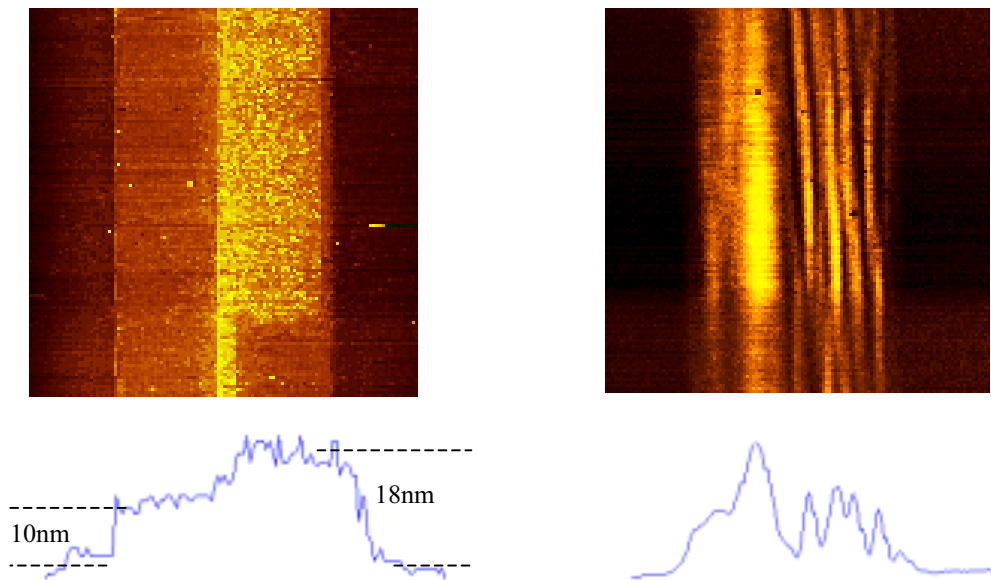


Figura 5-6: Zoom sobre una part de la zona modificada, de $44\mu\text{m}\times 39\mu\text{m}$. Al perfil topogràfic es pot distingir la superior rugositat de la part modificada, que sobresurt entre 5-10nm de la guia. Igualment a la part òptica es pot distingir clarament la superior quantitat d'interferències sobre la zona modificada.

Per tal d'obtenir aquesta informació, s'ha realitzat unes rampes sobre la zona modificada i la zona sense modificar. A la figura 5-7 podem veure el resultat d'aquestes mesures. La longitud de decaïment és superior a la zona modificada, indicant que l'índex efectiu de refracció en aquesta zona és inferior. De fet, tenint en compte els valors calculats, de 37nm a la zona sense modificar i de 42nm a la zona modificada, a partir de l'expressió (3-22) calculem l'índex efectiu a la zona modificada, que val 1.56, molt lluny dels 2 del Si₃N₄ o dels 1.69 del mode de propagació fonamental, tal i com correspon a la zona sense modificar. Així doncs, semblaria ser que la modificació és molt superior a la prevista, i el canvi en la propagació òptica no és un simple efecte de la rugositat a la superfície.

Per intentar esbrinar alguna informació més sobre la modificació podem intentar realitzar unes simulacions. En aquest cas tindrem dos graus de llibertat, la profunditat de la modificació i l'índex de refracció del material format, que són paràmetres que no coneixem. A partir d'aquests dos paràmetres i tenint en compte que l'alçada de la guia més la modificació és de 158nm (150 de la guia + 8 de la modificació) es pot intentar reproduir l'índex de refracció efectiu, que és de 1.56.

Abans de tot però, fixem-nos en els casos extrems. Si busquem quina ha de ser la mínima modificació ens trobarem que aquesta ha de ser de 70nm, amb un índex de refracció del material format igual al de l'aire ($n=1$). Evidentment l'índex haurà de ser d'índex superior, fins arribar a l'altre extrem, quan la modificació ocupa tot el gruix de la guia (per tant és de 158nm de profunditat). En aquest cas l'índex de refracció del

material seria semblant al de l'òxid d'alumini ($n \sim 1.7$). Qualsevol altre cas estaria entre els dos exposats, i gruixos més petits o índex més grans no podrien fitar l'índex de refracció efectiu mesurat. En resum, la modificació hauria de ser superior a 70nm, cosa que sembla força difícil d'explicar si tenim en compte que la potència del làser no ha estat suficient com per evaporar un gruix d'entre 5 a 10nm d'alumini, i en canvi sí seria suficient per fondre l'alumini i el nitrur de silici fins a més de 70nm de profunditat.

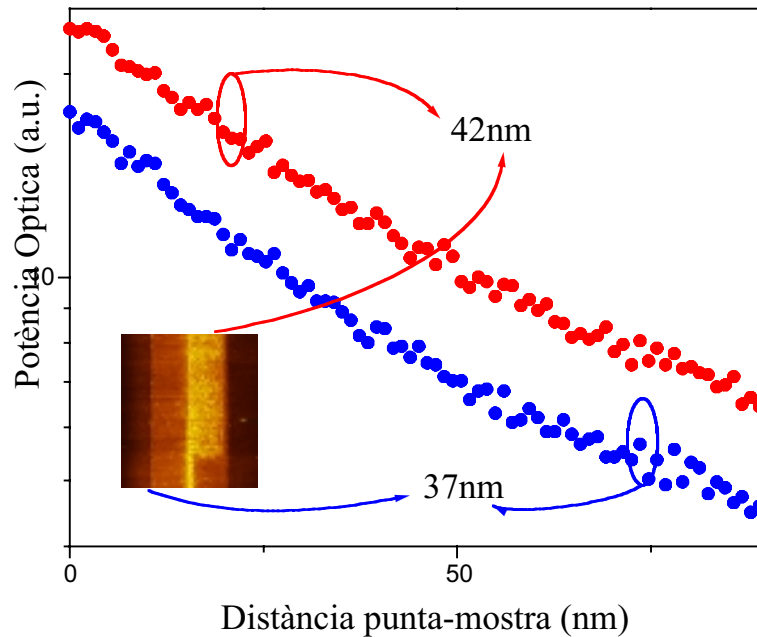


Figura 5-7. Representació del camp evanescent a la zona modificada (vermell) i a la zona sense modificar (negre). La longitud de decaïment val 42nm a la zona modificada i 37 a la zona sense modificar.

També hi ha, però, una altra possibilitat, i és una conversió o acoblament del mode de propagació TE a TM a la zona modificada, ja que l'índex efectiu d'aquest mode és de 1.53 per aquesta guia. En aquest cas el gruix o l'índex de refracció de la zona modificada no seria tant important, sinó més aviat el seu efecte sobre la propagació, que consisteix en canviar la polarització de la llum. El procés pel qual es realitza aquesta conversió no és gens clar, però vindria relacionat amb alguna mena de tensió mecànica introduïda al créixer el nou material, de forma que es manifestarien efectes d'anisotropia en aquest material format, i per tant la llum ja no hauria de conservar la polarització [15]. Per investigar més a fons el material format, es va pensar en provar alguna altra tècnica per mesurar el gruix de la capa formada o la composició d'aquesta. El problema per aplicar altres tècniques és que la modificació és molt petita, tant de gruix ($\sim 170\text{nm}$) com d'àrea ($10\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$), i per tant tècniques com l'elipsometria, que permetrien trobar l'índex de refracció o el gruix no són aplicables. També s'ha descartat el TEM, que podria semblar útil per trobar el gruix de la modificació, degut al procés necessari per preparar la mostra.

La conversió TE-TM també explicaria perquè la propagació modal té més interferències, doncs a partir de simulacions com les realitzades al capítol 3, es comprova que les guies de nitrur suporten un nombre de modes laterals superior per al cas TM. Així doncs, el dispositiu format no seria el desitjat inicialment, que consistia a realitzar un acoblador, però en canvi s'ha aconseguit realitzar un sistema que canvia la polarització de la llum. Dispositius d'aquest tipus són molt interessants en aplicacions sensores o de sistemes amb coherència òptica, i normalment es realitzen per modificacions periòdiques de l'estructura [16]. També s'han realitzat dispositius conversors de polarització a través de modificacions de l'estructura vertical de la guia [17], tal i com també és el nostre cas. Per provar definitivament aquesta hipòtesi s'hauria de mesurar la polarització a la sortida de la modificació, cosa que no permet realitzar el muntatge actual.

Podem acabar aquesta secció conclouent que amb el làser és possible realitzar modificacions, tant a nivell topogràfic com de propagació de la llum, en guies de nitrur de silici, tot i que el procés de modificació encara no està optimitzat, de forma que caldria assegurar-se l'evaporació de l'alumini per tal d'utilitzar l'alumini restant com a vertadera màscara, i poder realitzar modificacions en profunditat. També és interessant, però, continuar estudiant les modificacions quan no s'evapora l'alumini, per intentar estudiar i aconseguir dispositius conversors de polarització.

5-2 Modificació de guies per AFM.

El següent pas, un cop s'ha comprovat que les guies es poden modificar, és realitzar-ho mitjançant un procés més acurat, que permeti modificar-les més controladament i amb més resolució. Seguint el mateix procediment descrit per Boisen et al [13], la modificació per AFM en combinació amb un atac RIE ens proporciona aquestes característiques. El procés és semblant a l'anterior, tot i que en aquest cas la geometria es definirà mitjançant oxidació per AFM. Una altra diferència és que ara no s'evaporarà l'alumini, sinó que s'oxidarà. Un cop oxidat, mitjançant un atac químic selectiu s'elimina o bé l'alumini restant o bé l'òxid d'alumini format, i s'utilitza l'altre com a màscara.

El procés complert està esquematitzat a la figura 5-8 sobre una modificació real realitzada amb l'AFM, i que consisteix en una constricció sobre una guia de $3\mu\text{m}$ d'amplada pels dos laterals. El primer pas, com abans, és el de dipositar una capa d'alumini d'entre 5-10nm per EBD sobre la guia de nitrur de silici. A continuació s'ha de definir l'estructura sobre la guia. Això es realitza oxidant localment mitjançant un escombrat amb la punta de l'AFM polaritzada a un voltatge negatiu respecte l'Alumini de la superfície. Per oxidar tota la capa d'alumini d'àrees de $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ s'ha utilitzat un voltatge de 30V i una freqüència d'escombrat de 0.1Hz. A la figura 5-8a podem veure el resultat d'aquest procés, on també podem observar un perfil topogràfic, on es veuen les superfícies oxidades que han crescut per sobre de la resta de l'estructura 5.5nm.

El tercer pas consisteix a eliminar l'òxid d'alumini mitjançant un atac químic a 60°C durant 10min. en una solució d'àcid fosfòric i triòxid de crom. El resultat es pot observar a la figura 5-8b, i és una finestra oberta a la capa d'alumini que deixa el nitrur de silici a l'aire. Utilitzant la resta l'alumini com a màscara, el quart pas consisteix a realitzar un atac RIE de la superfície de nitrur de silici exposada a l'aire. El gruix d'alumini és suficient per impedir l'atac iònic de penetrar a la zona protegida. El resultat es mostra a la figura 5-8c, i representa un atac de 15segons en condicions d'atac RIE estàndard com l'utilitzat al capítol 3, aconseguint rebaixar la zona exposada 18nm. Finalment l'últim pas és eliminar l'alumini restant amb un atac en una solució d'àcid fosfòric fins a eliminar tot l'alumini.

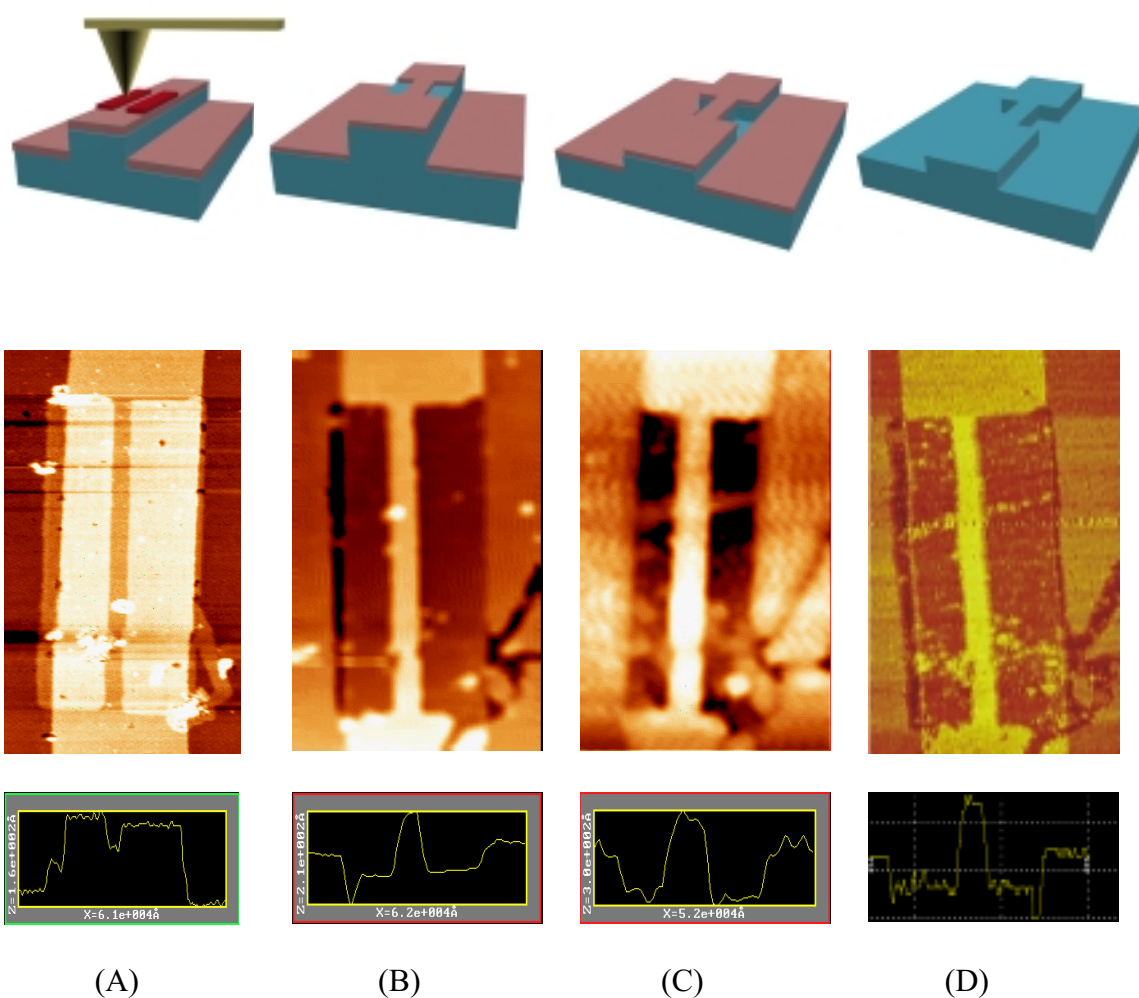


Figura 5-8. Seqüència d'imatges topogràfiques de $5\mu\text{m}\times 14\mu\text{m}$ corresponents al procés de modificació dels laterals d'una guia, mostrant perfils transversals de cada pas. (a) Després de l'oxidació local induïda per AFM a la capa d'alumini (la part oxidada sobresurt 5.5nm per sobre la resta de l'estructura) (b). Després de l'atac químic per eliminar l'òxid d'alumini (l'alçada de l'esglaó central és de 12nm) (c) Després del RIE a la finestra oberta al nitrur de silici (l'esglaó central té 30nm). (d) Un cop eliminat la resta d'alumini per atac químic (l'esglaó final fa 18nm).

El resultat final de tota la modificació es pot veure a la figura 5-8d. S'ha aconseguit eliminar lateralment una part de la guia, deixant una estructura central de 0.5micres d'amplada i una longitud de 10µm. La diferència d'alçada entre la zona central i els laterals eliminats és de 18nm.

La resolució, doncs, és molt alta, i encara pot ser millorada. Com a contrapartida però, les dimensions globals de les modificacions són petites, de forma que pot representar un problema alhora de definir estructures complexes. Per solucionar això hi ha l'alternativa proposada per Abadal et al.[18], on utilitzen un esquema híbrid de modificació amb làser i AFM alhora. Finalment afegim que a part de la modificació anterior també s'han realitzat altres tipus de modificacions, tal i com veurem a les imatges.

A la figura 5-9 podem veure una sèrie d'imatges topogràfiques i òptiques sobre diferents zones de la guia modificada anteriorment. La imatges 5-9a i 5-9b corresponen a una zona abans de la modificació en el camí que segueix la llum. Les imatges tenen un rang de 11.5µm×39µm, i tot i que només sembla haver-hi dos màxims lateralment, que podria correspondre a un mode de primer ordre, també podem observar una modulació de període molt petit en la direcció de propagació. A les imatges 5-9c i 5-9d es pot observar la topografia i la propagació òptica a la zona modificada. Aparentment no hi ha cap diferència respecte la imatge anterior, ja que s'observa el mateix tipus de distribució òptica i la mateix modulació vertical de la llum.

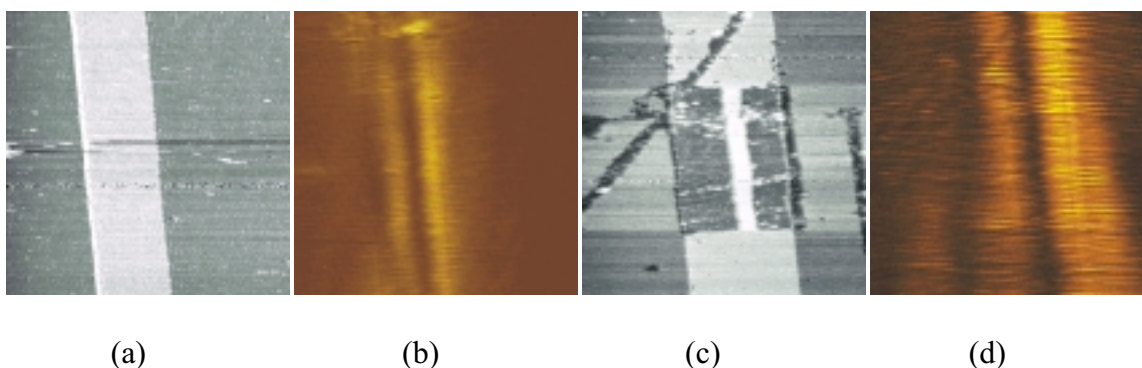


Figura 5-9. Imatges topogràfiques i òptiques d'una guia modificada (a) i (b) de 11.5µm×39µm, abans de la zona modificada (c) i (d) de 7.5µm×18µm a la zona modificada. S'observa una modulació vertical a les dues imatges òptiques, i per tant no sembla que sigui degut a la modificació.

Si realitzem un zoom sobre la zona modificada (figura 5-10), podem observar més clarament aquesta modificació. El rang de les imatges en aquest cas és 11.5µm×10.5µm. Aparentment no hi ha cap efecte diferent de la part sense modificació, tot i que sí podem observar una distribució òptica curiosa formada just a la frontera superior entre la guia i la modificació, i que té la forma d'un “ull”. Això podria ser degut a una redistribució de la llum a la interfície entre la zona modificada i sense modificar, i per tant correspondria a un efecte localitzat en la propagació degut a la modificació realitzada.

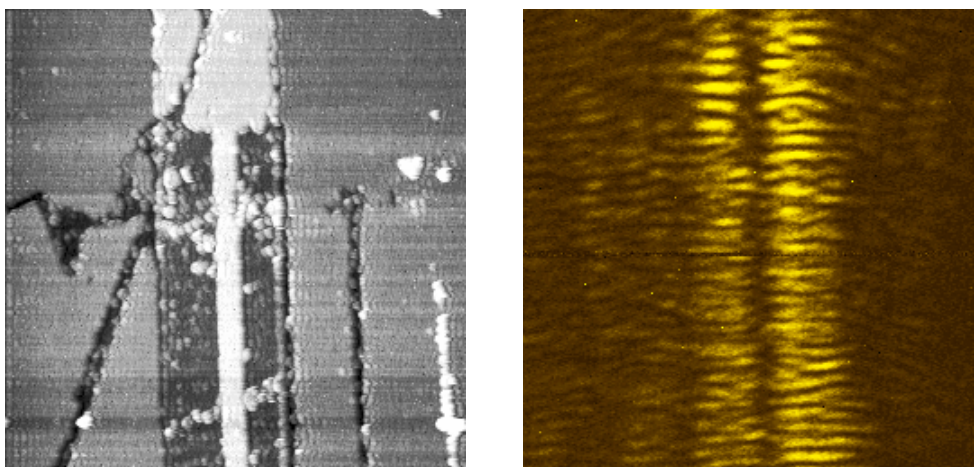


Figura 5-10. Imatges topogràfica i òptica de $11.5\mu\text{m}\times 10.5\mu\text{m}$ sobre la zona modificada. És pot observar clarament la modulació vertical de la llum.

Passem a continuació a una altra modificació, presentada a la figura 5-11. En aquest cas es tracta d'un tall rectangular sobre una guia de $4\mu\text{m}$ d'amplada, amb una profunditat de 10nm i una longitud d' $1.5\mu\text{m}$. En aquest cas la intenció és veure com passa la llum d'un costat a l'altre d'una guia d'on se n'ha eliminat un tall. El primer que podem observar és una modulació vertical com al cas anterior. A més a més, la intensitat de la llum és màxima a la zona modificada, però això correspon al fet que la punta s'enfonsa més cap al nucli de la guia en aquesta zona, i per tant la intensitat augmenta. A part d'això, i tal i com ha passat anteriorment, la llum no sofreix altres efectes.

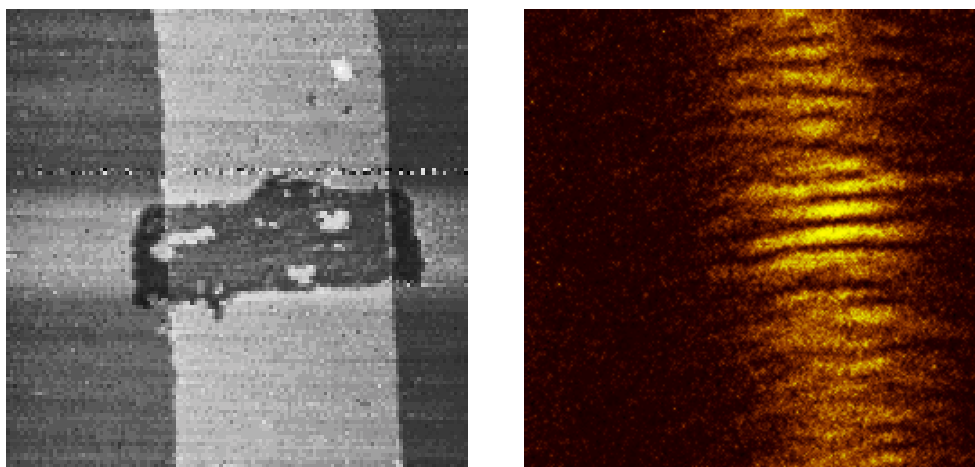


Figura 5-11. Topografia i propagació òptica d'una guia de $4\mu\text{m}$ d'amplada. Les imatges són de $7.8\mu\text{m}\times 7.1\mu\text{m}$. La modificació és un tall a la guia de $5\mu\text{m}\times 1.5\mu\text{m}$ de 10nm de profunditat.

A la figura 5-12 mostrem un perfil topogràfic i un perfil òptic extrets de la figura 5-11. Del perfil òptic podem extreure el valor de la modulació vertical, que és de 335nm. Alguns autors [19] han trobat modulacions semblants, atribuïbles a una ona estacionària provocada al realitzar talls a la guia, de forma que la llum es reflecta parcialment en aquest talls, provocant ones estacionàries. Una modulació d'aquest tipus, però, tindria un valor $\lambda/2n_{eff}$, inferior a 200nm en aquest cas, i que per tant no coincideix en absolut amb el valor mesurat. A més a més, caldria que la modificació de la guia fos prou profunda com per permetre un coeficient de la llum reflectada elevat, tal i com hauria de ser per provocar una modulació de la intensitat tan visible. Al nostre cas, en canvi, les modificacions són molt superficials.

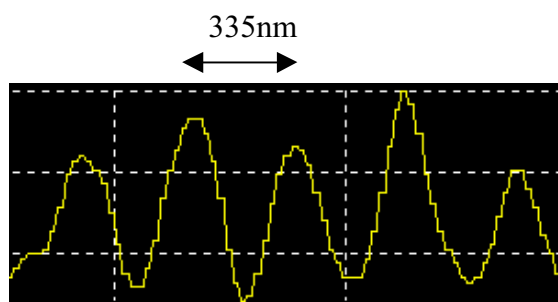


Figura 5-12. Perfil òptic de la modulació corresponents a la imatge 5-11. El període mesurat és de 335nm.

Una altra possibilitat és la proposada per Bourzeix et al [3], que observant un tipus de modulació semblant als seus dispositius l'atribueixen a l'efecte Tien [20], que és un efecte degut a la modulació que sofreix la llum al propagar-se per una estructura amb un perfil d'índex de refracció diferent de l'ideal, del tipus esglaó (amb un valor constant a cadascuna de les capes que formen la guia). De fet, representa la competència entre dos efectes diferents: el confinament degut la distribució d'índex de refracció, que al ser superior a la capa central tendeix a confinar la llum en aquesta capa, i la difracció produïda per aquesta mateixa capa, que té 150nm de gruix, i que per tant representa una esclatxa que tendeix a difractar la llum. Un efecte semblant es dona a les fibres òptiques d'índex gradual, on el feix viatja helicoidalment al voltat de l'eix de la fibra [21].

Al nostre cas tindrem un doble efecte sobre la propagació. D'una banda la trajectòria del feix de llum que es propaga per la guia queda modulada, i per altra banda el radi del feix que es propaga també sofrirà una modulació, de període diferent a l'anterior.

Per veure com s'obtenen els valors d'aquestes modulacions, estudiem aquest efecte amb una mica més de detall, seguint el procediment desenvolupat per Tien [20]. A partir del principi de Fermat, minimitzant el camí òptic podem trobar l'equació que descriu la trajectòria d'un feix de llum, que en aproximació paraxial i coordenades cilíndriques s'expressa com (fig. 5-13):

$$\frac{d}{dz} \left(n \frac{d\rho}{dz} \right) = \frac{\partial n}{\partial \rho} \cdot \rho \quad (5-1)$$

on $\rho(x,y)$ és la posició de qualsevol punt del feix que es propaga en la direcció z .

Pel cas de tenir un índex invariant en la direcció de propagació, tal i com és el nostre cas ($n=n(\rho)$), l'equació és pot expressar com:

$$\nabla_{\perp} n = \frac{d}{dz} \left(n \frac{d\rho}{dz} \right) = n \frac{d^2 \rho}{dz^2} \quad (5-2)$$

Una solució particular és quan l'índex de refracció és constant ($n=\text{constant}$): en aquest cas les solucions són trajectòries rectilínies.

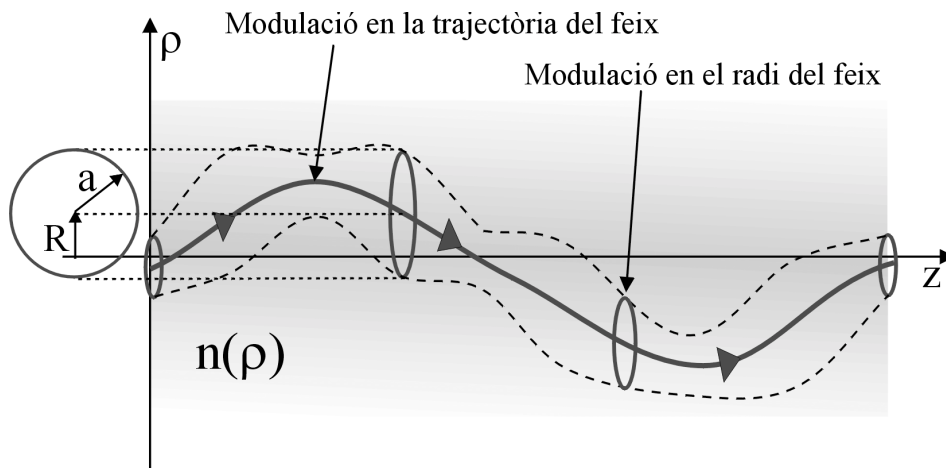


Figura 5-13. Definició de la trajectòria \mathbf{R} i radi \mathbf{a} d'un feix que es propaga en un medi d'índex gradual.

Definim primer la trajectòria del feix a partir de la figura 5-12, on \mathbf{R} és la trajectòria del centre del feix i \mathbf{a} el radi del feix, entès com el valor en que la intensitat decau I_{max}/e . D'aquesta forma descomponem l'equació 5-2 en dues, una per \mathbf{R} i l'altra per \mathbf{a} :

$$n \frac{d^2 \mathbf{R}}{dz^2} = \frac{\partial n}{\partial \rho} \Big|_{R,z} \mathbf{R} \quad (5-3)$$

$$n \frac{d^2 \mathbf{a}}{dz^2} = \frac{\partial n}{\partial \rho} \Big|_{R,z} (\rho - \mathbf{R}) + \rho (\rho - R) \frac{\partial^2 n}{\partial \rho^2} \Big|_{R,z} + \frac{n\mathbf{a}}{\beta_0^2 a^4} \quad (5-4)$$

on s'ha afegit un terme a l'última equació que representa la difracció del feix, amb $\beta_0 = 2\pi/\lambda$.

Per solucionar cal substituir $n(\rho)$ a les equacions (5-3) i (5-4). Al nostre cas suposarem una distribució del tipus paraboloides. Aquest tipus de perfil es dona en el creixement de guies per processos epitaxials, tals com els semiconductors III-V com l'InP o el GaAs [22]. A més a més, permet trobar una solució analítica del problema, que en primera aproximació ens servirà per veure si aquest pot ser l'efecte mesurat experimentalment. L'expressió de l'índex és, per tant:

$$n(r) \approx n_0 \left[1 - \Delta \frac{r^2}{h^2} \right] \quad (5-5)$$

$$\Delta = \frac{n_0 - n_s}{n_0} \quad (5-6)$$

on h és el radi del nucli i Δ la diferència d'índexs entre el nucli (n_0) i el substrat (n_s) normalitzat. L'aproximació realitzada per a un índex del tipus paraboloides és compleix per $\Delta \ll 1$. Les equacions del moviment queden:

$$\frac{d^2 \mathbf{R}}{dz^2} = -\sqrt{\frac{a^2}{2\Delta}} \mathbf{R} \quad (5-7)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{a}}{dz^2} = -\sqrt{\frac{h^2}{2\Delta}} \cdot \mathbf{a} + \frac{\mathbf{a}}{\beta_0^2 a^4} \quad (5-8)$$

La solució a la primera equació és del tipus periòdica, amb un període:

$$P_R = 2\pi \sqrt{\frac{a^2}{2\Delta}} \quad (5-9)$$

La segona equació és més complexa de solucionar, però finalment també dona una solució periòdica [20], de període la meitat de l'anterior:

$$P_s = \pi \sqrt{\frac{a^2}{2\Delta}} \quad (5-10)$$

Una cas particular és el corresponent a un feix viatjant per l'eix del sistema, que correspon al tipus d'injecció òptim de la llum. En aquest cas la trajectòria del feix no té modulació, però en canvi hi continua havent modulació en el radi del feix

Si passem al nostre cas, la capa superior correspon a l'aire, de forma que el gradient d'índex estarà entre el nucli i el substrat d'òxid de silici. Substituint a l'equació (5-10) els paràmetres de la guia de nitrur de silici descrita al capítol 3, el valor calculat de la modulació és de 320.5nm. Tot i que aquest valor no correspon exactament al valor mesurat, l'error és inferior al 5%, de forma que la correlació és excel·lent.

Un cop arribats a aquest resultat és interessant aturar-nos un moment a pensar què significa que hi hagi un índex no ideal del tipus esglaó. Recordem que l'òxid del substrat de la guia s'ha crescut tèrmicament, i això vol dir que és molt pla. Per altra banda, el nitrur de silici s'ha dipositat sobre l'òxid, i per tant hi hauria d'haver molt poca difusió del nitrur cap a l'òxid. De resultes, l'índex de refracció del nucli s'hauria d'acostar força a un valor ideal constant. Per altra banda, la capa d'òxid crescuda tèrmicament sí té un perfil que no és constant, i que correspon al procés de creixement de l'òxid [23]. Tenint en compte el poc confinament del mode de propagació vertical en aquest tipus de guia, degut al poc gruix del nucli, molt inferior a la longitud d'ona, el mode probablement penetra suficientment a l'òxid de silici com per notar l'efecte del seu perfil d'índex, de forma que és aquest qui provoca la modulació de la llum.

Observant el resultat, però, ens podem preguntar perquè al capítol 3 no havíem observat aquest tipus de modulació, ja que el tipus de guies és el mateix. L'explicació a aquest fenomen no és evident, però hi ha una diferència important entre aquest cas i les mostres estudiades al capítol 3, i és que les mostres actuals no estan polides. Habitualment, després de tallar les mostres es poleixen per les cares on s'injecta la llum, és a dir, a l'entrada i a la sortida de la guia, fins a aconseguir una qualitat òptica. D'aquesta forma, la llum que s'injecta pren totes les direccions possibles a dins la guia. Al nostre cas la guia no ha estat polida, i per tant l'entrada per on s'injecta la llum està formada per tota una sèrie de petites cares orientades depenen de com s'hagi fet el tallat mecànic de la mostra. D'aquesta forma la llum injectada pot prendre direccions privilegiades, i per tant se sumen intensitats en aquestes direccions, fent que l'efecte de la modulació de la llum pugui ser finalment observat. Altres autors també suggereixen que l'efecte de no polir la guia és determinant alhora d'obtenir la modulació observada a la llum [24].

Finalment, com a última observació sobre aquest efecte, és interessant notar que el període observat és de 335nm, i això significa que estem mesurant efectes amb una resolució superior a la permessa en camp llunyà (equació 1-1), i per tant hem sobrepassat el límit de resolució òptic convencional.

Per explorar-les un xic més l'efecte de les modificacions, a la figura 5-14 podem observar el resultat de realitzar diferents rampes a zones diferents de la guia modificada 5-8. La longitud de decaïment veiem que augmenta a la zona on s'ha rebaixat la guia, amb un valor de 37nm a la zona sense modificar i de 45nm a la zona modificada.

La diferència mesurada pot correspondre a un doble efecte. Per una banda hi ha el menor confinament que tindrà la guia a la zona modificada, ja que el nucli té 18nm menys que a la resta de la guia, cosa que significa un 12% de variació del tamany del nucli. Si calculem teòricament quina hauria de ser la longitud de decaïment sobre una

guia amb aquest tamany, trobem un que aquesta val 41nm, valor que podria explicar en part la mesura experimental. Per altra banda, s'haurà d'afegir l'efecte de la penetració de la punta a una zona on probablement també capta llum lateralment, corresponent a una barreja de camp evanescent lateral i dispersió lateral de la part de la guia no modificada.

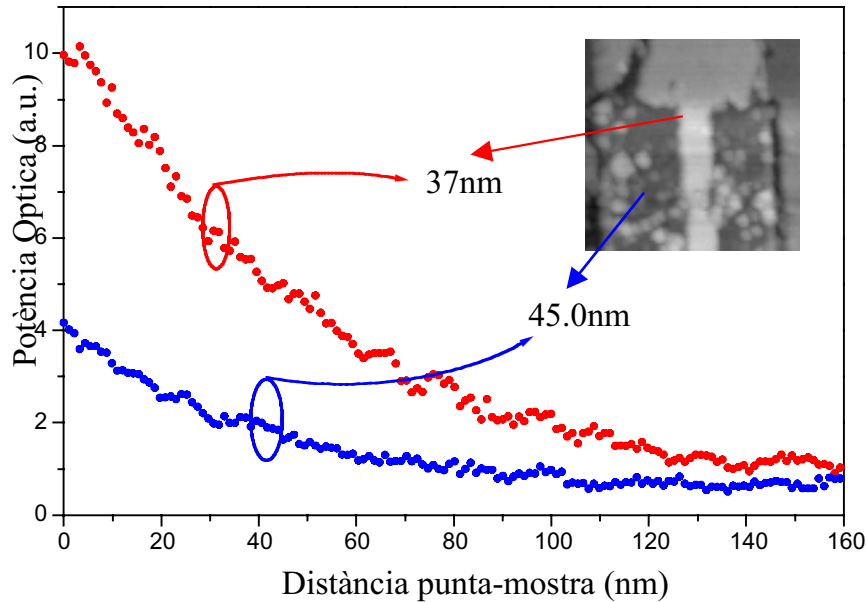


Figura 5-14. Perfils del camp evanescent sobre la guia de la figura 5-8, a la zona sense modificar i a la zona modificada.

Amb els resultats obtinguts fins ara de les modificacions mitjançant AFM, podem concloure que no hem estat capaços de modificar la propagació de la llum significativament. El següent pas, doncs, és realitzar una modificació més profunda, que simplement significarà més estona o més potència a l'atac RIE.

A la figura 5-15 podem veure el resultat d'aquesta modificació. Representa una perforació rectangular de 40nm de profunditat, 2µm d'amplada i 100µm de longitud. La modificació s'ha realitzat sobre una guia de 8µm d'amplada. El forat, tal i com és veu al perfil topogràfic, és molt més profund aquest cop, i ara sí que la propagació òptica es veu clarament modificada.

Tal i com s'observa a la imatge òptica, el forat rebutja la llum, que es veu dispersada cap als costats de la guia, de forma que la llum viatja pels dos laterals. Alhora es pot veure molta dispersió fora la guia. Tot i que el rang de la imatge no és prou llarg, es pot apreciar que quan la llum arriba al final de la modificació, la llum aparentment s'ajunta cap al centre de la guia, sense haver-hi dispersió cap als laterals. A partir d'aquí, si som capaços de modificar la propagació per una de les dues branques, estarem realitzant un interferòmetre de dimensions micromètriques.

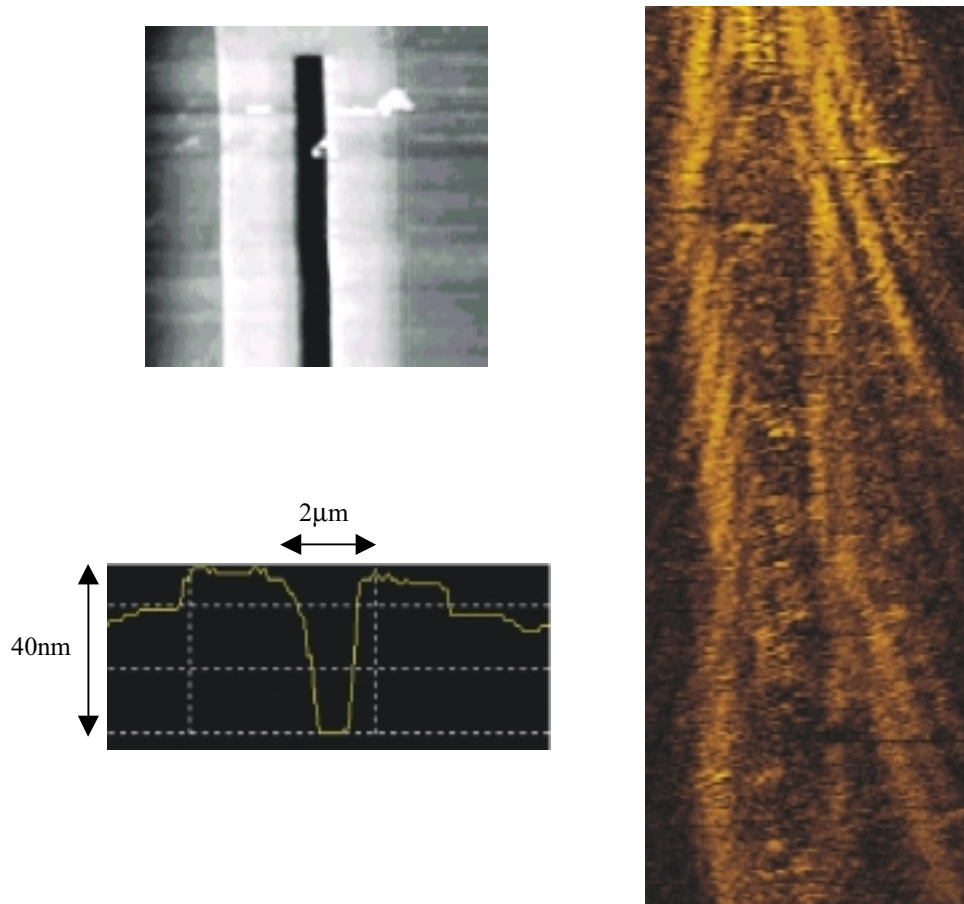


Figura 5-15. Imatges topogràfica i òptica d'una modificació més profunda sobre una guia de Si_3N_4 . (a) $16\mu\text{m}\times 14\mu\text{m}$ (b) perfil topogràfic mostrant la modificació, de dimensions $2\mu\text{m}$ d'amplada, 40nm de profunditat i $100\mu\text{m}$ de longitud (c) $16\mu\text{m}\times 116\mu\text{m}$.

Finalment podem afirmar que tot i que la qualitat de la modificació, reflectida a les imatges òptiques, no és molt bona, s'ha realitzat un primer pas per a la creació de noves modificacions que permetin realitzar nous dispositius, de dimensions menors, tal i com *bandgaps* fotònics o qualsevol altre tipus de dispositiu convencional de dimensions reduïdes, i alhora investigar el comportament de la llum en aquest nou rang de dimensions.

Referències

- [1] G.H. Vander Rhodes, J.M.Pomeroy, M.S.Ünlü, B.B.Goldberg, K.J.Knopp, D.H.Cristensen, “*Pump Intensity profiling of vertical-cavity surface-emitting lasers using near-field scanning optical microscopy,*” *Appl.Phys.Lett.* **72**, 1811-1813 (1998).
- [2] M.L.M. Balistreri, D.J.W.Klunder, F.C.Blom, A.Driessen, H.W.J.M.Hoekstra, J.P.Korterik, L.Kuipers, N.F.van Hulst, “*Visualizing the whispering gallery modes in a cylindrical optical microcavity,*” *Opt.Lett.* **24**, 1829-1831 (1999).
- [3] S.Bourzeix, J.M.Moison, F.Mignard, F.Barthe, A.C.Borccara, C.Licoppe, B.Mersali, M.Allovon, A.Bruno, “*Near-field optical imaging of light propagation in semiconductor waveguide structures,*” *Appl.Phys.Lett.* **73**, 1035-1037 (1998).
- [4] G.H.Vander Rhodes, B.B.Golberg, M.S.Ünlü, S.T.Chu, W.Pan, T.Kaneko, Y.Kokobun, B.E.Little, “*Measurements of internal spatial modes and local propagation properties in optical waveguides,*” *Appl.Phys.Lett.* **75**, 2368-2370 (1999).
- [5] M.L.M. Balistreri, A.Driessen, J.P.Korterik, L.Kuipers, N.F.van Hulst, “*Quasi interference of perpendicularly polarized guided modes observed with a photon scanning tunneling microscope,*” *Opt.Lett.* **25**, 637-639 (2000).
- [6] J.S.Foresi, P.R.Villeneuve, J.Ferrera, E.R.Thoen, G.Steinmeyer, S.Fan, J.D.Joannopoulos, L.C.Kimerling, H.I.Smith, E.P.Ippen, “*Photonic-bandgap microcavities in optical waveguides,*” *Nature* **390**, 143-145 (1997).
- [7] A.Chutinan, S.Noda, “*Highly confined waveguides and waveguide bends in three-dimensional photonic crystal,*” *Apl.Phys.Lett.* **75**, 3739-3741 (1999).
- [8] P.L.Phillips, J.C.Knight, B.J.Mangan, P.St.J.Russell, M.D.B.Charlton, G.J.Parker, “*Near-field optical microscopy of thin photonic crystal films,*” *J.of Apl.Phys.* **85**, 6337-6342 (1999).
- [9] X.Borrisé, N.Barniol, F.Pérez-Murano, G.Abadal, X.Aymerich, D.Jiménez, “*Optical Waveguides Characterization by Scanning Near Field Optical Microscope,*” *Proc. MRS'99* **588**, 37-42 (2000)
- [10] X.Borrisé, G.Abadal, F.Pérez-Murano, D.Jiménez, A.Boisen, Z.Davis, F.Grey, N.Barniol, “*Light propagation on chemically modified optical integrated waveguides by SNOM,*” Enviat a publicació.
- [11] M.Svalgaard, “*Optical waveguides and gratings made by UV-photogeneration,*” *Proc. ECIO'99*, 333-338 (1999).

- [12] M.Svalgaard, S.Madsen, J.M.Hvam, M.Kristensen, “*Direct Characterization of Ultraviolet-Light-Induced Refractive Index Structures by Scanning Near-Field Optical Microscopy*,” IEEE Phot.Technol.Lett. **10**, 848-850 (1998).
- [13] A.Boisen, K.Birkelund, O.Hansen, F.Grey, “*Fabrication of submicron suspended structures by laser and atomic force microscopy lithography on aluminum combined with reactive ion etching*,” J.Vac.Sci.Technol.B **16**, 2977-2981 (1998).
- [14] K.De Mesel, I.Moerman, R.Baets, B.Dhoedt, P.van Daele, J.Stulemeijer, “*Spot Size Converters for Low Cost PICs*,” Proc. ECIO’99, 253-258 (1999).
- [15] F.J.Leonberger, J.P.Donnely, “*Guided-Wave Optoelectronics*,” Ed. T.Tamir, Springer-Verlag, capítol 6 (1988).
- [16] K.Mertens, B.Scholl, H.J.Schmitt, “*Strong Polarization Conversion in Periodically loaded strip Waveguides*,” IEEE Phot. Technol. Lett. **10**, 1133-1135 (1998).
- [17] K.Mertens, B.Opitz, R.Hövel, K.Heime, H.J.Schmitt, “*First Realized Polarization Converter Based on Hybrid Supermodes*,” Phot.Technol.Lett. **10**, 388-390 (1998).
- [18] G.Abadal, A.Boisen, Z.J.Davis, O.Hansen, F.Grey, “*Combined laser and atomic force microscope lithography on aluminum: Mask fabrication for nanoelectromechanical systems*.” Appl.Phys.Lett. **74**, 3206-3208 (1999).
- [19] C.Peeters, E.Flück, A.M.Otter, M.L.M.Balistreri, J.P.Korterik, L.Kuipers, N.F.van Hulst, “*Photon Scanning tunneling microscopy of tailor-made photonic structures*,” Appl.Phys.Lett. **77**, 142-144 (2000).
- [20] P.K.Tien, J.P.Gordon, J.R.Whinnery, “*Focusing of a Light Beam of Gaussian Field Distribution in Continuous and Periodic Lens-Like Media*,” Proc.IEEE, 129-136 (1965).
- [21] B.E.A.Saleh, M.C.Teich, “*Fundamentals of Photonics*,” capítol 8, John Wiley & Sons (1991).
- [22] T.Tamir, “*Guides-Wave Optoelectronics*,” Springer Verlag (1988)
- [23] S.M.Sze, “*Semiconductor Devices, Physics and Technology*,” John Wiley & Sons, capítol 9 (1985).
- [24] Comuniació privada amb el Dr. J.M.Moison del laboratori “Concepts and devices for photonics” de France Telecom.

Conclusions

- En aquesta tesi s'ha dissenyat i construït un microscopi òptic de camp proper especialment dissenyat per a la caracterització d'estructures òptiques integrades. El capçal construït és de tipus *stand-alone*, i s'ha fet compatible amb un banc òptic de mesura estàndard de components òptics integrats. L'escàner té uns rangs d'escombrat de $150\mu\text{m}\times 300\mu\text{m}$ en el pla i $4.5\mu\text{m}$ verticalment, i és possible desplaçar-lo per tota la mostra per obtenir imatges sobre tot el dispositiu a mesurar.
- Amb el microscopi SNOM construït es poden obtenir diferents tipus d'informació. Per una banda es pot caracteritzar topogràficament la mostra sense malmetre-la, amb una resolució inferior al nanòmetre verticalment i als 10nm al pla de la mostra. Per altra banda és l'únic instrument que permet realitzar mesures òptiques de la propagació modal en dispositius de guiat òptic, amb una resolució que sobrepassa el límit de difracció de Rayleigh. A més a més, mitjançant rampes d'acostament punta-mostra, es pot avaluar l'índex efectiu de propagació de la guia, i estudiar els mecanismes d'interacció punta-mostra.
- Per avaluar el funcionament i les possibilitats de l'SNOM s'ha aplicat a diferents tipus d'estructures i dispositius. En primer lloc s'han estudiat guies de nitrur de silici, a continuació guies i dispositius ARROW, i finalment s'han proposat dos mecanismes de modificació de guies de nitrur de silici, per tal d'estudiar els efectes de modificacions locals en la propagació de la llum, tal i com les necessàries per crear *bandgaps* fotònics.
- L'estudi de les guies de nitrur ha mostrat en primer lloc, la propagació modal per l'estructura, mostrant interferències que, comparades amb simulacions teòriques, permeten identificar els modes presents a la guia, i s'ha vist que segons les condicions d'injecció, aquests modes poden variar. També s'han estudiat les condicions d'atac RIE per obtenir guies d'entre 2nm i 4nm d'alçada. Finalment també s'ha determinat la longitud del camp evanescent i s'han observat unes estructures de llum periòdiques possiblement degudes a la interferència entre els modes TE_0 i TM_0 .
- Estudiant la propagació en guies ARROW s'ha pogut determinar les condicions per a la propagació monomode, així com també s'ha pogut observar el camp evanescent corresponent al mode lateral, responsable del funcionament dels acobladors direccionals. La caracterització topogràfica ha permès mesurar la

rugositat de la superfície, així com la verticalitat de les parets de la guia, paràmetres tecnològicament importants alhora d'eliminar pèrdues per dispersió. També s'ha mesurat l'alçada i l'amplada de diferents guies.

- A partir de les mesures de dos dispositius ARROW, una unió en Y d'un interferòmetre i un acoblador direccional, s'han obtingut paràmetres de funcionament del dispositiu importants. En el cas de l'acoblador s'ha pogut tenir una mesura indirecta de la longitud d'acoblament a partir de les imatges realitzades a diferents zones del dispositiu. Per la unió en Y s'ha mesurat el perfil de camp evanescent, determinant alhora d'utilitzar-ho per aplicacions sensores. També s'ha pogut mesurar l'obertura de la unió en Y, conclouent que s'ha de disminuir per tal de reduir les pèrdues per dispersió provocades en aquest punt.
- Mitjançant escalfament local per làser s'ha modificat l'estructura de la guia de nitrur de silici, permetent dibuixar directament la màscara sobre la guia. El dispositiu aconseguit d'aquesta forma ha modificat visiblement la propagació de la llum per l'estructura, augmentant el nombre d'interferències modals i més important, variant l'índex de refracció efectiu de propagació a la zona modificada. S'ha atribuït aquest fet a la conversió de la polarització TE a TM.
- A partir d'un procés d'oxidació per AFM d'alumini dipositat sobre la guia i un procés RIE s'han realitzat diverses modificacions sobre guies de nitrur de silici. A partir d'aquestes modificacions s'ha pogut observar que per modificacions de poca profunditat (<20nm) la propagació pràcticament no es veu afectada, mentre que per modificacions més profundes (>40nm) la llum clarament modifica la seva propagació. També s'ha observat una modulació en la propagació, de període 335nm. Aquesta modulació s'anomena efecte Tien, i és conseqüència del fet que els índex de refracció de l'estructura que forma la guia no són constants a cada capa.

Llista d'acrònims

| | |
|---------|---|
| AFM: | Atomic Force Microscope |
| ARROW: | Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide |
| DP: | Dither Piezo |
| EBD: | Electron Beam Deposition |
| FD-BPM: | Finnite Diference Beam Propagation Method |
| LPCVD: | Low Pressure Chemical Vapor Deposition |
| MO: | Microscòpia Òptica |
| PECVD: | Pressure Enhanced Chemical Vapor Deposition |
| PID: | Proporcional-Integrador-Derivador |
| PSTM: | Photon Scanning Tunneling Microscope |
| RMS: | Root-mean-square |
| RIE: | Reactive Ion Etching |
| SEM: | Scanning Electron Microscope |
| SF: | Shear Force |
| SNOM: | Scanning Near Field Optical Microscope |
| SPM: | Scanning Probe Microscope |
| STM: | Scanning Tunneling Micsroscope |
| TEM: | Transmision Electron Microscope |
| TF: | Tuning Fork |

Agraïments

En primer lloc vull agrair a la Núria Barniol l'haver acceptat dirigir-me la tesi. Sempre optimista sobre les possibilitats del microscopi, m'ha donat un constant suport i empena durant tots aquests anys.

Igualment vull agrair a la resta de companys de recerca les moltes i interessants aportacions en les discussions sobre el plantejament d'experiments i els resultats. El Francesc ha estat un *quasi*-director d'aquesta tesi, participant de bona part de les discussions i decisions durant aquest treball. Al David li vull agrair les fructíferes discussions teòriques mantingudes, el resultat d'algunes de les quals es veuen reflexats a la tesi en forma de simulacions. També vull agrair al Gabriel l'ajut en la realització de les modificacions de l'últim capítol, així com per haver-me ensenyat a fer funcionar el primer STM que vaig tocar, i per les llargues estones de laboratori compartides.

Al Carlos Domínguez li vull agrair especialment l'haver-me proporcionat les mostres que han servit per la realització de la tesi, així com per la seva disposició a escoltar i discutir sobre els resultats obtinguts. La col·laboració amb l'IMB ha estat essencial per al desenvolupament d'aquesta tesi.

I am really grateful to Niek van Hulst, from the University of Twente, for providing me the opportunity to stay at his lab for almost 6 months, during which I learned very much about SNOM techniques for developing the microscope. Also I would like to remember María, who introduce me to Niek; Marcello, for giving me the oportunitie to work with his SNOM, and the fruitfull discussions about the microscope and the results; and Jeroun for the technical support while developing the microsocope.. Finally I would thank you the rest of the TOP-10 people for make my stay pleasant at Twente.

Thanks also to F.Grey for providing us the facilities to use the laser for the waveguide modifications on chapter 5, and Anja and Zach for the technical help in using it.

Al Joan, company de promoció i despatx durant tots aquests anys, per compartir moltes confidències, a voltes bones a voltes no tant, i a l'Arantxa i el Gabriel, posteriors companys quan ens vam mudar de despatx, per les sessions de safareig a porta tancada (no ho féiem per la fred ni la calor!).

Igualment vull agrair a la resta de membres de departament la cordial convivència durant tots aquests anys, així com a tothom qui pugui sentir-se oblitat en aquestes ratlles: prometo que no ho he fet expressament.

Finalment a l'Imma i als meus pares vull agrair-los el suport incondicional durant tots aquests anys, i el creure en mi encara que no entenguessin molt bé (jo a vegades tampoc!) què fa tan interessant això de fer recerca que no et preocupin ni les hores dedicades ni l'estar mal pagat.