

Capítol 4.

Caracterització de guies ARROW

Degut a l'alt grau de desenvolupament de les tècniques de fabricació i deposició de materials sobre el silici, així com el seu baix cost per la seva capacitat de producció en massa, l'elecció d'aquest material per a la fabricació de components òptics integrats sembla més que justificada. Aquesta elecció però, comporta un desavantatge important, i és la dificultat de trobar materials per dipositar amb un índex de refracció superior al silici (~3,5-3,8 depenent de la longitud d'ona). A més a més, el silici no és transparent a la longitud d'ona de 633nm (vermell), a la qual nosaltres realitzarem les mesures. Així doncs, primer cal dipositar una capa amb un gruix suficient per impedir que el camp guiat arribi al silici. Aquesta capa farà de substrat de la guia. El material que fa aquesta funció és una capa de SiO₂ tèrmic, amb un índex de refracció de 1.46. A continuació es diposita el nucli de la guia. Una primera possibilitat força habitual és la guia d'òxid de silici. En aquest cas es diposita sobre l'òxid tèrmic una capa d'òxid de silici no-estequiomètric SiO_x, de forma que se'n pot controlar l'índex de refracció, que es fa lleugerament superior al tèrmic. D'aquesta forma s'obté un contrast d'índex que permet que la llum quedi confinada. Finalment es pot deixar la guia a l'aire o dipositar una última capa que farà de revestiment i que també serà òxid de Silici. Aquesta geometria però, té un inconvenient, i és que degut a que el contrast d'índex entre el nucli i el substrat és molt petit, la llum queda molt poc confinada, i per tant el substrat s'ha de fer molt gruixut per evitar que el camp evanescent arribi al Silici i es produeixin pèrdues. Per aconseguir-ho, la capa d'òxid de Silici tèrmic que fa de substrat de la guia ha de ser superior a les 6µm. El nucli es creix d'aproximadament 4µm, per tal d'aconseguir un eficiència òptima d'acoblament de llum amb fibra òptica, que és de dimensions de nucli semblants per a la longitud d'ona de 633nm. L'elevat temps de deposició necessari per

créixer aquestes capes, fa que es puguin generar inhomogeneïtats o defectes que empobreixin el guiat de la llum.

Una alternativa a aquesta estructura és l'estudiada al capítol anterior, la guia de nitrur de silici. Aquesta guia té un nucli d'uns 200nm, i el substrat 2µm. En aquest cas, però, les pèrdues per inserció si s'utilitza acoblament per fibra òptica són molt altes, ja que la diferència de nuclis és molt important (200nm/4µm), i per tant des del punt de vista de funcionalització són poc adequades (veure figura 4-1). Amb més o menys èxit s'han utilitzat altres materials, com el vidre, el ZnO, fosfosilicats, polímers, etc. [1] En aquests casos, però, s'incorporen processos poc habituals en la tecnologia de silici, tot i que per contra permeten realitzar dispositius electro-òptics o acusto-òptics, com per exemple moduladors acústics aprofitant les característiques piezoelèctriques del ZnO.

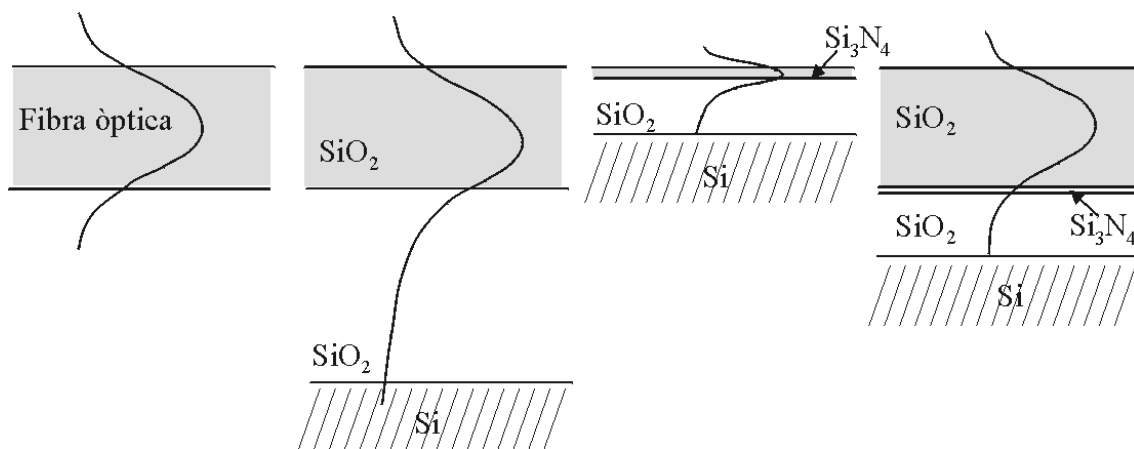


Figura 4-1. Comparació de les dimensions de diferents guies fabricades sobre un substrat de silici enfront de les dimensions d'una fibra òptica mitjançant la qual s'acoblarà la llum a la guia. Per ordre d'esquerra a dreta hi ha la fibra òptica, la guia d'òxid de silici, la de nitrur de silici i la guia ARROW.

Al 1986, Duguay et al. [2] proposen un nou tipus d'estructura multicapa sobre silici anomenada ARROW (*Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide*). En aquest nou tipus d'estructura, el nucli es d'òxid de silici, i el substrat està format per dues capes que formen una estructura ressonadora. L'avantatge d'aquest tipus d'estructura és que permet un substrat molt menor amb un nucli d'òxid de silici de tamany semblant al nucli d'una fibra (figura 4-1), de forma que la inserció és màxima i el gruix de l'estructura queda minimitzat.

Des de fa uns anys, a l'Institut de Microelectrònica de Barcelona (IMB-CNM) s'està realitzat un important esforç per posar a punt i millorar la tecnologia relacionada amb la fabricació d'aquesta estructura. L'interès bàsic està en realitzar dispositius sensors basats en l'interferòmetre Mach-Zehnder [3] i dispositius per comunicacions com acobladors direccionals. L'ajuda de la caracterització SNOM, doncs, serà un complement important alhora de millorar els dissenys i processos per a la fabricació d'aquestes estructures. Les propietats bàsiques d'aquesta guia les estudiarem al següent apartat, i a continuació veurem les mesures de caracterització SNOM d'aquesta guia. Aquest estudi s'ha separat en 3 apartats, començant per la caracterització de guies

rectes; després s'estudien dos dispositius diferents: una unió en Y d'un interferòmetre i un acoblador. El resultat d'aquest capítol es troben reflectits a [4].

4-1 La guia ARROW

A la figura 4-2 podem veure l'estructura bàsica de la guia ARROW. Existeixen variants d'aquesta estructura anomenades ARROW-B o ARROW-C que aquí no estudiarem, i que tenen propietats diferents, tot i que el principi de funcionament és semblant.

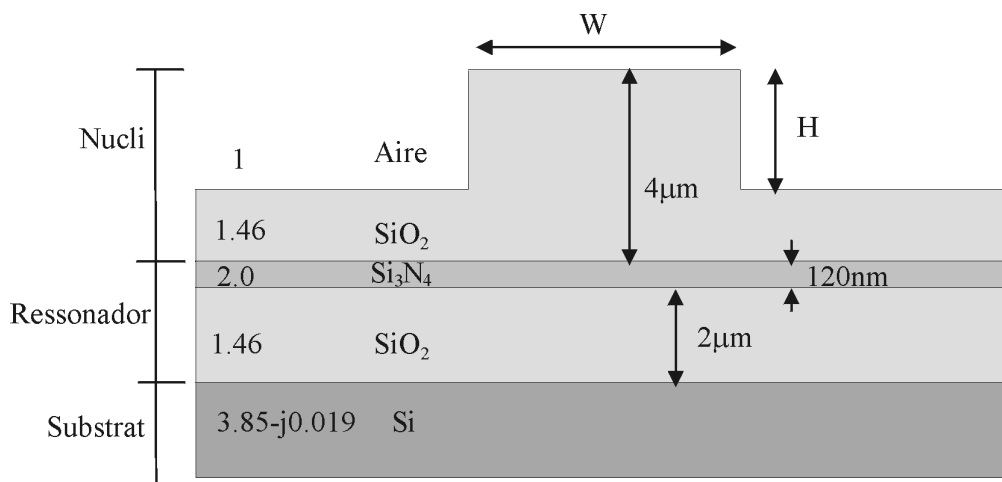


Figura 4-2. Estructura i índex de refracció de la guia ARROW. L'amplada W i l'alçada H de la guia variarà segons el dispositiu.

Sobre un substrat de silici es creix una capa de d'òxid de silici de $2\mu\text{m}$ de gruix crescut tèrmicament i amb un índex de refracció 1.46. Aquesta capa s'anomena segon *cladding*. A continuació es creix el primer *cladding*, que serà una capa de nitrur de silici de 120nm amb un índex de refracció 2.00 i crescut per LPCVD. Finalment a sobre hi haurà el nucli, de $4\mu\text{m}$ de gruix d'òxid de silici, crescut per PECVD (Pressure Enhanced Chemical Vapor Deposition), i que permet obtenir una capa d'òxid no estequiomètric de SiO_x , amb un índex de refracció variable entre 1.46 i 1.72. Al nostre cas és 1.46.

Per confinar la llum lateralment s'utilitza l'estructura *rib*, rebaixant per atac RIE els laterals de la guia $H=2.5\mu\text{m}$. En alguns casos, com és ara pels dispositius acobladors direccionals, el rebaix s'ha fet menor, amb $H=1\mu\text{m}$.

Per guiar la llum en una estructura d'aquest tipus s'exploten dos fenòmens físics diferents. A la interfície nucli-aire el guiat és per reflexió interna total, a l'igual que en les guies convencionals. A la interfície del nucli amb els *claddings*, el confinament es deu a l'alta reflectivitat de les dues capes inferiors al nucli, que és del 99.9% pel mode fonamental TE_0 i molt inferior per la resta. La propagació, per tant, és monomode "virtual", ja que no compleix la reflexió interna total en les dues interfícies tal i com passa a les guies convencionals.

La reflectivitat entre el nucli i les dues capes enterrades anomenades 1er i 2on *cladding* és degut a que l'estructura forma un ressonador de Fabry-Perot, i per tant depèn de les dimensions triades i la longitud d'ona. A la figura 4-3 podem observar una gràfica teòrica de l'atenuació per una estructura com la de la figura 4-2, en funció del gruix de la capa de nitrur de silici (d_1) per una longitud d'ona de 633nm [5].

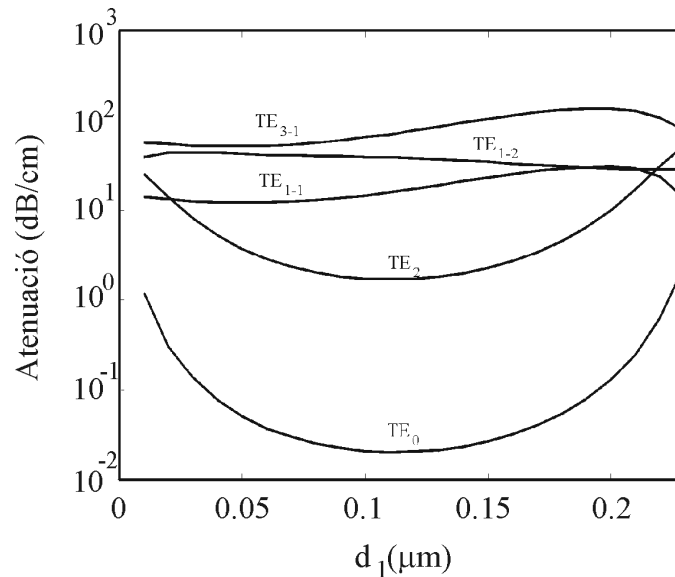


Figura 4-3. Atenuació dels modes TE en funció del gruix de la capa de nitrur de silici.

Tal i com podem veure a la figura 4-3, per un gruix de 120nm, només el mode fonamental TE_0 té un mínim significatiu en l'atenuació (<0.1 dB/cm): és la condició d'antiresonància del ressonador de Fabry-Perot. Pels modes TM, l'atenuació està molt per sobre dels modes TE [6], de forma que una característica important d'aquest tipus de guia és la selectivitat de la polarització. De fet, podem resumir les principals característiques de la guia ARROW com:

- Monomode “virtual” per un nucli de gran tamany, que el fa molt interessant per a l'acoblament de la llum amb fibra òptica, aconseguint minimitzar les pèrdues per inserció.
- Selectivitat de la polarització. Només propaga el mode fonamental TE.
- Fabricació en substrat de silici amb tècniques pròpies de la microelectrònica, que les fa molt interessants alhora de tenir esquemes híbrids entre components òptics i electrònics en un mateix substrat.

Per saber com serà el camp evanescent i el mode que es propaga per la guia, a la figura 4-4 es presenta una simulació del mode de propagació TE_0 . L'índex efectiu de propagació en aquest cas és de 1.458, i la longitud de decaïment del camp evanescent és de 47.5nm. Si mesurem la potència transportada en aquest cas pel camp evanescent corresponent al mode TE_0 ens surt que representa el 0.06% de la potència total transportada per aquest mode. Comparant amb el calculat per les guies de nitrur, que era gairebé del 10%, veiem que hi ha més de 2 ordres de magnitud de diferència, i per tant

és de suposar que serà bastant més complicat observar el camp evanescent en guies ARROW. La llum, en aquest cas està molt més confinada, tot i que per altra banda, les pèrdues per inserció han de ser molt menors, i per tant poden compensar en part la poca intensitat del camp evanescent.

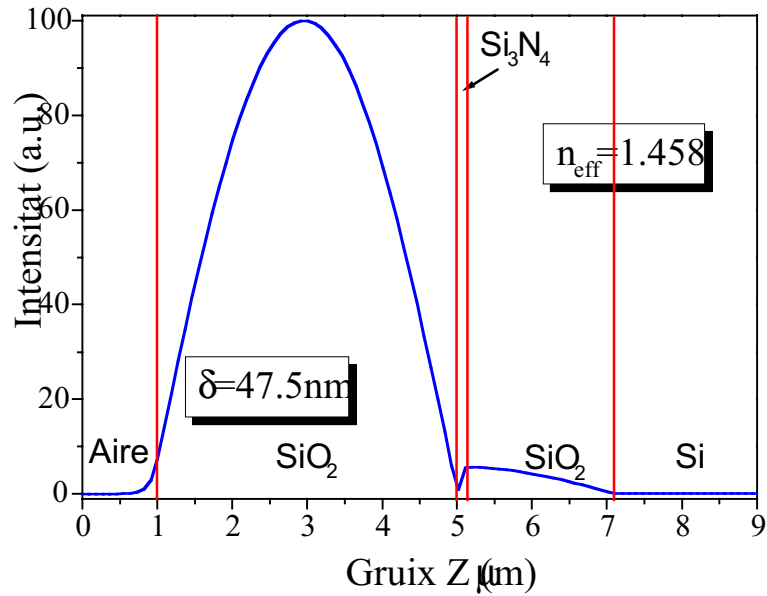


Figura 4-4. Mode vertical TE_0 de la guia ARROW. El camp evanescent transporta el 0.06% de la potència del mode, i la seva longitud de decaïment és de 47.5nm.

Tot i que la propagació vertical és monomode, lateralment dependrà de les dimensions de la guia. A la figura 4-5 podem veure la gràfica corresponent al nombre de modes en funció de l'amplada de la guia per una guia ARROW amb un esglaó de 2.5μm. En aquest cas, per una guia superior a les 2μm d'amplada la guia ja no serà monomode.

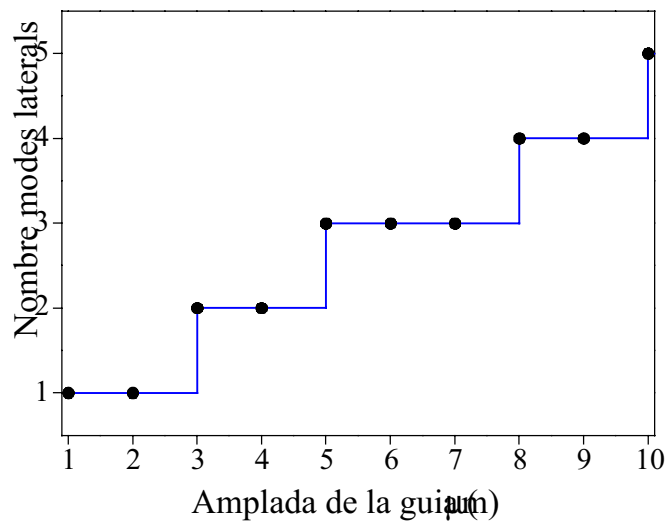


Figura 4-5. Nombre de modes laterals en funció de l'amplada d'una guia ARROW de 2.5μm d'esglaó.

4.2 Guies Rectes

La caracterització de simples guies rectes és el primer pas abans d'abordar l'estudi de dispositius més complexes, dispositius que de fet, estaran formats per trams de guies rectes com les que estudiarem a continuació. A l'igual que al capítol anterior, les guies que estudiarem corresponen a una mostra d'1cm_1cm, amb 4 períodes repetits de 15 guies d'amplada variable entre $1\mu\text{m}$ i $40\mu\text{m}$.

En estructures com aquestes, de tamany considerable, una caracterització topogràfica és important, ja que ens permetrà estudiar paràmetres com la rugositat superficial o l'angle de les parets de la guia, que poden influir en la transmissió de la llum augmentant les pèrdues per dispersió. Idealment ens interessarà que la rugositat sigui mínima i la paret lateral de la guia tant perpendicular com sigui possible. Es defineix l'angle de la paret com l'angle que forma la paret amb la normal des del punt de contacte inferior de la guia (fig4-6). Així doncs, un angle de 0° voldrà dir que la paret és totalment perpendicular, i per tant ideal.

A la figura 4-6 podem veure la geometria i un perfil de l'estructura d'una guia ARROW de $2.5\mu\text{m}$ d'esglaó i $5\mu\text{m}$ d'amplada. L'angle de la paret lateral de la guia mesurat amb l'SNOM és de 40° , similar a mesures SEM realitzades a d'altres mostres amb el mateix tipus de guia. Tot i que l'angle de la punta podria afectar aquest tipus de mesura, degut a que fibres amb un angle de conus inferior a 30° es poden realitzar fàcilment, aquest no afectarà la mesura anterior.

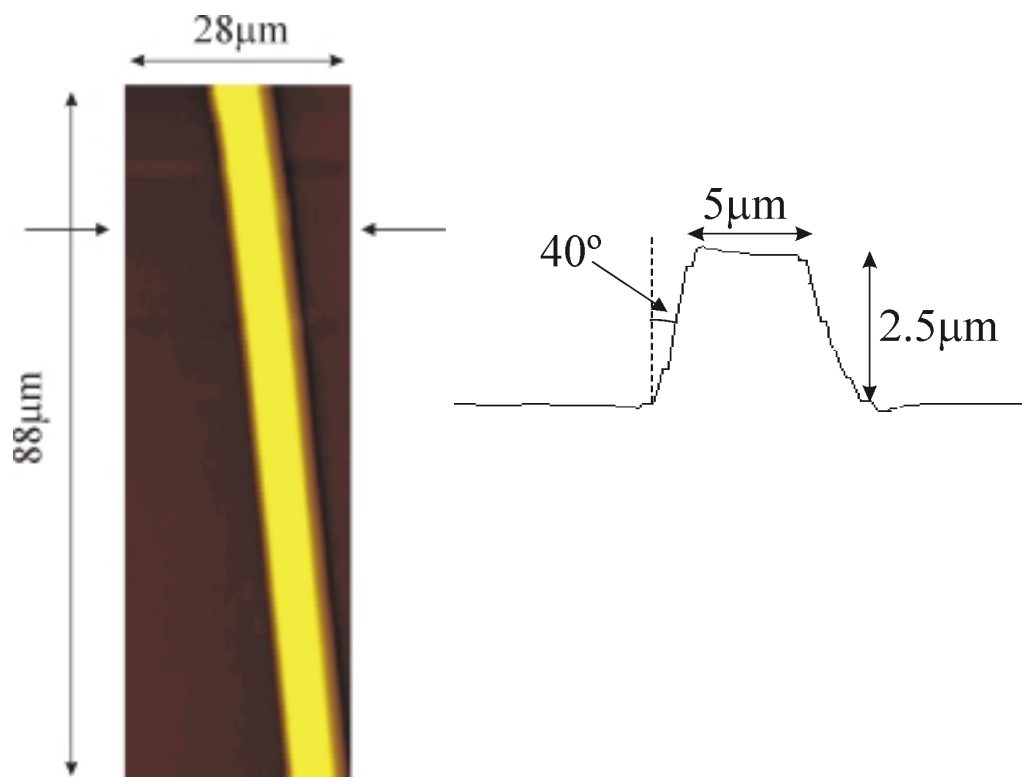


Figura 4-6. Imatge topogràfica de $28\mu\text{m}$ _ $88\mu\text{m}$ d'una guia ARROW. Del perfil topogràfic podem calcular l'angle de la paret, que és de 40° (el perfil està deformat verticalment per mostrar millor l'alçada de la guia).

Per mesurar la rugositat de la superfície es necessita una resolució més alta, que també és possible amb l'SNOM. A la figura 4-7 podem veure una zoom a la superfície de la guia de la figura 4-6. El valor rms de la superfície és de 15nm, $\sim 0.25\%$ del tamany del nucli, i a més a més molt inferior a la longitud d'ona, per tant una causa important d'atenuació, la dispersió deguda a la rugositat superficial, queda molt reduïda.

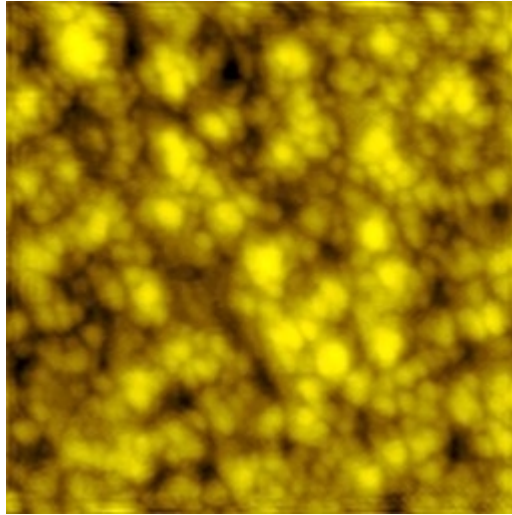


Figura 4-7. Imatge de $3.7\mu\text{m}\times 3.7\mu\text{m}$ de la superfície d'una guia ARROW. El valor rms de la rugositat superficial és de 15nm.

A continuació passem a estudiar la propagació òptica. A la figura 4-8 veiem la primera imatge SNOM topogràfica i òptica d'una guia ARROW. En aquest cas la guia és molt ample, $20\mu\text{m}$, per tant el comportament ha de ser multimode amb moltes interferències.

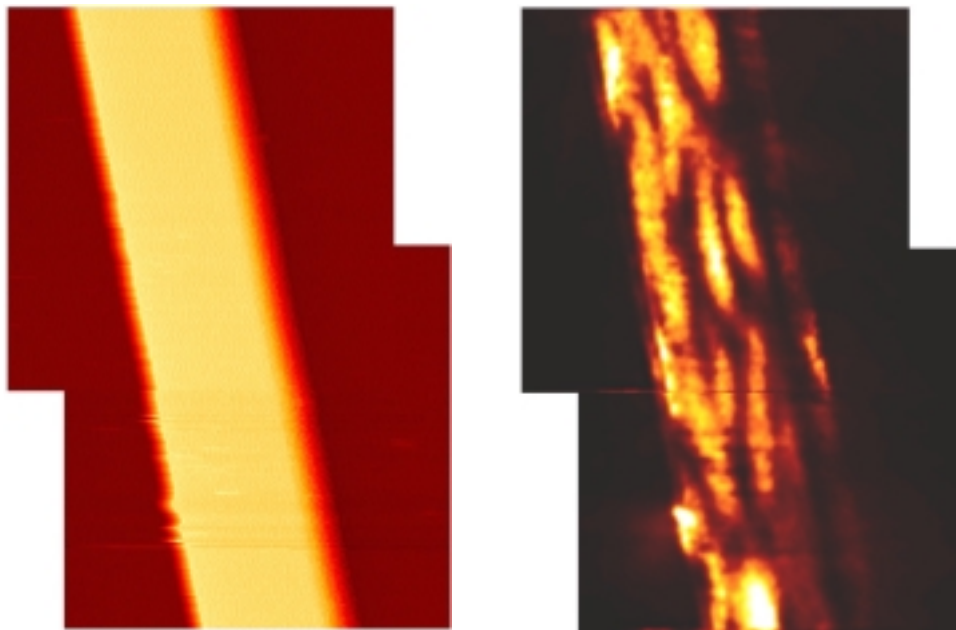


Figura 4-8. Imatges topogràfica i òptica SNOM de $53\mu\text{m}\times 240\mu\text{m}$ d'una guia ARROW de $20\mu\text{m}$ d'amplada.

Tot i que el comportament és clarament multimode, la distribució no és tant estranya com un podria pensar d'una guia d'aquesta amplada, per la qual hi hauria d'haver 9 modes laterals. Això és degut a que no s'estan excitant tots aquests modes, i per tant només alguns intervenen en la propagació. Altre cop, doncs, la injecció de llum és bàsica alhora d'interpretar el resultat de la propagació per la guia.

Recordem però, que per aplicacions de comunicacions on la velocitat és un factor important, o en sensors basats en la interferència de la llum que es propaga per diferents camins òptics, és important tenir una propagació monomode. Això voldrà dir que cal estudiar quan s'obté aquesta propagació en les guies.

A la figura 4-9 podem observar el resultat de la mesura òptica amb l'SNOM de la guia presentada a la figura 4-6, de $5\mu\text{m}$ d'amplada. Clarament s'observen 2 pics en la llum que es propaga per la guia, cosa que indica que la propagació no és monomode, i com a mínim hi ha presents 2 modes.

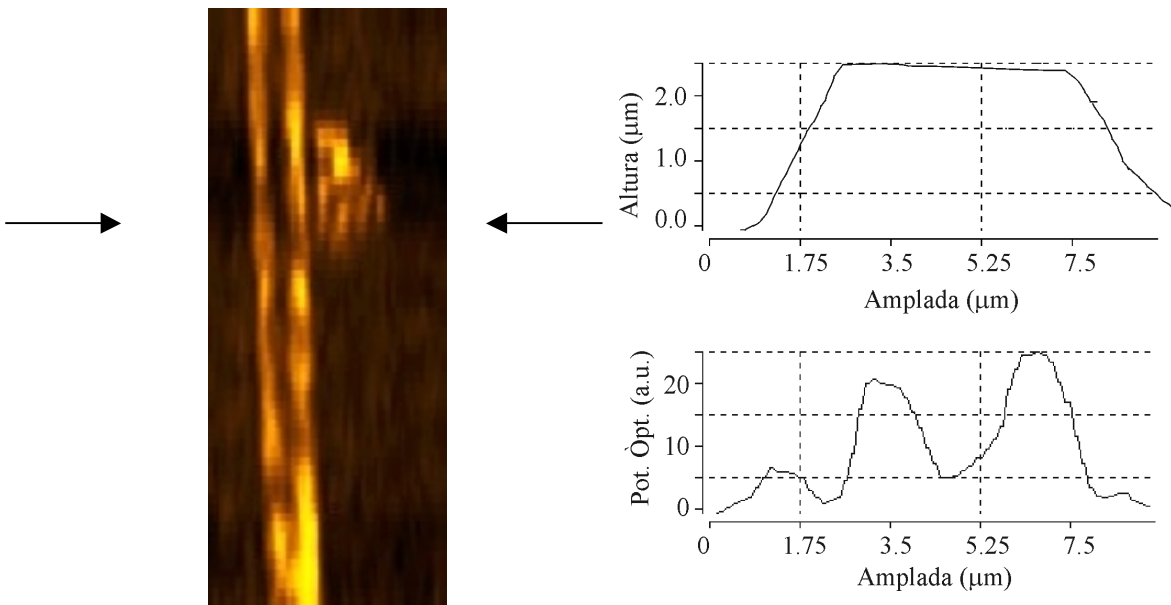


Figura 4-9. Imatge òptica SNOM de $16\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$ i perfils topogràfic i òptic d'una guia ARROW de $5\mu\text{m}$ d'amplada.

També podem observar una gran dispersió localitzada a la part superior, a la banda dreta de la guia. Probablement aquesta sigui deguda a una imperfecció a la guia, i pel que sembla al ser al lateral de la guia, correspongui a un deteriorament de la paret lateral de la guia, que pot ser produït tant al procés de fabricació com, més probablement, per una mala manipulació de la mostra.

Si passem a una guia de menor amplada podem observar una propagació monomode. Aquest és el cas de la figura 4-10, corresponent a una guia de $4\mu\text{m}$ d'amplada. Tot i que s'observen dos pics en el perfil òptic, que són perfectament identificables a la imatge

òptica, el de menor intensitat queda fora de la guia. També podem observar aquest fenomen, encara que en menor intensitat, al perfil òptic de la figura 4-9.

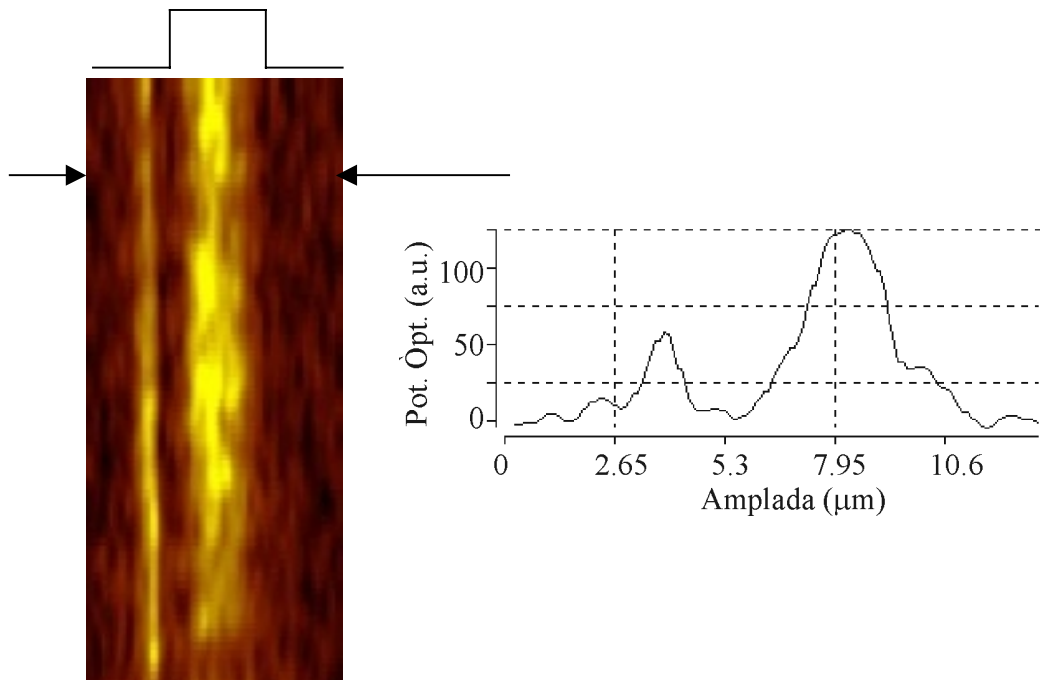


Figura 4-10. Imatge òptica SNOM de $13\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$ d'una guia ARROW de $4\mu\text{m}$ d'amplada. La propagació és monomode. S'observa un màxim lateral corresponent al camp evanescent lateral.

L'existència d'aquest màxim lateral s'explica com una convolució entre la topografia i el camp evanescent corresponent al mode lateral. Aquest camp és el responsable, per exemple, de l'acoblament en els dispositius acobladors, i té una penetració lateral que pot ser de varies micres, molt superior al vertical. Poweleit et al. [7] observaren aquest efecte per primer cop al 1996, mostrant scans laterals com els representats al perfil de la figura 4-10.

Per entendre la formació d'aquest pic realitzarem una simulació teòrica 2D-FDM (Two-Dimensional Finite Difference Method) del perfil d'intensitat de l'estructura ARROW corresponent a la guia de la figura 4-10 [4,5]. A la figura 4-11a es mostra el resultat d'aquesta simulació, on s'hi ha dibuixat les corbes de nivell corresponents a intensitats decreixents a mesura que ens allunyem del centre de la guia. A la figura 4-11b podem observar un zoom a la zona de l'esglaó. La línia de punts discontinua mostra l'scan topogràfic seguit per la punta al mantenir la distància punta-mostra constant. A mesura que ens acostem a la guia lateralment, la intensitat captada per la punta creix. Un cop la punta comença a pujar per l'esglaó de la guia les corbes d'intensitat decreixen, de forma que la punta detectarà menys llum, i de resultes apareix a la imatge una zona menys intensa. Un cop arribats al cim de la guia, les corbes d'intensitat altre cop esdevenen més intenses, de forma que recuperem la intensitat anterior i fins i tot la podem superar, tal i com observem experimentalment. El resultat és una convolució entre el perfil d'intensitat òptic i la topografia de la guia, o millor dit, el perfil descrit per la punta a l'intentar resseguir la topografia de la guia mantenint l'alçada punta-guia constant.

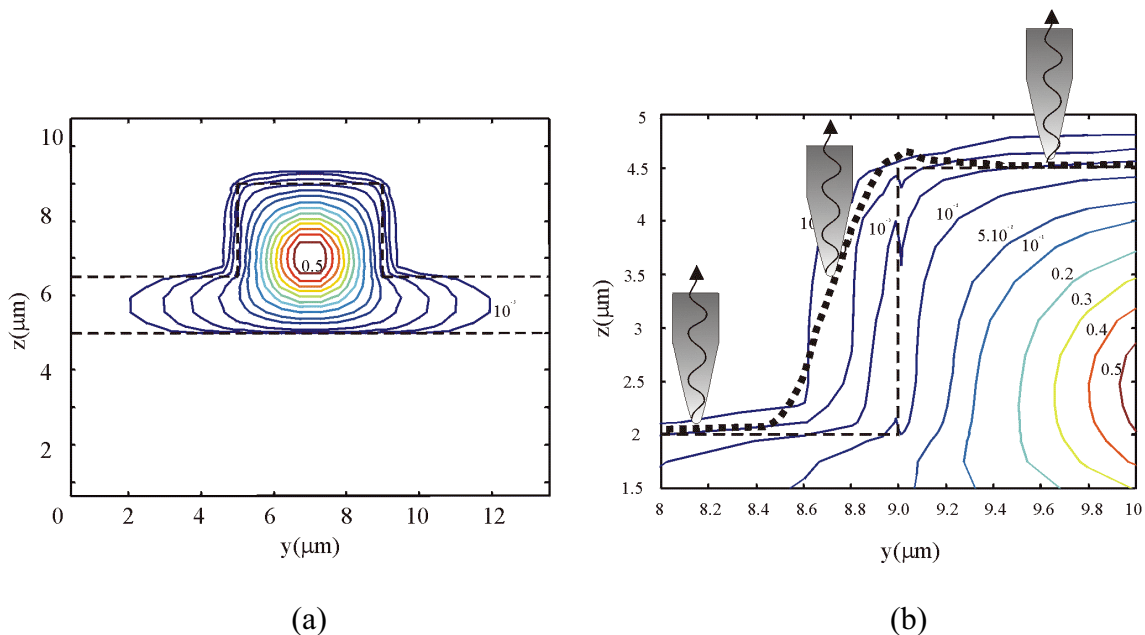


Figura 4-11. Simulació 2D-FDM d'una guia ARROW de $2.5\mu\text{m}$ d'esglaó i $4\mu\text{m}$ d'amplada. (a) Corbes d'intensitat de l'estructura ARROW; (b) Zoom de l'estructura a la zona de l'esglaó mostrant en línia discontinua el camí seguit per la fibra.

Ens podria sorprendre que aquest efecte només té lloc a un lateral de la guia, i en canvi l'explicació és perfectament vàlida per ambdós costats. Això és degut a un efecte del sistema de realimentació: la punta és capaç d'ascendir pel lateral de la guia més ràpidament que baixar-ne degut al controlador PID del sistema de realimentació. D'aquesta forma, quan la punta ha baixat fins a la superfície lateral a la guia, aquesta ja és prou lluny com per no ser capaç de detectar el camp evanescent lateral. Donat que la imatge només mostra l'escombrat en una direcció només veiem aquest efecte en un lateral de la guia: si prenem el sentit d'escombrat contrari aquest efecte també té lloc, però ara al costat contrari de la guia. De fet, si observem el perfil topogràfic de la figura 4-6 podem observar com la pujada corresponent a la part esquerra és més abrupte que la baixada, corroborant la suposició que és un efecte del sistema de realimentació.

Tot i que aquest efecte podria semblar un problema alhora d'interpretar les imatges, també ens proporciona una informació important, ja que estem mesurant directament el camp evanescent lateral, que veiem que penetra a l'aire varies micres; el segon pic apareix a $1.6\mu\text{m}$ del lateral de la guia. El valor teòric per la longitud de decaïment és de 450nm , per tant a la longitud mesurada el camp evanescent hauria d'haver disminuït més d'un 95%. Tenint en compte que el pic és ben visible, el que estem veient és que el camp evanescent lateral és més gran del previst. Això pot tenir a veure amb el fet que les parets no són perfectament verticals, de forma que en realitat hauríem de considerar una amplada promig de la guia que tingués en compte aquest efecte. Així, per un angle de paret de 40° , la guia tindria una amplada efectiva a mig *rib* de $6\mu\text{m}$. D'aquesta forma el pic estaria a només 600nm de la guia, molt més semblant als càlculs teòrics.

Podem concloure que tot i la major dificultat en l'observació del camp evanescent, degut al major confinament del mode de propagació a la guia i reflectit en una qualitat inferior de les imatges òptiques, també som capaços de caracteritzar tant topogràficament com òpticament les guies ARROW.

Un últim punt interessant a comentar és el fet que tot i que teòricament la guia de $4\mu\text{m}$ d'amplada suporta 2 modes, la caracterització experimental ens dona que la propagació és monomode. Ja havíem vist també que per la guia de $20\mu\text{m}$ d'amplada (fig.4-8), la distribució no sembla tant complexa com per correspondre a les interferències dels 9 modes que teòricament suporta la guia. Això concorda amb experiments realitzats de caracterització del camp proper a la sortida de la guia, reemplaçant la fibra òptica, que serveix per mesurar la potència transmesa per la guia, per una càmera CCD enfocant just a la sortida de la guia. En aquest cas s'observen una sèrie de lòbuls de llum que correspondrien als màxims que podem observar amb l'SNOM. A la figura 4-12 podem observar dues imatges corresponent a dues guies de $12\mu\text{m}$ i $24\mu\text{m}$ d'amplada respectivament.

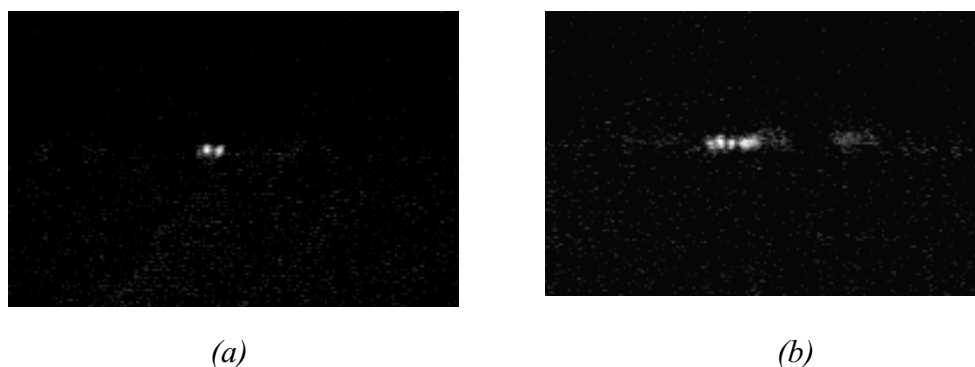


Figura 4-12. Imatges de camp proper a la sortida de la guia preses amb una càmera CCD corresponents a guies de (a) $12\mu\text{m}$ d'amplada i (b) $24\mu\text{m}$ d'amplada.

Veiem que aparentment al primer cas només es veuen dos lòbuls, mentre que pel segon cas se'n poden comptabilitzar 5. Altres autors també coincideixen en aquesta observació [8]. A més a més, aquesta resultats també s'adiuen amb l'observat amb l'SNOM, i ens indica que: o bé la propagació en les guies no s'adiu amb la gràfica 4-5, i per tant cal repassar la teoria de propagació per aquestes guies; o bé no s'exciten tots els modes. Aquesta última explicació és potser la més plausible, ja que al tenir el nucli de la fibra un tamany semblant al nucli de la guia, els modes fonamentals són d'aspecte força semblant, i per tant serà més difícil excitar la resta de modes. Tot i la simplicitat d'aquesta última explicació, no es pot descartar per complet el primer cas, ja que per exemple, quan s'acobla la llum a la guia lateralment o amb un cert angle d'inclinació, o fins i tot amb un objectiu de microscopi, es podria esperar d'excitar modes d'ordre superior, i en canvi el tipus d'imatges que s'obtenen són essencialment iguals que les anteriors, de forma que fa pensar que potser aquest tipus de guia suporta menys modes laterals que els previstos, i això pot ser molt interessant des del punt de vista del disseny i la fabricació de dispositius òptics integrats.

4.3 Unió en Y d'un interferòmetre de Mach-Zehnder.

Una unió en Y és un dispositiu que serveix per separar la llum en dues branques diferents. Aquest tipus d'unió es pot utilitzar en moltes configuracions. Posades en cascada permeten obtenir divisor de feixos. També s'utilitza en un interferòmetre de Mach-Zehnder (figura 4-13). En aquest cas una primera unió en Y separa la llum en dos branques que recorreran camins òptics diferents, ja sigui per recórrer longituds diferents, per recórrer camins amb índex de refracció diferents, o bé per ambdues coses alhora. Si després, amb una altra unió en Y, recuperem la llum provenint de les dues branques, es produirà una interferència deguda a la diferència de fase amb que la llum arriba al punt d'unió. Aquesta diferència pot donar lloc a una interferència constructiva o destructiva que es repetirà periòdicament depenent de la diferència de camins òptics recorreguts. En comunicacions aquesta diferència pot ser deguda a un desplaçador de fase, permeten aconseguir divisió freqüencial o divisió per longitud d'ona [1].

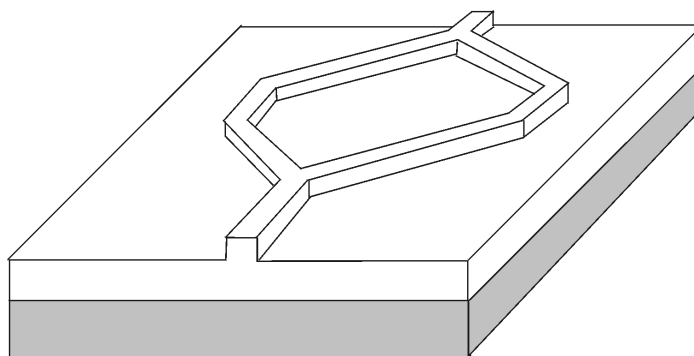


Figura 4-13. Interferòmetre de Mach-Zehnder. La llum es separa en dues branques que recorren un camí òptic diferent, de forma que quan es tornen a trobar es produeixen interferències.

Aquest principi també és l'utilitzat per a fabricar sensors òptics basats en aquesta estructura [9]. Ja que el canvi en el camí òptic pot ser degut a un canvi en l'índex de refracció efectiu de propagació, el procediment serà el següent: una de les branques la deixem al descobert, de forma que farà de branca sensora; l'altra la protegim amb una capa d'òxid de silici d'índex inferior al nucli prou gruixuda com per què no afecti el medi exterior a aquesta capa, i serà la branca de referència. El material que volem detectar es dipositarà sobre la branca sensora, i en funció de la quantitat de material que es diposita s'obindrà un canvi en l'índex de refracció que provocarà al seu torn un canvi en el camí òptic, de forma que variarà la interferència que es produeixi a la sortida de l'interferòmetre.

Per aconseguir preservar les condicions de propagació de la llum a les branques caldrà anar amb molta cura alhora de dissenyar la unió. Factors com l'angle d'obertura o l'eixamplament de la guia per acoblar l'estructura que passa d'una guia a dues seran factors a tenir en compte en aquest disseny, i per tant una caracterització topogràfica i òptica en aquest punt ens pot revelar molta informació interessant sobre el comportament d'aquest dispositiu.

A la figura 4-14 podem observar les imatges topogràfica i òptica preses amb l'SNOM del punt de divisió en Y d'un interferòmetre de Mach-Zehnder. La imatge topogràfica té un rang de $300\mu\text{m}$, mentre que la imatge òptica mostra la propagació al llarg de $400\mu\text{m}$. També s'han inclòs perfils topogràfics abans i després de la unió així com perfils òptics abans, just a la unió, i després de la unió.

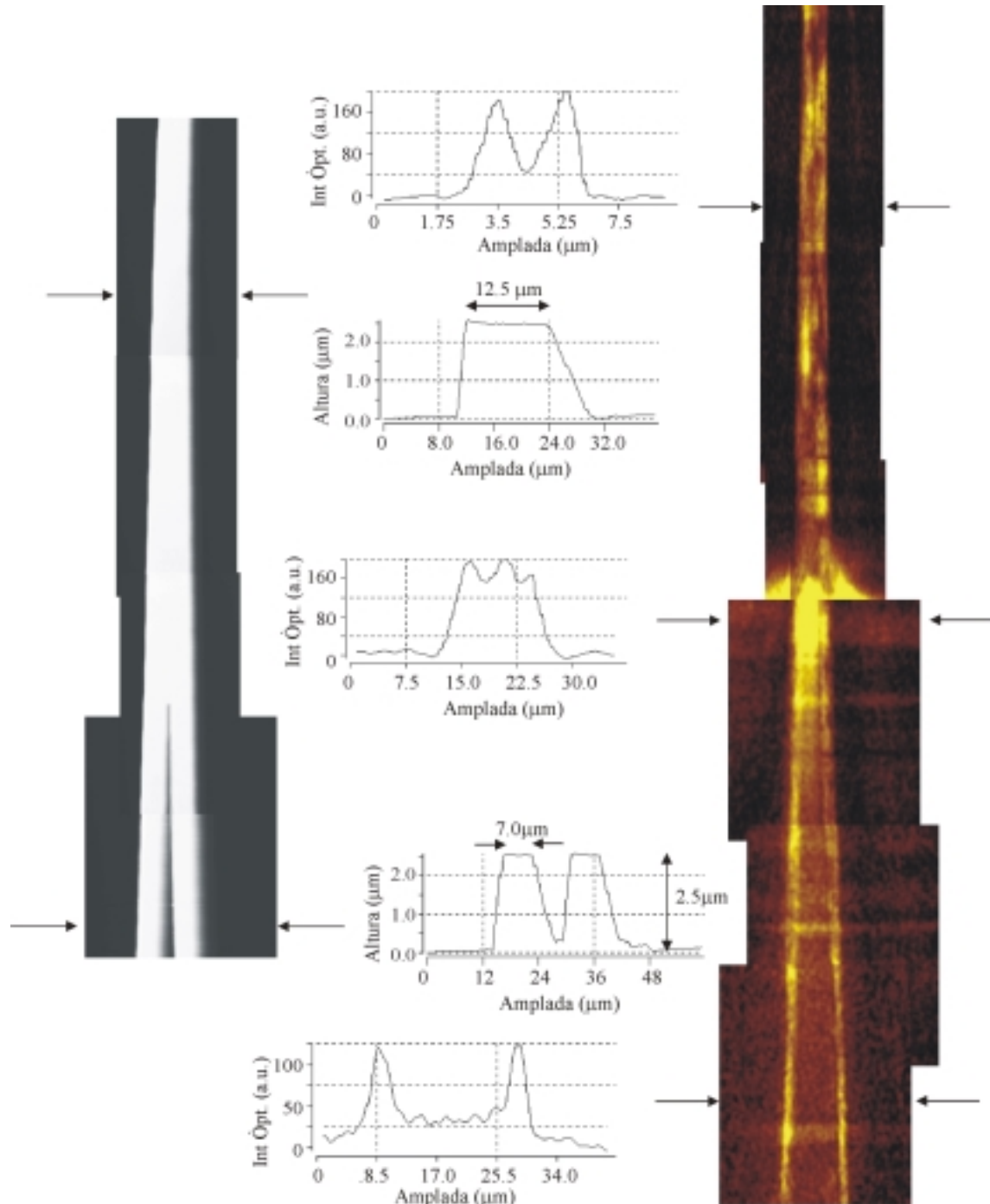


Figura 4-14. Imatges topogràfica (esquerra) i òptica (dreta) adquirides amb l'SNOM d'una unió en Y d'un interferòmetre Mach-Zehnder. Les dimensions de les imatges són $75\mu\text{m}\times 300\mu\text{m}$ per la topogràfica i $75\mu\text{m}\times 400\mu\text{m}$ per l'òptica.

El primer que podem observar és com la llum es divideix a les dues branques de la unió. De la caracterització topogràfica podem treure'n l'alçada, de $2.5\mu\text{m}$, i l'amplada de cada branca, de $7\mu\text{m}$. Lluny del punt de divisió (no mostrat a la imatge) la guia abans de la divisió també té $7\mu\text{m}$ d'amplada, però degut al procés tecnològic d'acoblament de l'estructura d'una guia en dues de la mateixa amplada, la guia esdevé més ampla a mesura que ens acostem al punt de divisió, tal i com podem observar al perfil topogràfic abans de la divisió, on l'amplada de la guia és de $12.5\mu\text{m}$. Aquest efecte provoca interferències de la llum, tal i com podem observar a la imatge òptica, de forma que es veu afectada la propagació de la llum a la guia. Les conseqüències poden resultar ser un mal acoblament de la llum a les dues branques, i per tant, pèrdues de transmissió.

L'angle d'obertura de la unió és de 1.5° . Observant la gran dispersió que es pot veure a la imatge òptica, podem resoldre que l'angle ha de ser reduït per tal d'eliminar pèrdues per dispersió. De fet, per mantenir el nivell de senyal òptic capturat per la punta s'ha hagut d'incrementar el guany del fotomultiplicador un cop s'ha sobrepassat el punt de divisió, de forma que la llum és menys intensa, indicant que s'han sofert pèrdues per dispersió.

De cara a utilitzar l'interferòmetre per aplicacions sensores, és important tenir caracteritzat el camp evanescent, que és equivalent a determinar la sensibilitat de l'interferòmetre. Aquesta es defineix com la variació de l'índex de refracció efectiu respecte canvis en l'índex de la coberta, que seran deguts a la capa del líquid amb el material que volem detectar i que es diposita a la branca sensora. Per tenir una bona sensibilitat cal que la potència que transporta el camp evanescent sigui el més gran possible, de forma que és vegi més afectada la propagació al tenir canvis a la coberta. Complir aquesta premissa vol dir explícitament tenir un camp evanescent amb una longitud de decaïment el més gran possible i el més intens possible.

A la figura 4-15 podem veure el resultat de mesurar el camp evanescent a la superfície de l'interferòmetre a tres llocs diferents: abans del punt de divisió, i a cada branca passada la divisió. Les tres corbes són paral·leles en un eix vertical logarítmic de forma que la longitud de decaïment és la mateixa, 42.5nm . La intensitat, però veiem que és menor a cada branca. Això ja ho hem vist als perfils òptics de la figura 4-13, i és degut a la gran dispersió que es produeixi al punt de divisió, de forma que si volem tenir un bon sensor caldrà reduir aquest angle per aconseguir tenir més intensitat a la superfície.

També hi ha altres tècniques per aconseguir obtenir una intensitat superior a la superfície i una longitud de decaïment superior, i bàsicament es tracta de reduir el tamany del nucli, de forma que la llum queda menys confinada. Això, però, té l'inconvenient que aleshores l'estructura ARROW queda modificada, i augmenten les pèrdues per radiació al substrat. De totes formes, això que podria ser un gran inconvenient en aplicacions de comunicacions no té tanta importància en aplicacions sensores, on el recorregut que ha de fer la llum només és de l'emissor al sensor, i del sensor al detector, de forma que finalment s'ha d'arribar a un compromís.

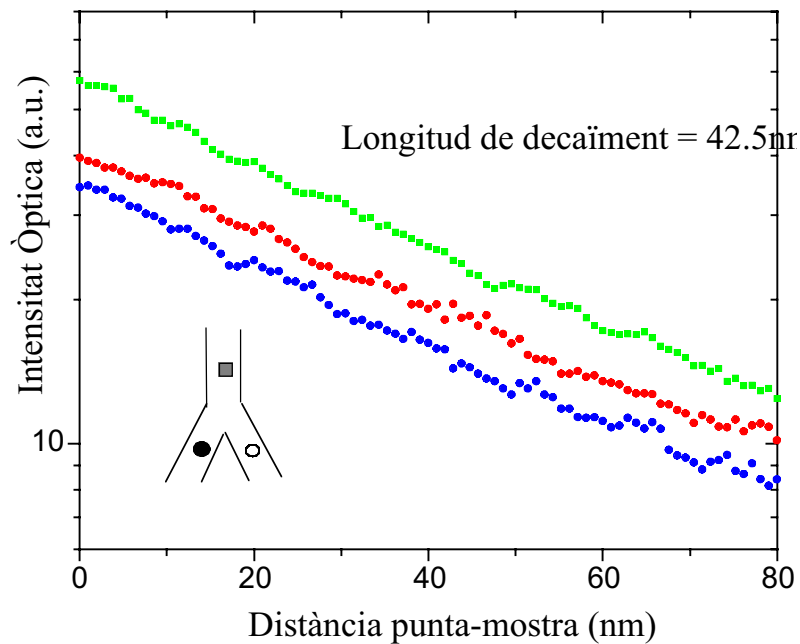


Figura 4-15. Camp evanescent sobre l'interferòmetre ARROW a diferents punts de la guia. La longitud de decaïment val 42.5nm. A l'esquema es mostren els punts de l'interferòmetre on s'ha realitzat cada rampa.

4.4 Acoblador òptic direccional

Els acobladors òptics direccional són àmpliament usats en sistemes de comunicacions. En aquest tipus de dispositiu, es col·loquen dues guies molt properes, tant com per permetre que el camp evanescent lateral penetri a la guia adjacent. Inicialment la llum s'acobla a una de les guies, i a una distància predeterminada la llum queda confinada completament a l'altra guia. Aquesta distància s'anomena longitud d'acoblament (L_C), i depèn de l'estructura de les guies, la geometria de l'acoblador i la longitud d'ona. Aquesta no és l'única forma d'utilitzar-lo, ja que aprofitant que la longitud d'acoblament depèn de la longitud d'ona, es pot aconseguir un multiplexor-demultiplexor per longitud d'ona. En aquest cas s'injecta llum de longitud d'ona diferent a les dues branques i es treu per una sola, o inversament, es pot separar llum de longituds d'ona diferents que s'injecten per una mateixa branca [10].

Tots aquests fenòmens tenen lloc a la zona d'acoblament, però al fabricar l'acoblador, les guies inicialment estan molt separades, per tal de controlar la llum que s'injecta a cada branca. Hi ha per tant, un procés d'acostament on les dues guies formen un angle fins arribar a la zona d'acoblament. A la figura 4-16a podem veure una imatge topogràfica que ens permet calcular aquest angle, que és de 1.5° . La figura 4-16b, en canvi, correspon a la zona d'acoblament, on la distància entre guies és de $2.3\mu\text{m}$. En aquest cas s'ha localitzat un defecte topogràfic a l'estructura important, que bé pot ser

degut a la fabricació o bé a una mala manipulació de la mostra. La corresponent imatge òptica 4-16c mostra una gran intensitat a la zona del defecte, que correspon a llum dispersada. La intensitat és tant gran que és impossible detectar el camp evanescent, de forma que les pèrdues per dispersió són molt importants. Si es vol un correcte funcionament de l'acoblador serà important mantenir-lo sense aquest tipus de defectes.

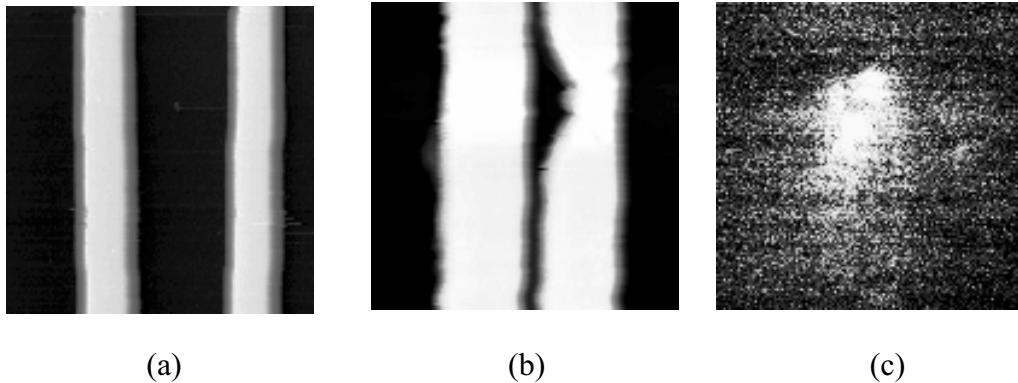


Figura 4-16. Imatges topogràfiques i òptica d'un acoblador direccional (a) abans de la zona d'acoblament i (b) i (c) a la zona d'acoblament. Els rangs són: (a) $38\mu\text{m}_89\mu\text{m}$; (b) $25\mu\text{m}_25\mu\text{m}$; (c) $25\mu\text{m}_25\mu\text{m}$.

A la figura 4-17 podem observar les imatges SNOM topogràfiques i òptiques en diferents zones d'un altre dispositiu acoblador. La figura 4-17a correspon a la zona abans de la regió d'acoblament. Cada branca de l'acoblador té $5\mu\text{m}$ d'amplada, i la distància entre les dues branques és de $18.5\mu\text{m}$, molt superior a la longitud de decaïment del camp evanescent lateral, que val 770nm , de forma que la llum queda confinada a una sola branca: la branca on hem acoblat la llum amb una fibra òptica.

En aquest cas, a més a més, podem observar com el camp evanescent lateral és molt més intens que als apartats anteriors. Això precisament és el que es busca si es vol acoblar la llum d'una branca a l'altra a través d'aquest camp evanescent lateral, de forma que transporti la màxima potència possible. La forma d'aconseguir-ho és realitzant l'esglaió de la guia menor (veure el perfil topogràfic de 4-17d). En aquest cas és d' $1\mu\text{m}$. D'aquesta forma el contrast d'índexs efectius laterals és menor, i per tant la llum queda menys confinada ($\Delta n_{eff}=0.0015$ per $H=1\mu\text{m}$ i $\Delta n_{eff}=0.0066$ per $H=2.5\mu\text{m}$).

Quan les guies se situen més properes, el confinament de la llum oscil·la d'una guia a l'altra. La distància d'acoblament teòrica calculada per aquesta estructura val $L_C=2.1\text{mm}$. Les imatges 4-17b i 4-17c corresponen a la regió d'acoblament de l'acoblador direccional amb una distància entre les dues imatges de $400\mu\text{m}$. La distància entre les guies és de $2.5\mu\text{m}$. Al primer cas (4-17b), tot i la gran intensitat del camp evanescent lateral no s'aprecia acoblament a la segona guia, mentre que al segon cas (4-17c) s'observa un acoblament parcial de la llum a la segona guia, més clarament mostrat al perfil òptic de 4-17d.

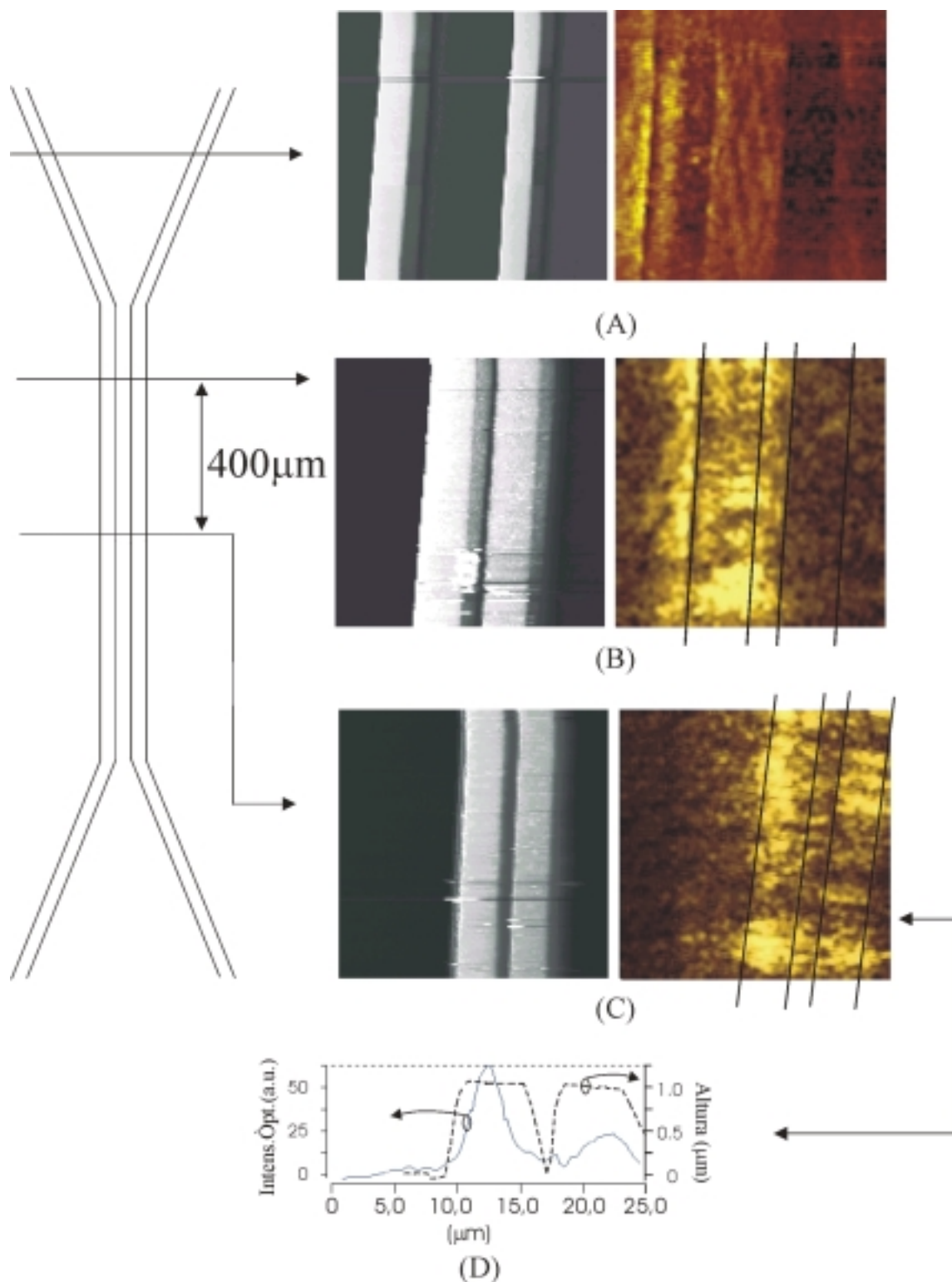


Figura 4-17. Imatges topogràfiques i òptiques d'un acoblador direccional. (a) Abans de la zona d'acoblament. Les dimensions són $48.4\mu\text{m}$ $88.4\mu\text{m}$ per ambdues imatges. (b) A la zona d'acoblament sense acoblament aparent. Les dimensions són $30.4\mu\text{m}$ $297.6\mu\text{m}$ per la imatge topogràfica i $22.7\mu\text{m}$ $146.5\mu\text{m}$ per la imatge òptica. (c) $400\mu\text{m}$ més avall de la imatge anterior. En aquest cas s'aprecia una acoblament parcial. Les dimensions són $38.3\mu\text{m}$ $297.6\mu\text{m}$ per la imatge topogràfica i $30.4\mu\text{m}$ $297.6\mu\text{m}$ per la imatge òptica. (d) Perfil topogràfic i òptic de la imatge (c).

Si ens fixem en el perfil topogràfic de 4-17d, també podem observar que a la zona d'acoblament la guia no té temps de baixar fins al fons de la mostra, de forma que les dues guies queden lleugerament superposades físicament. Tot i que un podria pensar que això és degut a que la punta no pot penetrar per l'escletxa que deixen les dues guies, si ens fixem en el pendent lateral veiem que és de 53° , que vol dir que la paret de la guia es desplaça $1.33\mu\text{m}$ lateralment. Si això ho extrapolem a la zona d'acoblament, on a més a més, el RIE sempre serà més lent al tenir una superfície d'atac menor, realment es demostra que les dues guies es superposen, tot i que molt poc. Això pot tenir importants conseqüències en la propagació, ja que l'estructura ideal i la real difereixen força.

Integrant sobre la zona corresponent a cada guia al perfil òptic de 4-17d, trobem un acoblament aproximat del 30%, i si l'acoblament segueix una llei del tipus \cos^2 [10] la distància d'acoblament serà de 1.83mm, que difereix en un 13% del càlcul teòric. Aquesta diferència es pot associar al fet de no tenir una estructura ideal, amb unes parets laterals verticals, i per tant, la distància efectiva entre les guies és inferior, i per tant l'acoblament més gran.

Concloem aquest capítol sobre la caracterització de guies ARROW havent obtingut resultats remarcables, tant a nivell de caracterització topogràfica com òptica. Topogràficament hem estudiat la rugositat de la superfície, les parets laterals de la guia, angles d'unió i dimensions geomètriques generals. En la part òptica hem distingit quan s'esdevé propagació monomode, hem observat pèrdues per dispersió en unions i defectes, i també hem avaluat el camp evanescent per a propòsits sensors i la longitud d'acoblament d'un acoblador direccional.

Referències

- [1] B.P.Pal, “*Guided-Wave Optics on Silicon: Physics, Technology, and Status*,” *Progress in Optics* **32**, 1-59 (1993).
- [2] M.A.Duguay, Y.Kokubun, T.L.Koch, L.Pfeiffer, “*Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO₂-Si multilayer structures*,” *Appl.Phys.Lett.* **49**, 13-15 (1986).
- [3] D.Jiménez, E.Bartolomé, M.Moreno, J.Muñoz, C.Domínguez, “*An integrated silicon ARROW Mach-Zehnder interferometer for sensig applications*,” *Opt.Commun.* **132**, 437-441 (1996).
- [4] X.Borrisé, D.Jiménez, F.Pérez-Murano, A.Llobera, C.Domínguez, N.Barniol, “*Characterization of ARROW waveguide devices by Scanning Near-Field Optical Microscopy*,” *Acceptat a J.Opt.Soc.Amer.A.*
- [5] D.Jiménez, “*Diseño de dispositivos Optoelectrónicos integrados: métodos numéricos de simulación de la propagación de ondas electromagnéticas*,” *Tesi Doctoral UAB* (2000)
- [6] T.Baba, Y.Kokubun, “*Dispersion and Radiation Loss Characteristics of Antiresonant Reflecting Optical Waveguides-Numerical Results and Analytical Expressions*,” *IEEE J.of Quant. Electr.* **28**, 1689-1700 (1992).
- [7] C.D.Poweleit, D.H.Naghski, S.M.Lindsay, J.T.Boyd, H.E.Jackson, “*Near-field scanning optical microsocopy measurements of optical intensity distributions in semiconductor channel waveguides*,” *Appl.Phys.Lett.* **69**, 3471-3473 (1996).
- [8] I.Garcés, F.Villuendas, J.A.Vallés, C.Domínguez, M.Moreno, “*Analysis of Leakage Properties and Guiding Conditions of Rib Antiresonant Reflecting Optical Waveguides*,” *IEEE J. of Ligthwave Technol.* **14**, 798-804 (1996).
- [9] L.M. Lechuga, A.T.M.Lenferink, R.P.H.Kooyman and J.Greeve. “*Feasibility of evanescent wave interferometer immunosensors for direct detection of pesticides: chemical aspects*.” *Sens.and Act. B* **24-25**, pp. 762-764 (1995).
- [10] K.J.Ebeling, “*Integrated Optoelectronics*,” *Springer-Verlag*, capítols 5 i 6 (1992).