

rampes de llum a diferents punts de la guia, que tot i que variaran degut a la interferència modal, la constant de decaïment es mantindrà, ja que només tenim un mode vertical TE_0 . Una forma simple de veure que això és així és graficant les corbes en un eix vertical logarítmic. Seguint l'equació 3-12, la solució del camp evanescent és del tipus exponencial, de forma que en un eix vertical logarítmic aquesta corba es transforma en una recta, i per tant les diferents corbes, tot i que amb valors d'intensitat diferents, seran paral·leles.

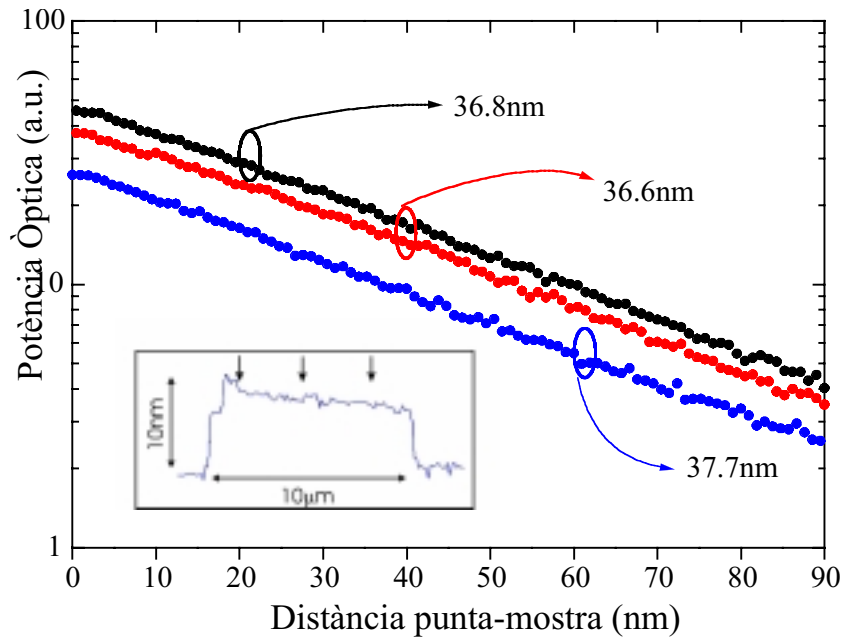


Figura 3-16. Gràfica de la intensitat del camp evanescent en funció de la distància punta-mostra a diferents punts de la mostra. En petit s'ha representat el perfil topogràfic de la guia, assenyalant amb fletxes les posicions on s'han realitzat les tres rampes sobre la guia.

La constant de decaïment promig és de 37.0nm, i tenint en compte el valor teòric de 36.9nm calculat a partir de la figura 3-6, veiem que hi ha una gran coincidència entre el valor teòric i el valor mesurat experimentalment per aquesta estructura.

Per acompanyar analitzar més detalladament l'efecte de la contaminació de la mostra amb material dipositat, a la figura 3-17 presentem una sèrie d'imatges realitzades sobre una zona de la mostra contaminada amb material dipositat que no s'han eliminat en el procés de neteja.

Les dues primeres imatges, (a) i (b), tenen un rang de $43\mu\text{m}\times 39\mu\text{m}$, i la resta tenen un rang de $70\mu\text{m}\times 61\mu\text{m}$. Totes les imatges són sobre la mateixa zona. La seqüència que s'ha seguit és la següent: les dues primeres imatges òptiques (b) i (d) són a una distància de nanòmetres de la superfície (la primera és un zoom de la segona); la tercera imatge òptica (e) s'ha realitzat allunyant la punta aproximadament $3\mu\text{m}$ de la superfície, i la última (f) a unes $10\mu\text{m}$ aproximadament. A les imatges topogràfiques podem observar perfectament la quantitat de contaminació que hi ha sobre la mostra. Això afecta clarament a la propagació òptica. A les dues primeres imatges òptiques (b) i (d)

s'observa una barreja de llum deguda a la propagació per la guia i a dispersió de llum per la contaminació. A més a més, la propagació es veu clarament afectada. Tal i com podem observar a les imatges (b) i (d), abans de la contaminació la llum es propaga correctament per la guia, i un cop sobrepassada la contaminació la propagació es modifica. Les imatges òptiques preses lluny de la mostra, (e) i (f) només contenen senyal òptic degut a la dispersió, lògic si tenim en compte que el camp evanescent només s'allarga unes desenes de nanòmetres. A mesura que ens allunyem aquesta dispersió s'eixampla i disminueix de intensitat, tal i com ha de ser si mantenim la potència total sobre l'àrea en que es va eixamplant. Aquesta llum és la que nosaltres podem veure amb un microscopi o, si és prou intensa, a simple vista, i no representa la propagació real, tot i que és deguda a una conversió de la llum que es propaga per la guia en llum radiada cap a l'exterior.

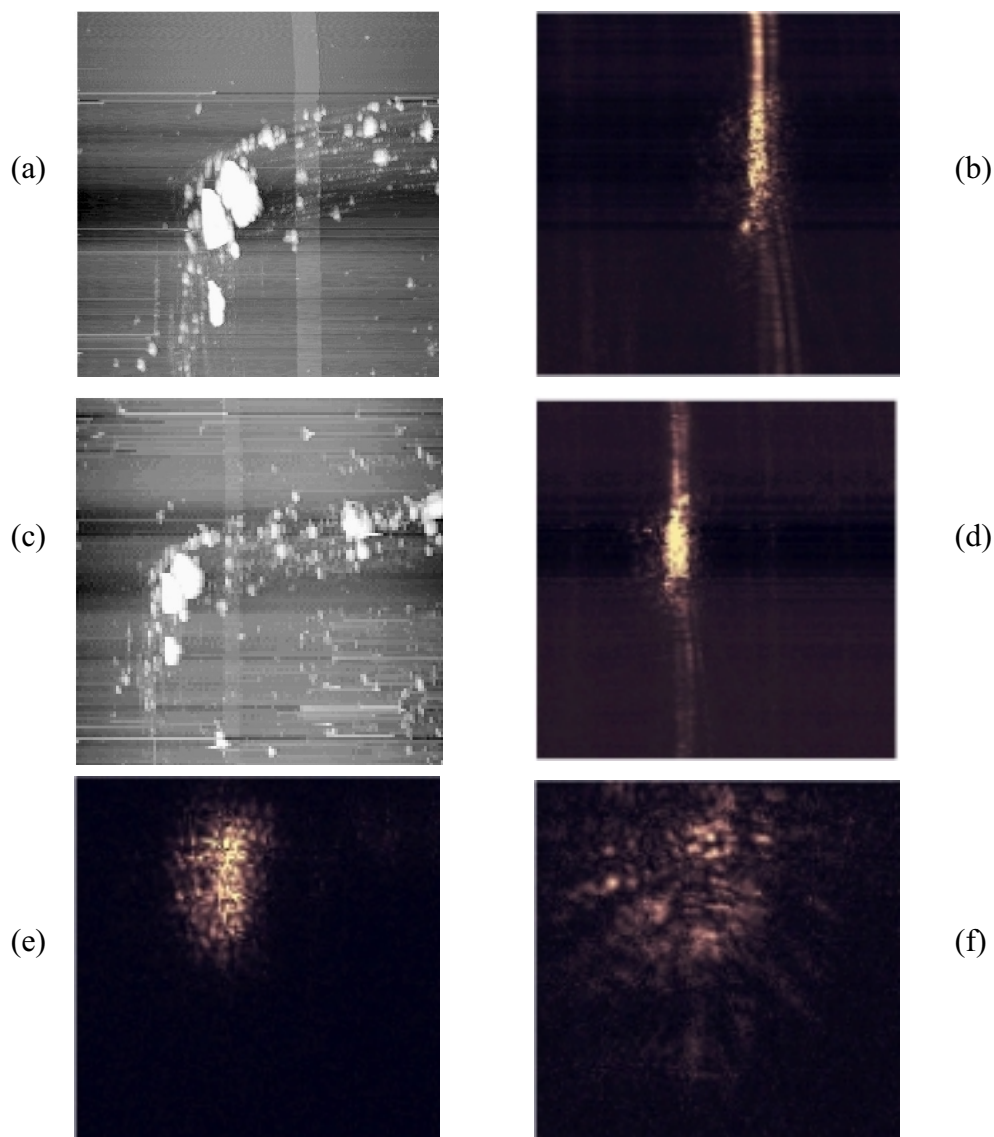


Figura 3-17. Sèrie d'imatges topogràfiques, (a) i (c), i òptiques mostrant l'efecte d'impureses o pols sobre una guia de nitrur de silici: prop de la mostra, (b) i (d), hi ha llum dispersada i llum provinent del camp evanescent, però a mesura que ens allunyem només sobreviu la llum dispersada (e) i (f).

Una tècnica que es fa servir per caracteritzar la propagació en guies, consisteix precisament en utilitzar centres dispersius distribuïts uniformement per la superfície de la guia, o fins i tot crescuts com a impureses en el procés de fabricació, i observar amb un microscopi la llum dispersada quan s'està propagant llum per la guia. Tot i que amb aquesta tècnica de camp llunyà obtindrem el camí per on viatja la llum, és ben evident la gran diferència d'informació i resolució que obtenim amb el nostre microscopi, que es troba en camp proper, molt a prop de la mostra, i detecta el camp evanescent.

Un altre factor important que pot afectar la propagació de la llum és la inserció de la llum a la guia. Per això cal que la inserció sigui el màxim de central i amotllada a l'estructura de la guia. Si no és així, petits canvis en la inserció provoquen canvis en la propagació de la llum per la guia, i per tant afecta la reproduïbilitat dels resultats.

A la figura 3-18 es demostra aquest efecte. En aquest cas la inserció és amb una fibra òptica, que no és el més adequat per aquest tipus de guia, ja que la diferència de tamanys dels nuclis fa que hi hagi moltes pèrdues d'inserció ($150\text{nm}/4\mu\text{m}$). Tot i així, la propagació es pot observar perfectament. A la figura 3-18 (a) i (b) es presenten les condicions de propagació per a la mateixa zona variant les condicions d'inserció.

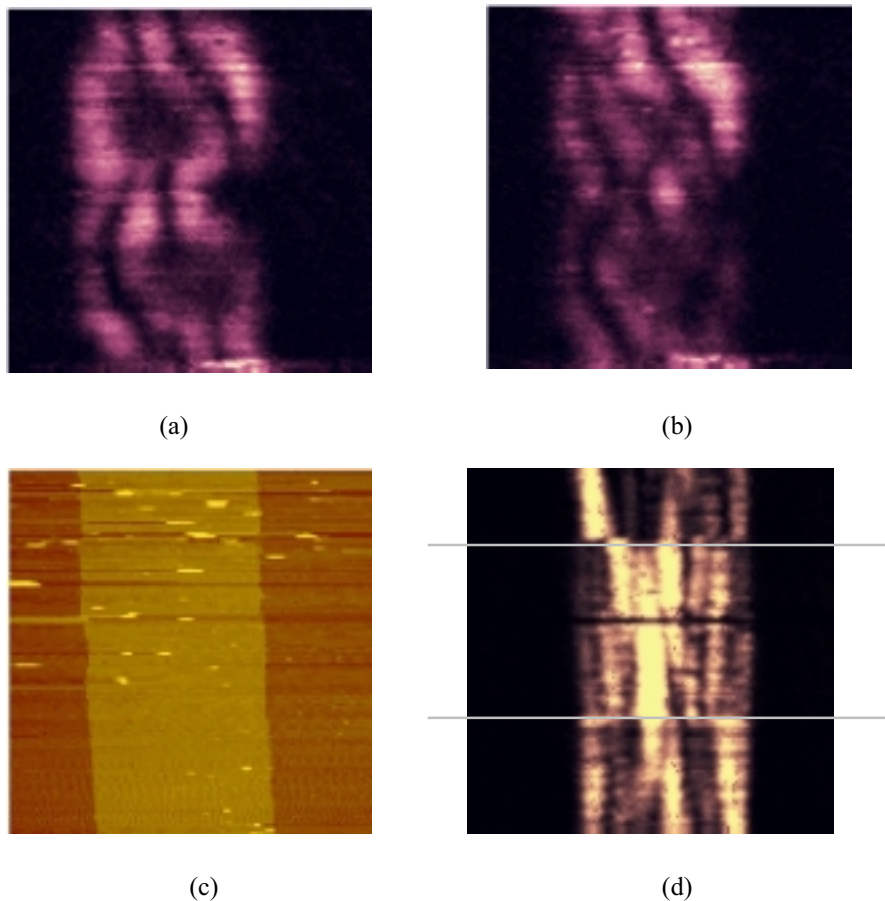


Figura 3-18. Propagació amb diferents condicions d'inserció. (a) i (b) imatges òptiques SNOM variant les condicions d'inserció entre una imatge i l'altra, (c) imatge topogràfica de la mateixa àrea de la guia. El rang de les imatges és de $16\mu\text{m}$ - $215\mu\text{m}$. (d) Imatge de $30\mu\text{m}$ - $85\mu\text{m}$ d'una altra guia on s'han modificat les condicions d'inserció (marcades amb línia grisa) durant la imatge.

De la figura 3-18(a) a la 3-18(b) simplement s'ha mogut un xic la fibra i s'ha tornat a lloc. Aquest procés s'ha realitzat sense intentar ser massa acurats alhora de tornar la fibra a lloc, de forma que les condicions d'acoblament hauran canviat lleugerament. Això es veu reflexat a les imatges de propagació, ja que són diferents, i això ens indica que l'excitació dels diferents modes laterals s'ha fet en diferents proporcions a cada cas. També s'ha realitzat el procés de variació de les condicions d'injecció mentre s'està prenent la imatge. El resultat és la figura 3-18(d), on es poden veure canvis sobtats en la distribució modal degut als canvis de les condicions d'inserció de la llum.

Així com la injecció de llum a la guia pot representar que s'excitin uns modes o altres, també s'ha de tenir en compte que quan la llum no està polaritzada conviuran modes TE i modes TM alhora. En principi, per aquest tipus de guia aquests modes són ortogonals, i per tant no han d'interferir, tot i que conviuen alhora a la guia. Tot i així, alguns autors troben una modulació que estimen deguda a aquesta interferència, que seria degut a una conversió TE-TM a la pròpia fibra de l'SNOM que recull la intensitat, degut a l'acoblament de la llum i a les corbes que descriu la fibra, que indueixen efectes de birrefringència [8]. A la imatge 3-18d es pot observar una certa modulació vertical que podria ser degut a aquest efecte, però si avaluem el període d'aquesta interferència veurem que necessitem realitzar imatges de menor rang:

$$L_{TE-TM} = \frac{\lambda}{2\Delta n_{eff}} = 1.97\mu m \quad (3-23)$$

A la imatge de la figura 3-19 podem observar una imatge amb aquesta modulació. En aquest cas la llum no està polaritzada, i és pot observar clarament una interferència de període $1.82\mu m$, que significa una diferència del 7% respecte el model teòric. Si tenim en compte que aquest període no coincideix amb cap altra interferència teòrica entre els diferents modes TE o entre els diferents modes TM, la interferència TE_0-TM_0 és l'explicació més plausible.

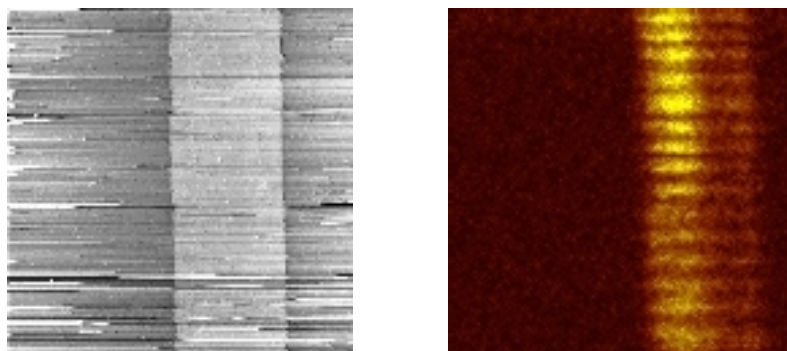


Figura 3-19. Interferència TE_0-TM_0 . Les imatges tenen un rang de $24.5\mu m \times 25.5\mu m$. El període de la modulació vertical val $1.82\mu m$.

3.4 L'SNOM en el procés de fabricació.

Fins ara hem estat caracteritzant guies ja fabricades. De la informació extreta n'hem obtingut diversos paràmetres que ens ajuden a comprendre com es comporten aquestes guies. Més enllà d'això, aquesta caracterització també ens permet obtenir un *feedback* positiu per a la fabricació de les guies, és a dir, ajudar a la fabricació d'estructures millors. De la caracterització anterior n'hem extret que les guies tenien l'esglaó massa alt, i això s'ha vist reflexat a la propagació òptica. En canvi l'estructura vertical sí que compleix amb l'esperat, ja que la constant de decaïment fita perfectament amb el valor esperat. Així doncs, hi ha hagut un sobreatac RIE. Si volem que es compleixin les característiques de la figura 3-8 caldrà fer noves guies.

Realitzar aquestes noves guies, però, continua tenint el problema de comptabilitzar el temps d'atac del RIE per obtenir l'esglaó adequat, i aquí és on l'SNOM també pot ajudar de forma decisiva. Tenint en compte que els esglaons que s'han de realitzar són de 3nm, l'ajut d'una eina de caracterització local i no-destructiva durant el procés de fabricació és fonamental.

El procés que se seguirà serà el següent: es realitzaran les guies fins arribar a l'atac per RIE. A continuació es realitzarà l'atac, controlant la potència i el temps d'atac, de forma que no es sobrepassi l'alçada desitjada. Amb l'SNOM podrem realitzar una caracterització topogràfica del resultat sense malmetre la oblea, de forma que si cal es podrà continuar fent més atac RIE, en el cas que no hagi estat suficient, o si ha estat suficient, passar al tallat de la oblea en les diferents mostres que contenen les guies. El resultat final serà doble: d'una banda s'obtinran les guies desitjades, però a més a més s'haurà caracteritzat l'atac RIE per a alçades molt petites.

L'estructura que finalment s'ha triat té un nucli de 250nm, i un substrat d'òxid de silici igual que abans de 2µm. A la figura 3-20 podem veure la distribució del mode vertical, que en aquest cas té un índex efectiu de 1.83. La longitud de decaïment calculada a partir d'aquests valors és de 32.8nm.

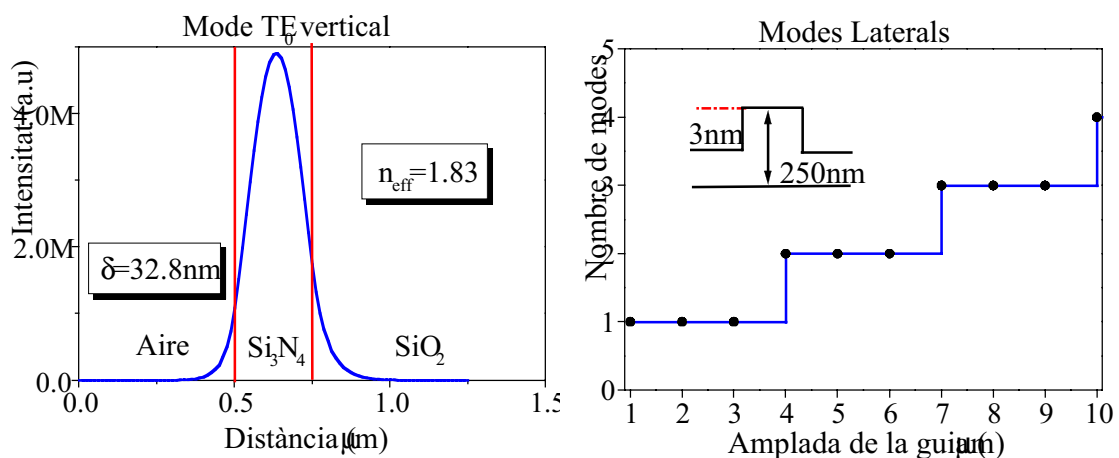


Figura 3-20. Guia de nitrur de 250nm de nucli i 3nm d'esglaó. Distribució del mode fonamental TE₀ i nombre de modes laterals en funció de l'amplada de la guia.

A la figura 3-20 també s'ha dibuixat la gràfica del nombre de modes en funció de l'amplada de la guia. Comparant-la amb la gràfica 3-8 entenem perquè s'ha maximitzat el gruix de la capa de nitrur: d'aquesta forma el contrast d'índex lateral és menor, i per tant el nombre de modes en funció de l'amplada de la guia és menor. De totes formes això no vol dir que puguem fer més gran el gruix de la capa de nitrur, ja que si superem els 280nm aleshores esdevé multimode verticalment.

A continuació veurem el resultat de realitzar aquest procés de creixement. Tal i com s'ha fet abans, també aquí s'han fabricat vàries oblees. La raó d'això és intentar evitar de tornar entrar la oblea a sala blanca un cop s'ha tret per observar-la amb l'SNOM. El procés serà, per tant, fer l'atac RIE de la primera oblea un temps determinat i abans d'atacar la segona oblea realitzar la caracterització topogràfica amb l'SNOM. Després dels dos primers intents, on no s'ha pogut observar cap mena d'estructura, a la figura 3-21 es pot observar una guia de nitrur de $10\mu\text{m}$ d'amplada i amb una alçada de l'esglaió de 1.5nm després d'un atac RIE a 100W durant 100segons. Al perfil topogràfic sembla observar-se un pendent als laterals de la guia, però això és un efecte del processat de la imatge per poder veure la guia. Tot i que aquesta alçada no és la desitjada inicialment, és prou propera com donar-la per bona ja que, de fet, una diferència d'alçada menor ens és més favorable en l'intent d'aconseguir la guia monomode lateral el més ample possible.

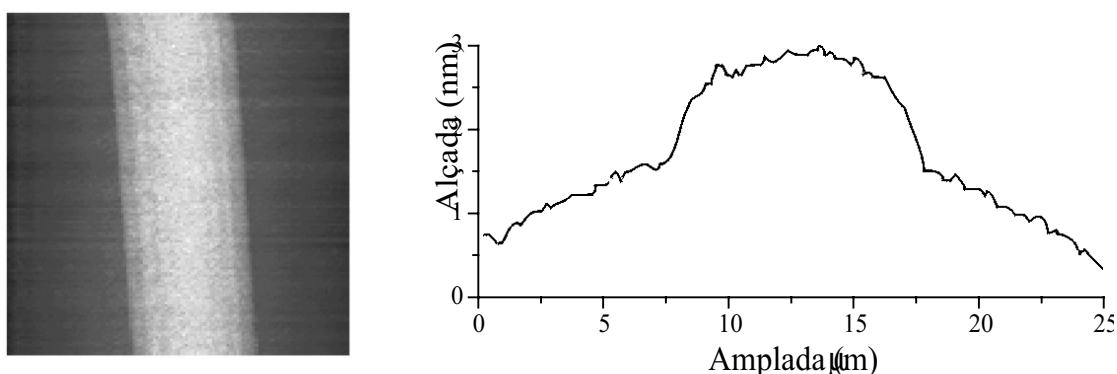


Figura 3-21. Imatge de $27\mu\text{m}$ $_25\mu\text{m}$ d'una guia de $10\mu\text{m}$ d'amplada. El RIE ha donat 1.5nm d'alçada.

A la figura 3-22 hi ha la imatge topogràfica i també de propagació òptica d'una mostra de l'última oblea, on s'ha realitzat un atac superior a l'anterior, de 150s a 100W, i s'ha aconseguit una guia de 2.5nm d'esglaió. Per realitzar la caracterització òptica s'ha hagut de tallar la oblea en els diferents xips amb guies i polir un d'aquest xips per aconseguir tenir un bon acoblament de la llum a la guia, de forma que la caracterització òptica no es pot realitzar fins que ja s'ha donat la oblea per vàlida, és a dir, amb l'alçada desitjada.

Finalment, a la taula 3-1 reconstruïm els valors de potència i temps de l'atac RIE juntament amb les alçades obtingudes per a les guies de nitrur de silici. També hi incloem les guies obtingudes a l'apartat anterior, amb alçades de 8,10 i 12nm.

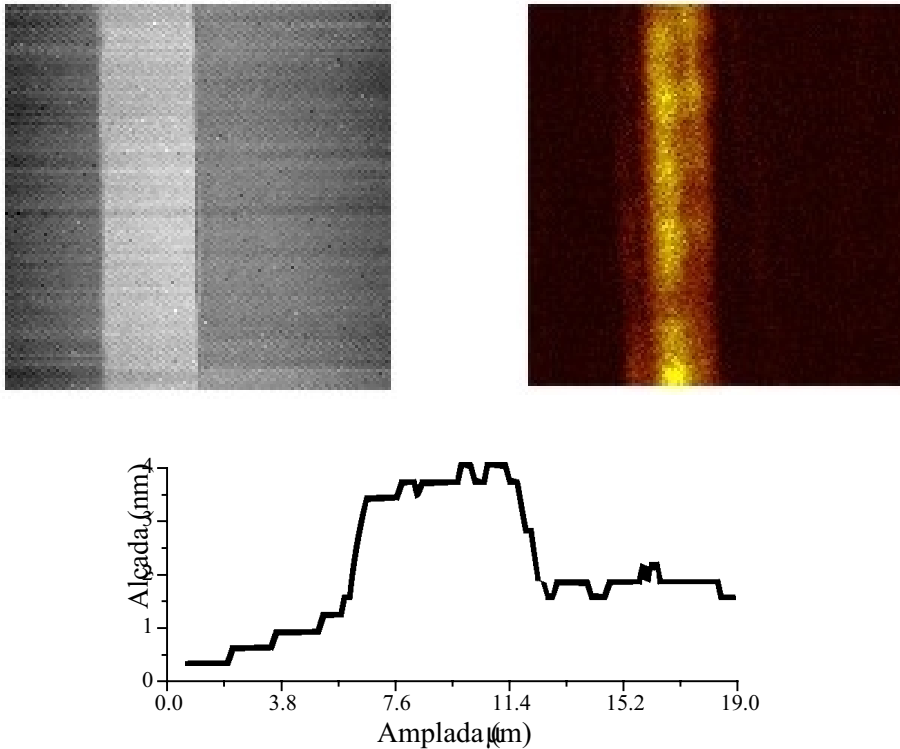


Figura 3-22. Imatges topogràfica i òptica SNOM de $24\mu\text{m}_22.5\mu\text{m}$. La guia té $6.2\mu\text{m}$ d'amplada i 2.5nm d'alçada. A la part inferior es mostra un perfil topogràfic.

Potència (W)	Temps (segons)	Alçada esglaó (nm)
150	50	8
150	60	10
150	70	12
75	50	No mesurable (<1)
75	100	No mesurable (<1)
100	100	1.5
100	150	2.5

Taula 3-1. Paràmetres de l'atac RIE en funció de l'alçada de l'esglaó obtingut.

Amb les màscares utilitzades per fabricar aquestes guies també hi havia alguns dispositius apart de guies rectes. Un d'aquests és una unió en Y, que és una separació de la branca principal en dues branques de forma que la llum es divideix a cada feix. En aquest cas, paràmetres com l'angle d'obertura de la unió i el seu perfil geomètric (recte , sinusoidal, etc.) o l'amplada de les guies, determina finalment com es divideix la llum a cada branca. Aquest tipus d'estructura és molt interessant alhora de realitzar interferòmetres que podran ser utilitzats com a sensors. Al capítol següent, dedicat a les guies ARROW, realitzarem un estudi més complet d'aquesta estructura, però de totes formes degut a la seva més fàcil caracterització, aquí presentem un exemple realitzat amb les guies de nitru de silici.

A la figura 3-23 veiem la topografia i la propagació òptica per aquesta estructura. De la part topogràfica en podem determinar la geometria, que ens dóna un angle d'unió de 4.5° . També es pot comprovar com la guia és molt més ampla just abans de la zona de divisió, $12.9\mu\text{m}$, que a cadascuna de les branques, on és de $8\mu\text{m}$. Això és degut al disseny de la divisió, que s'ha de fer de forma que hi hagi una transició d'una estructura recta a una estructura en Y més ampla, i per tant la guia recta s'ha d'obrir lleugerament abans de dividir-se.

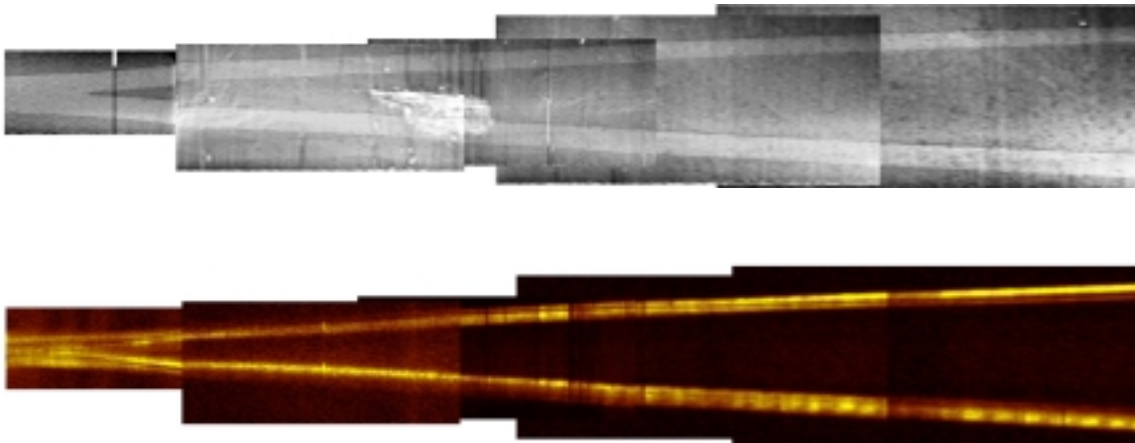


Figura 3-23. Imatges topogràfica i òptica d'una divisió en Y. La imatge té un rang de $85\mu\text{m}$ _ $235\mu\text{m}$.

La propagació en aquest cas també es veu afectada, ja que just abans de la divisió és lleugerament més complexa que a cadascuna de les branques, tal i com podem comprovar al zoom sobre el punt d'unió mostrat a la figura 3-24. Això pot representar pèrdues en la transició, de forma que és un punt al que cal posar molta cura en el disseny i la fabricació. Tot i que no es pot observar amb molta precisió, a les branques la propagació no és estrictament monomode, de forma que s'observen algunes interferències. Això és lògic doncs la màscara per definir l'estructura és va dissenyar per utilitzar-la en guies ARROW, amb unes característiques de propagació diferents, i que permeten utilitzar guies més amples mantenint la propagació monomode. De fet, observant la gràfica 3-20b ja veiem que per una guia de $8\mu\text{m}$ la propagació no és monomode, tal i com acabem de comprovar experimentalment.

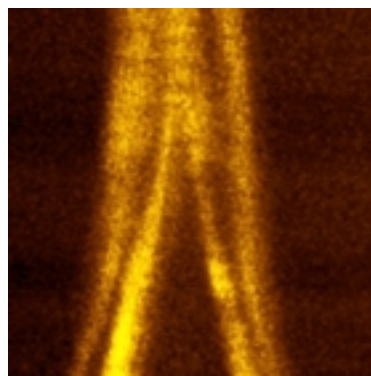


Figura 3-24. Zoom òptic sobre la zona d'unió de les guies.

També hem realitzat corbes d'aproximació punta-mostra per obtenir el perfil del camp evanescent, i així determinar l'índex efectiu de propagació. A la figura 3-25 es mostra el resultat d'aquestes corbes, que s'han realitzat a diferents punts del dispositiu: abans de la unió i a cada branca després de la unió.

La constant de decaïment experimental dóna similar a tot arreu, i és al voltant dels 30.5nm. Comparada amb el valor teòric de 32.8nm, aquest càlcul ens mostra una discrepància important, ja que amb aquesta constant de decaïment l'índex efectiu de propagació a la guia hauria de ser de 1.93, lluny de valor teòric de 1.83. Aquesta diferència podria tenir importants conseqüències, ja que això voldria dir que la llum està més confinada del que correspondria amb un nucli de nitrur de 250nm, i per tant potser el nucli és més gruixut de l'esperat.

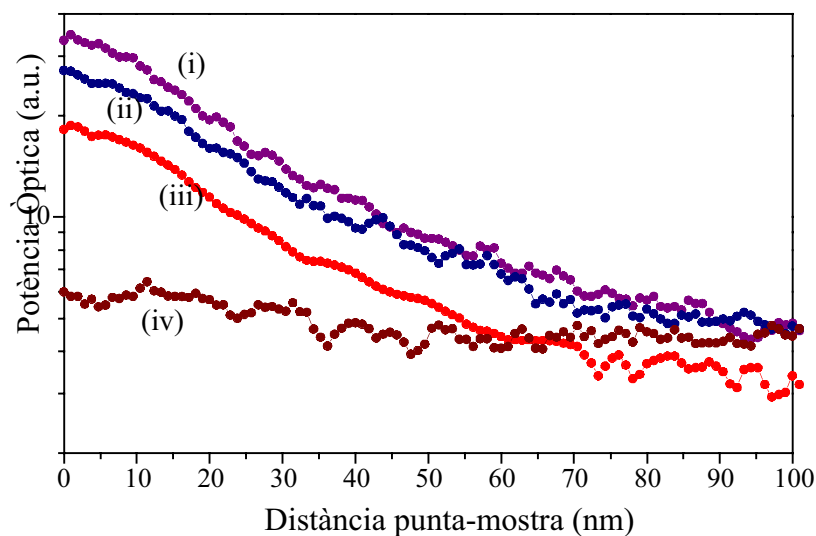


Figura 3-25. Perfil de la intensitat del camp evanescent (i) abans de la divisió; (ii) a la branca superior de la figura 3-23; (iii) a la branca inferior de la figura 3-23; (iv) nivell de soroll fora de la guia.

De totes formes, però, hi ha un altre factor a tenir en compte: si observem el nivell de soroll per la rampa realitzada fora de la guia ens adonem que el nivell de soroll és molt gran (a 60nm supera el camp evanescent per la corba iii), de forma que la relació senyal-soroll és baixa, i per tant probablement la constant calculada no sigui del tot fiable. Una forma d'obtenir una corba més aproximada a la real podria ser restant dues corbes realitzades sobre el mateix punt amb el làser encès i apagat, tot i així no eliminaríem el soroll degut a la dispersió de la guia, però si qualsevol altre font d'error.

Com a conclusió d'aquest capítol podem esmentar que s'ha comprovat que amb l'SNOM és possible observar la propagació modal en guies d'ona òptiques integrades. Comparant els resultats amb simulacions, es poden arribar a identificar els modes de propagació. També es pot obtenir la longitud de decaïment a la guia, i d'aquí trobar l'índex efectiu de refracció de la llum per la guia. Finalment, utilitzant l'SNOM també ha estat possible la caracterització de l'atac RIE per a fabricació de noves guies, amb esglaons de 1.5nm i 2.5nm.

Referències

- [1] W.B.Jones, *“Introduction to Optical Communication Systems,”* Holt, Rinehart and Winston, Inc., (1988).
- [2] 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).
- [3] X.Borrisé, N.Barniol, F.Pérez-Murano, X. Aymerich, D.Jiménez, *“Scanning near-field optical microscope for the characterization of optical integrated waveguides,”* Proc. ECIO'99, 121-124 (1999).
- [4] X.Borrisé, D.Jiménez, N.Barniol, F.Pérez-Murano, X.Aymerich, *“Scanning Near-Field for the Characterization of Optical Integrated Waveguides,”* IEEE J.of Lightwave Technol. **18**, 370-374 (2000).
- [5] D.Jiménez, *“Diseño de dispositivos Optoelectrónicos integrados: métodos numéricos de simulación de la propagación de ondas electromagnéticas,”* Tesi Doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona (2000).
- [6] K.J.Ebeling, *“Integrated Optoelectronics,”* Springer-Verlag (1992).
- [7] D.Marcusse, *“Theory of Dielectric Optical Waveguides,”* Academic Press (1974).
- [8] M.L.M. Balistreri, A.Driessen, J.P.Kortarik, 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).