

# **ESTRUCTURES PERIÒDIQUES MICROMÈTRIQUES MITJANÇANT LITOGRAFIA LÀSER**

**Treball de Final de Grau en Nanociència i Nanotecnologia**

**Ignacio González Portillo**

**Supervisor: PhD Gemma Rius (IMB-CNM-CSIC)**

**Tutor: Juan Piniella**

**Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)**

**17 de Juny del 2019**





## Continguts

1.	Introducció .....	1
1.1.	Objectius .....	2
2.	Cristalls Fotònics.....	4
2.1.	Fonaments físics.....	4
2.2.	Caracterització cristalls fotònics.....	4
2.3.	Aplicacions cristalls fotònics.....	5
2.4.	Disseny de l'estructura.....	7
2.4.1.	Descripció de l'estructura .....	7
2.4.2.	Xarxa hexagonal .....	8
2.5.	Elecció del substrat i materials.....	8
2.6.	Simulació amb MPB.....	9
2.6.1.	Fitxer d'entrada .....	9
2.6.2.	Resultats .....	10
3.	Fabricació de les estructures.....	11
3.1.	Fonaments litografia i estratègia de fabricació.....	11
3.2.	Descripció general de l'equip .....	12
3.3.	Treball en un entorn de sala blanca .....	15
3.3.1.	Descripció de la sala blanca.....	15
3.3.2.	Procés de litografia .....	15
3.3.3.	Processos posteriors a la litografia.....	18
4.	Resultats i caracterització de les estructures.....	19
4.1.	Optimització paràmetres de fabricació.....	19
4.2.	Estructures amb diferents substrats, Metal·lització i Transflex.....	25
4.3.	Estructures amb geometries, períodes i defectes diferents .....	27
	Conclusions .....	30

## 1. Introducció

El projecte que aquí es presenta s'emmarca en els anomenats cristalls fotònics (de l'anglès, Photonic crystals, PhCy) i aborda la seva estructura física. Els PhCy són estructures òptiques periòdiques. Les propietats òptiques d'aquestes estructures es basen en la periodicitat de la constant dielèctrica (relacionada amb la permitivitat i l'índex de refracció) de tal forma que la seva interacció amb una ona electromagnètica (em) incident pot restringir quines longituds d'ona es poden transmetre. La seva periodicitat correspon a una nanoestructuració definida per uns paràmetres característics (mida dels motius, distància entre motius i disposició espacial). Es poden combinar un o més elements de diferent constant dielèctrica. Els PhCys es troben a la natura, per exemple, aportant color a alguns éssers vius, tals, com vegetals o insectes. Entre els materials inorgànics, un exemple paradigmàtic és l'òpal, un mineral que refracta la llum en funció de l'angle d'incidència. La cel·la primitiva d'aquest mineral és la FCC<sup>1</sup>, la qual s'ha replicat artificialment, tant la seva estructura (model d'esferes en un medi) com l'anomenada Òpal inversa (canviant les esferes per cavitats) [18].

Els PhCys es donen en una (1D, lineal), dues (2D, pla) o tres dimensions (3D, volum), en funció del número d'eixos en què es troba la periodicitat de la constant dielèctrica. En el cas 2D, com serà aquest treball, cal destacar dues estructures principals, la quadrada i l'hexagonal.

Precisament en base a la periodicitat es pot establir una analogia entre l'estructura dels PhCys i la física de l'estat sòlid. El comportament del fotons als PhCys seria similar al comportament dels electrons i forats dins una xarxa d'àtoms. Existeixen però diferències fonamentals entre els dos casos, la més important és que els electrons segueixen la distribució de Fermi-Dirac<sup>2</sup>, mentre que els fotons segueixen la distribució de Bose-Einstein<sup>3</sup>. De la mateixa manera que la física de l'estat sòlid permet obtenir l'estructura de bandes energètiques, en els PhCys, es pot calcular quin nombre d'ona li correspon a l'interior del cristall a cada freqüència de ressonància de les ones incidents. Així, a l'igual que en una xarxa atòmica, la modulació periòdica de la constant dielèctrica, dóna lloc a l'existència d'un Photonic Band Gap (PBG). El PBG ens informa sobre quines freqüències estaran prohibides a l'interior del cristall, i.e. la radiació incident que tingui una freqüència dins del PBG no serà transmesa dins el cristall i, per tant, serà reflectida. Existeixen dos tipus de PBG, el complet i el parcial; el complet s'estén per tots els nombres d'ona, mentre que el parcial existeix només per determinats nombres d'ona.

Semblant a la implantació iònica en els materials semiconductors, es poden introduir defectes puntuals en l'estructura periòdica per tal de modificar l'estructura de bandes, possibilitant estats o freqüències ressonants a l'interior del PBG. Això implica que una radiació em incident amb una freqüència coincident amb la del defecte creat a l'interior del PBG podrà existir dins d'aquest defecte. Així, si es crea un camí de defectes dins del PhCy, una radiació em que a priori no podria transmetre pel cristall en condicions normals, en aquest cas sí que podrà transmetre's seguint el camí dels defectes, col·loquialment podríem parlar d'un camí de conducció òptica [18, 20].

---

<sup>1</sup> **FCC:** Tipus de base atòmica, cubica centrada en les cares.

<sup>2</sup> **Distribució Fermi-Dirac:** En física estadística, dóna la distribució estadística de fermions idèntics sobre un conjunt d'estats energètics a una certa temperatura.

<sup>3</sup> **Distribució Bose-Einstein:** Distribució estadística de Bosons sobre un conjunt possible d'estats energètics en equilibri termodinàmic.

En base als materials utilitzats, els PhCys poden ser dissenyats i fabricats de manera que siguin sensibles a diferents estímuls fisicoquímics tals com: temperatura, estrès mecànic, pH, canvis en el potencial elèctric o camps magnètics. Aquests estímuls externs alteren de diferents maneres l'estructura del cristall, canviant així la periodicitat dielèctrica i per tant alterant el PBG. Així doncs, aquests materials permeten detectar canvis en certs paràmetres de l'entorn gràcies a la variació que aquests canvis provocaran en la interacció entre l'estructura i la radiació incident, i.e. poden ser utilitzats com a sensors[16].

L'interès per aquest tipus d'estructures s'ha fet molt més evident en les ultimes dècades, malgrat que a finals del segle XIX ja es formulen les primeres hipòtesis sobre el control de la propagació de la llum fent servir estructures periòdiques. Concretament s'investiguen estructures periòdiques en 1D. Un segle després (1972) a la Unió Soviètica V.P Bykov [2] descriu la possibilitat de controlar el fenomen de l'emissió espontània amb estructures periòdiques.

Al 1987 amb el treball de E. Yablonovitch i S. John [12], on descriuen el control de la emissió espontània i de la propagació de la radiació em en estructures periòdiques, comença a estendre's la investigació dels PhCy's. Al 1990, s'obté l'estructura de bandes dels PhCy's amb estructura FCC i al 1992 la dels que tenen estructura FCC inversa. No és fins el 1998 quan es fabrica artificialment per primera vegada l'estructura d'òpal inversa, el diàmetre de les esferes fabricades era de 1 micròmetre. A l'any 2000 s'obté el primer PhCy 3D amb un PBG complet a la zona de l'infraroig, consistent en esferes de silici ordenades en una cel·la de diamant. Entre 1987 i 2005 es publiquen més de 10.000 treballs dedicats als PhCy's o les seves aplicacions [16].

Com a punt de partida d'aquest treball, s'han estudiat diversos articles basats en PhCys, cada un amb diferents estructures i mètodes de fabricació. Destaquem l'article “Daniela Dragoman - PMMA PHOTONIC CRYSTALS FOR WAVEGUIDING APPLICATIONS” [4], en aquest estudi es proposa una estructura de forats cilíndrics en una capa de PMMA. D'una banda tracten la simulació de l'estructura i d'altra banda la fabriquen fent servir una tècnica litogràfica d'escriptura directa de resolució submicromètrica, Electron Beam Litography (EBL). Les simulacions indiquen la presència d'un PBG centrat als 600 nm de longitud d'ona, és a dir, dins la zona visible de l'espectre. El disseny proposat és fàcilment reproduïble, i el tipus de material utilitzat (resina) és fàcilment processable. Així que es tria l'exemple d'aquest article com a referència, malgrat que la resolució de l'equip disponible de litografia làser és submicromètrica.

El projecte s'ha desenvolupat al Centre Nacional de Microelectrònica (CNM) sota la supervisió de la investigadora Gemma Rius. El centre està dotat amb una Sala Blanca de micro i nanofabricació (SBCNM) que en apartats posteriors es descriurà.

### 1.1. Objectius

Un cop s'ha fet la recerca de bibliografia sobre els cristalls fotònics i estudiat diversos exemples, es planteja replicar l'estructura de l'article de referència, però fent servir materials diferents i una tècnica litogràfica d'escriptura directa diferent. Així doncs els principals objectius d'aquests projecte són:

1. Redissenyar l'estructura dels PhCys de l'article comentat, en base les capacitats i materials d'un equip litogràfic d'escriptura directa amb làser
2. Caracteritzar estructuralment les estructures fabricades amb microscòpia òptica i electrònica.

3. Consolidar coneixements i experiència en el treball a una Sala Blanca i assolir autonomia amb un equip de litografia.

EL treball inclou, estudiar els fonaments dels PhCys i aprendre a simular algunes estructures amb el programari adequat.

El treball s'estructura de la següent manera. Després d'aquest primer apartat d'introducció, al capítol 2 es parametrizaran els PhCy's tant teòricament com estructuralment, a més se'n comentaran algunes aplicacions. D'altra banda és descriurà el disseny de l'estructura triada per la fabricació, els materials i per últim la simulació d'una estructura hexagonal amb el software MPB<sup>4</sup>. Al capítol 3 es presenta la fabricació de les estructures, en primer lloc es descriu la tècnica utilitzada i l'equip concret que s'ha fet servir, i en segon lloc es detalla el procés complet de què consta el fabricar les estructures. També es dóna una descripció general del concepte i ús d'una sala blanca, i a l'Annex 2 es donen detalls particulars de la sala blanca on s'han fet les fabricacions (SB-CNMI). Al capítol 4 es mostren els resultats de les exposicions i es comenta com s'han anat variant els paràmetres de fabricació per optimitzar les estructures. Per acabar a l'apartat 5 es recullen les conclusions sobre el projecte fent referència als objectius iniciais.

---

<sup>4</sup> **MPB**: Software de distribució lliure desenvolupat pel MIT (Massachusetts Institute of Technology).

## 2. Cristalls Fotònics

En aquest capítol es descriuran els PhCys des d'un punt de vista físic, es tractarà la seva caracterització i es donaran alguns exemples d'aplicacions. Seguidament es parlarà del disseny triat, la seva fabricació i les seves característiques. Finalment, es descriurà la simulació de l'estructura amb el software MPB.

### 2.1. Fonaments físics

Per entendre el comportament dels cristalls fotònics s'apliquen les equacions de Maxwell (fòrmules 1,2,3,4), les qual ens permeten tractar la propagació de les ones electromagnètiques al interior del cristalls.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \nabla \times \vec{E} + \frac{d\vec{B}}{dt} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{D} &= \rho & \nabla \times \vec{H} - \frac{d\vec{D}}{dt} &= \vec{J}\end{aligned}$$

*Equació 1, 2, 3, 4: Equacions de Maxwell*

Per escollir els paràmetres que defineixen les equacions és necessari tenir en compte les característiques físiques d'un cristall fotònic. D'una banda, s'imposa un medi dielèctric mixt invariable en el temps, això significa que no tenim ni càrregues ni corrents lliures ( $\rho=0$  i  $J=0$ ). Es considera també un règim lineal, és a dir, considerem un material macroscòpic i isotòpic, i.e. constant dielèctrica uniforme.

Si apliquem aquestes condicions a les equacions de Maxwell, separant la part temporal i espacial i desenvolupant les equacions matemàticament, arribem a una equació mestra (fórmula 5). Aquesta equació es pot tractar com un problema de valors propis, per resoldre-la es poden utilitzar dos mètodes diferents: PWE (Planar Wave Expansion) i FDTD (Finite Difference Time Domain)

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\epsilon_m(\vec{r})} \nabla \times \vec{H}(\vec{r}) \right] = \frac{w^2}{C^2} \vec{H}(\vec{r})$$

*Equació 5: Equació mestra, es resol com un problema de valors propis, concretament es pot resoldre segons el mètode FTD (Finite Time Domain ) o PWF (Planar Wave Expansion).*

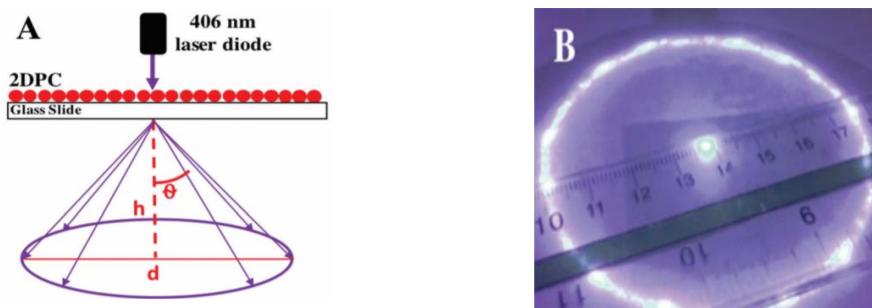
Les possibles solucions de la equació mestra són les freqüències permeses o modes que podran propagar-se a l'interior del cristall. Amb aquesta informació podem dibuixar el diagrama de bandes de l'estructura i localitzar el gap de freqüències prohibides. A l'apartat 2.4 se simula una estructura fent servir l'aproximació PWE.

### 2.2. Caracterització cristalls fotònics

Per observar i caracteritzar les dimensions un cristall fotònic es poden utilitzar diferents tècniques en funció l'ordre de magnitud de l'estructura i resolució. Pels cristalls amb una mides superiors a la micra, com serà el cas d'aquest treball, podem fer servir microscòpia òptica. En

canvi per aquells dissenys amb mides inferiors a la micra es fa servir microscòpia electrònica, per exemple SEM (Scanning Electron Microscopy)

Una altra manera de caracteritzar aquest tipus d'estructures seria a partir de l'anomenat "Anell de Debye" [11]. Aquest mètode consisteix en fer passar a través de la mostra un feix de llum monocromàtic i el resultat de la interacció entre la llum i el cristall, l'anell de Debye, es projecta sobre una pantalla, col·locada darrere i paral·lela a la mostra.



**Figura 2.1:** a) representació de l'experiment de Debye, PhCy bidimensional sobre substrat transparent (vidre), l'anell de Debye es caracteritza pel diàmetre ( $d$ ), la distància de la mostra a l'anell ( $h$ ) i l'angle ( $\theta$ ). b) imatge real d'un anell de debye sobre un instrument de mesura. [11]

A partir de les dimensions de l'anell podem extreure diferents paràmetres característics del PhCys. Concretament, el diàmetre de l'anell és inversament proporcional a l'espaiat entre partícules, mentre que la brillantor i el gruix de l'anell ens informen sobre el grau d'ordre de l'estructura.

### Interacció amb la llum (PBG)

Tanmateix, una de les tècniques més emprades per caracteritzar com interacciona la radiació amb una determinada mostra que conté un estructura periòdica és amb l'espectre d'emissió, concretament ens fixarem en el pic de màxima transmissió. L'espectre d'emissió ens mostra per a quines longituds d'ona de la radiació incident és dona el fenomen de la transmissió, i la posició del pic de màxim transmissió dóna la longitud d'ona particular on es dóna el màxim nivell d'intensitat en la transmissió. La posició d'aquest pic, és característic per a cada PBG i per tant per a cada estructura

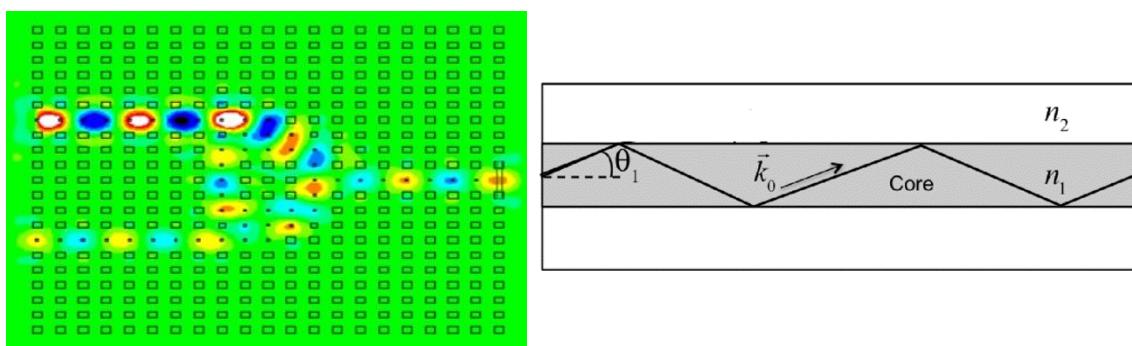
### 2.3. Aplicacions cristalls fotònics

Gràcies a les propietats d'aquestes estructures i a la possibilitat de modificar la posició i ample del PBG, ja sigui afegint defectes o bé dipositant el cristall sobre una matriu polimèrica, els PhCys tenen un gran numero d'aplicacions en diferents àmbits, com la detecció de (bio)molècules, guia d'ones per dispositius òptics, en electrònica, per controlar el fenomen de l'emissió espontània, etc.

A continuació veurem alguns exemples d'aplicacions dels PhCys

## Guia d'ones (Optical Waveguides)

Com ja s'ha comentat els PhCys presenten un PBG derivat d'una periodicitat en la constant dielèctrica, mentre que introduint defectes puntuals en la seva geometria podem generar estats propis permesos dins del gap amb una determinada freqüència / longitud d'ona associada a la radiació incident, de forma que aquesta sí pot existir dins el cristall. Aquest fenomen s'aplica en el que s'anomena guiatge d'ones [7]. Tradicionalment, el guiatge d'ones em s'ha dut a terme amb l'ús de capes dielèctriques i en base al fenomen de la reflexió interna total. Aquest fenomen físic/òptic es dóna en la interfície entre dos materials de diferent constant dielèctrica ( $n_1 > n_2$ ). Una ona em que es troba en un medi amb índex  $n_1$  al arribar a la interfície amb el segon material de menor índex ( $n_2$ ) amb un cert angle mínim (angle crític), no la pot travessar i es reflexa totalment. Així, per exemple, si envoltem totalment un material amb un segon material de menor índex de refracció, la radiació es reflexarà totalment a les fronteres entre els dos material i quedarà "atrapada" dins del material de major índex de refracció, a través del qual podrem per tant guiar la llum [6]. A la figura 2b és mostra una representació d'aquest fenomen, que s'usa de forma molt eficient en les anomenades fibres òptiques. La principal limitació d'aquesta tècnica per la transmissió de la radiació és que si la superfície o estructura del material presenta e.g. cantonades o girs molt tancats la reflexió interna total no es produirà correctament o no continuará el camí marcat per l'estructura, doncs les ones em no arribaran a la interfície amb l'angle crític. És en aquesta limitació on el guiatge d'ones fent servir PhCys pren especial rellevància. Es pot dissenyar l'estructura de forma que la radiació incident tingui una freqüència que coincideixi exactament amb la dels defectes que formarien el camí de conducció a l'interior del cristall, i així la radiació es transmetrà pràcticament amb un 100% d'eficiència. A més, com que la transmissió de la radiació no es basa en un fenomen de reflexió dependent de la diferència entre dos materials, la geometria del camí no afectarà a la transmissió (atenuació de la intensitat nul.la) i podem aconseguir, per tant, un bon guiatge de la llum fins i tot amb girs abruptes o trajectòries molt tancades.



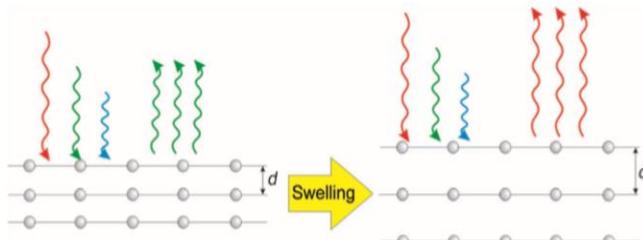
**Figura 1.2:** a) Representació de com es transmet la radiació a través dels defectes a l'interior de un PhCy, la radiació es representa a través del seu camp elèctric (color blau i groc)[10]. b) Representació del fenomen de la reflexió interna entre dos medis amb constant dielèctrica  $n_1$  i  $n_2$ , representa l'angle de reflexió respecte la normal [7].

## Detecció de (bio)molècules

Un PhCy en ser il·luminat amb un cert espectre de longituds d'ona, presenta un màxim de transmissió per una determinada longitud d'ona, de la mateixa manera que hi haurà un rang en què la transmissió no estarà permesa, aquests factors estan determinats pel seu PBG. Provocant un canvi estructural, i, per tant, un canvi en la interacció entre el cristall i la radiació, podem utilitzar aquestes estructures com a sensors o detectors, per exemple, de (bio)molècules o altres

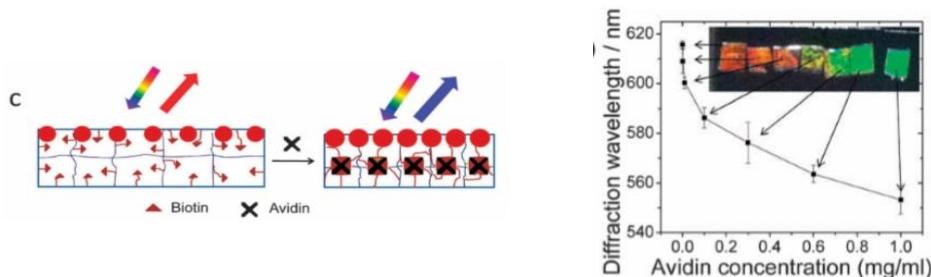
paràmetres i variables físiques que puguin tenir influència en l'estructura del cristall, com poden ser la humitat ambiental o la temperatura [16].

Una possibilitat seria afegir el PhCy a una matriu polimèrica sensible a certs estímuls externs, expandint-se o contraient-se com a resposta a l'estímul, provocant així la modificació de l'estructura del cristall i, per tant, del PBG. L'estímul o canvi es traduirà en un desplaçament del pic de màxima transmissió (canvi de color).



**Figura 2.2:** Representació de com un estímul extern canvia l'estructura i per tant canvia la resposta a una determinada radiació incident [16]

Un exemple d'aquest tipus d'aplicacions seria la detecció d'avidina mitjançant la formació del complex biotina-avidina [13]. En aquest cas, es parteix d'una estructura 2D de simetria hexagonal sobre una matriu d'hidrogel funcionalitzada amb biotina. Quan s'afegeix al medi avidina, aquesta s'uneix per afinitat a la biotina del polímer, la formació del complex provoca un augment del enllaços tipus "cross-linking" de la matriu polimèrica i això comporta una reducció en la distància entre partícules del PhCy que es troba adherit al polímer. Com ja s'ha comentat aquest canvi en l'estructura del cristall provoca un canvi en el PBG i això ho podem determinar/detectar gràcies, per exemple, al espectre de transmissió, on podem veure un desplaçament del pic de màxima transmissió com a resposta, quantitativa, a la presència d'avidina a l'entorn.



**Figura 2.4:** a) Esquema on es mostra com la formació del complex biotina-avidina canvia la resposta del polímer a la radiació incident. b) Gràfica on es representa la variació de la longitud d'ona de difracció respecte la concentració d'Avidina [13].

## 2.4. Disseny de l'estructura

### 2.4.1. Descripció de l'estructura

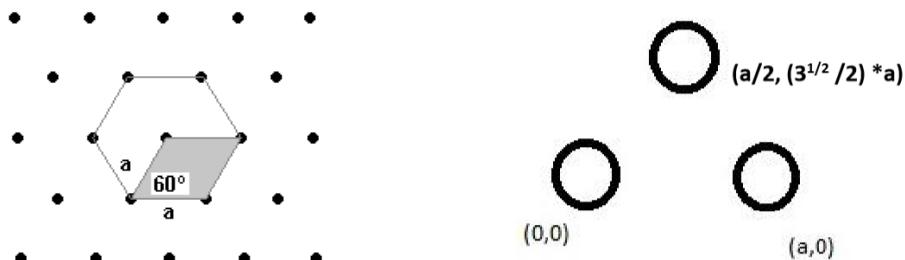
Com ja s'ha comentat, l'objectiu d'aquest treball es materialitzar l'estructura d'un cristall fotònic en una capa de resina sobre un substrat de silici com a pas preliminar a comprovar si les propietats òptiques es mantenen a l'augmentar-ne l'escala en un ordre de magnitud.

El disseny proposat es basa en estructura bidimensional de forats cilíndrics formant una cel·la de tipus hexagonal. La relació entre el radi ( $R$ ) i la distància entre punts més propers (designat típicament com a  $a$ ) és de  $R=0.38a$  [4].

### 2.4.2. Xarxa hexagonal

La disposició de la matriu correspon a un dels 5 tipus de xarxa de Bravais (2D) que existeixen, concretament la xarxa hexagonal. Aquesta disposició es caracteritza, d'una banda, perquè cada punt està envoltat al seu torn de 6 punts a una distància constant que anomenem paràmetre de xarxa ( $a$ ). I com a cel·la hexagonal, l'angle característic d'aquesta estructura és de 120 graus.

Degut a la simetria, la manera més senzilla de representar aquest tipus d'estructures es fixant-nos només en 3 punts, primers veïns, formant un triangle. Com que els punts són equidistants, el triangle és equilàter i per això aquest tipus de geometria rep també el nom de xarxa triangular. Si fixem l'origen de coordenades a un dels tres punts, amb la condició de triangle equilàter podem trobar fàcilment les coordenades, relatives al nostre origen, dels altres dos punts.



**Figura 2.5:** a) representació d'una cel·la hexagonal o triangular amb constant de cel·la “ $a$ ”. b) Representació simplificada d'una cel·la Hexagonal amb 3 punts equidistant i consecutius, s'indiquen les coordenades de cada punt.

Amb les coordenades relatives dels punts del triangle, podem replicar aquesta estructura per translació a tot un pla.

Es va escollir aquest estructura després de consultar l'article, on proposen aquest disseny per a ser fabricat amb un radi pels motius circulars de 320 nm [4]. L'estructura física resultant es corrobora amb les simulacions que presenten i s'observa un PBG a la regió de la llum visible pel que fa a la transmissió de la radiació incident. En canvi, en aquest treball les estructures es dissenyan amb un radi nominal d'un micròmetre.

### 2.5. Elecció del substrat i materials

El comportament d'un cristall fotònic sobre una superfície depèn d'una banda de la geometria d'aquest i, per altra banda, de la diferència entre permitivitats relatives dels materials que formen l'estructura. En el cas d'aquest treball el substrat principal utilitzat és silici tot i que també s'han fabricat estructures en altres suports tals com capes fines d'or sobre Si o pírex .

La tècnica emprada per la fabricació dels motius es basa en l'ús d'una resina fotosensible, en el nostre cas HIPR-6512 [22], que té un índex de refracció igual a 1.664. A l'Annex 1 es pot trobar una taula amb informació específica sobre la resina utilitzada. A l'article de referència [5] utilitzen PMMA com a resina positiva mentre que com a substrat fan servir una superfície d'òxid de silici.

El resultat de la fabricació serà una matriu hexagonal de forats cilíndrics definits en tot el gruix de la resina, això implica que la periodicitat de la permitivitat relativa és donarà entre la resina i l'aire i per tant s'hauran de tenir en compte a l'hora de fer les simulacions.

## 2.6. Simulació amb MPB

Abans de començar amb la fabricació del cristall s'han realitzat les pertinents simulacions per veure que el disseny i materials triats compleixen, en principi, amb les especificacions.

El software triat per la simulació es el MPB (MIT photonic bands) [29], distribuït de forma gratuïta pel Massachusetts Institute of Technology (MIT) [28]. Aquest software utilitza l'aproximació Planar Wave Expansion method (PWE) prèviament esmentada. Aquesta aproximació assumeix que el cristall és ideal i no té en compte ni la font ni el punt d'observació per calcular tots els modes que compleixin amb les condicions de contorn imposades amb el material en què la mostra es troba sotmesa a un camp electromagnètic. Existeix un altre *software*, també distribuït pel MIT, que utilitza l'aproximació de Finite Time Domain (FTD) anomenat MEEP [27].

El programa, d'una banda, consta del fitxer d'entrada o *input*, un *script* on definim les variables de la simulació així com l'estructura i els materials. Posteriorment, s'executa la simulació sobre el *script* d'entrada i obtenim les sortides o *outputs*, on trobarem tota la informació sobre el resultat de la interacció de l'estructura amb la radiació em.

### 2.6.1. Fitxer d'entrada

A continuació es detallen els diferents tipus de fitxers tant d'entrada com de sortida i quins són els resultats obtinguts per a l'estructura plantejada. Els nombres en negreta indiquen les línies de comandament, que seguidament es descriuen.

<b>1)</b>	<b>3)</b>
( <i>set!</i> geometry-lattice ( <i>make lattice</i> ( <i>size</i> 1 1 no-size)))	( <i>define-param</i> eps 3.8) ( <i>define-param</i> r 0.38)
( <i>basis1</i> (/ ( <i>sqrt</i> 3) 2) 0.5) ( <i>basis2</i> (/ ( <i>sqrt</i> 3) 2) -0.5)))	
<i>(define-param kz 0)</i>	
<b>2)</b>	<b>4)</b>
( <i>set!</i> k-points ( <i>list</i> ( <i>vector3</i> 0 0 kz) ( <i>vector3</i> 0 0.5 kz) ( <i>vector3</i> (/ -3) (/ 3) kz) ( <i>vector3</i> 0 0 kz)))	( <i>set!</i> default-material ( <i>make dielectric</i> ( <i>epsilon</i> eps))) ( <i>set!</i> geometry ( <i>list</i> ( <i>make cylinder</i> ( <i>center</i> 0) ( <i>material</i> air) ( <i>radius</i> r) ( <i>height</i> infinity))))
<i>(define-param k-interp 4)</i> <i>(set! k-points (interpolate k-interp k-points))</i>	<b>5)</b> <i>(set-param! resolution 32)</i> <i>(set-param! num-bands 8)</i>
	<b>6)</b> <i>(if (= kz 0)</i> <i>(begin</i> <i>(run-te)</i> <i>(run-tm)</i> ) <i>(run))</i>

- 1) En aquest pas es defineix el tipus de cel·la, concretament definim un cel·la de tipus hexagonal

- 2) Es defineixen els *k-points*, és a dir, els punts on el programa aplicarà les equacions de Maxwell, aquest punts s'escullen de manera que coincideixin amb els límits de la zona de Brillouin
- 3) En aquesta secció es defineixen diferents paràmetres de l'estructura: es fixa el valor de èpsilon a 3.8 (permitivitat relativa) i se li assigna el nom de "eps". També s'assigna al radi el paràmetre "r" amb valor de 0.38. Aquest valor es troba en unitats de "a" entenent "a" com el valor de la constant de cel·la
- 4) En aquest punt es defineixen el material i la geometria. En concret, es fixa un pla de material dielèctric amb permitivitat relativa "eps" i afegim forats cilíndrics d'aire de radi "r" amb una altura infinita doncs estem en el cas bidimensional i només interessa allò que passi al pla del material (x-y)
- 5) Definim el numero de bandes a computar i la resolució
- 6) Se li diu al programa que executi la simulació i quin tipus de simulació es vol fer, si pel modes longitudinals o transversals. En aquest cas, es computarien ambdós dos modes

### 2.6.2. Resultats

Un cop executada la simulació obtenim una sèrie de fitxers de sortida que inclou la informació sobre la constant dielèctrica, l'estructura de bandes, el camp elèctric i altres dades relatives a la interacció entre l'estructura periòdica triada i la radiació electromagnètica.

Entre la informació que s'obté podem destacar, d'una banda, la funció dielèctrica, la qual després d'una sèrie de correccions, ens permet generar una imatge de la estructura (figura 2.6a). D'altra banda, amb la informació sobre les diferents bandes de propagació podem representar-les respecte a l'índex dels *k-points* per generar així el corresponent diagrama de bandes tant pels modes TM com pels TE, (figura 2.6b) i observar si apareix un PBG i a quin rang freqüencial es troba situat.

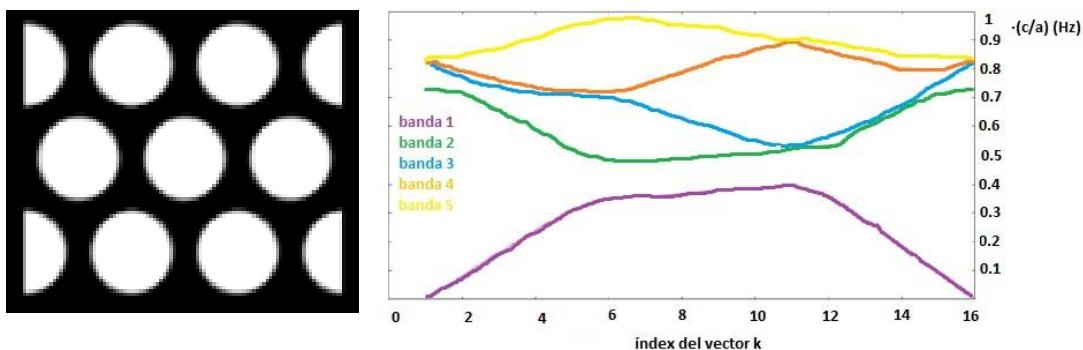


Figura 2.6: a) Representació de l'estructura que es simula, s'utilitza la funció h5topng, que aprofita la funció de la constant dielèctrica per generar la imatge. b) Diagrama de bandes de l'estructura simulada pels modes TE, a l'eix vertical es representa la freqüència i en l'eix horitzontal l'índex de K. Es pot observar un gap a  $(3.73 - 4.49) \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ .

A l'Annex 1 es dona més informació sobre el procés per dur a terme la simulació, és donen més detalls sobre els resultat obtinguts i es comparen amb els resultats de la simulació de l'article agafat referènciat per triar l'estructura.

### 3. Fabricació de les estructures

#### 3.1. Fonaments litografia i estratègia de fabricació

La litografia és una tècnica que, en els seus orígens a finals del S.XIII, consistia en fabricar una imatge en relleu sobre una pedra plana o una planxa de metall i fer servir una tinta per tal d'imprimir el motiu sobre altres superfícies. Des de la dècada dels 60 aquesta tècnica ha estat la més utilitzada per la impressió de textos escrits com llibres o diaris i s'han derivat tècniques especialitzades per alguns sectors com l'electrònica o els semiconductors. Avui en dia, la tècnica es continua utilitzant en la fabricació de tot tipus de textos impresos i en altre industries, però la digitalització dels textos ha comportat que la tècnica en general no creixi ni decreixi [19].

La fotolitografia és una tècnica contemporània derivada de la litografia que permet una major precisió, limitada per la longitud d'ona de la llum i fenòmens de difracció. Consisteix en dipositar sobre un substrat una capa de material sensible a la llum, la resina. Es fa servir una màscara per il·luminar selectivament la resina. Els motius de màscara determinaran esdevindran els motius definits sobre la resina. L'exposició de la resina pot o bé polimeritzar o bé trencar enllaços, en funció de si la resina és de tipus negatiu o positiu. Com a resultat la resina esdevé, respectivament, més o menys resistent al gravat amb solucions específiques (revelador) i és en el revelat que es materialitza el procés litogràfic. La fotolitografia és la tècnica predominant a la indústria dels semiconductors i el seu avanç ha estat un agent conductor (*driver*) de l'accelerada miniaturització i densificació de circuits integrats.

En aquest treball s'ha aplicat la tècnica de litografia per feix làser. Malgrat basar-se en l'ús de llum i, per tant, ser una tècnica de fotolitografia, la implementació de la litografia làser comparteix mètodes amb la litografia per feix d'electrons, *Electron Beam Lithography* (EBL). L'EBL és un mètode de litografia que fa servir un feix focalitzat d'electrons per exposar el motiu desitjat sobre una capa fina polimèrica [9]. La longitud d'ona del electrons i un diàmetre del feix en la escala de les unitats de nanòmetres, permet una resolució un o dos ordres superiors a la fotolitografia convencional, en el rang dels nanòmetres.

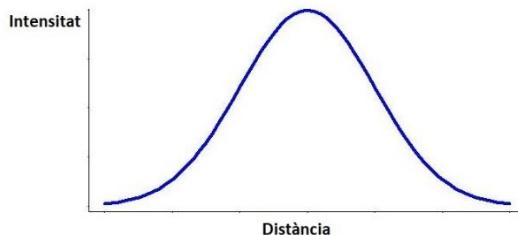
La **litografia làser** és una tècnica anàloga a l'EBL en tant que no utilitza una màscara, sinó que s'exposa píxel a píxel, i difereix en què s'utilitza un feix làser d'una determinada longitud d'ona (per exemple, 300 nm) en comptes d'un feix d'electrons de mitja-alta energia (típicament entre 10 i 100 keV). La resina haurà de ser sensible a la radiació de la longitud d'ona del làser i en general les mateixes resines emprades en fotolitografia es poden aplicar. Aquestes acostumen a ser més gruixudes (superiors a la micra) que les de EBL, que típicament són d'uns 100-500nm de gruix. Aquesta tècnica es pot aconseguir una resolució de l'ordre dels micròmetres, limitat pel diàmetre del feix i la longitud d'ona de la llum emprada [17].

El làser utilitzat té una longitud d'ona de 350 nm [26] i la resina utilitzada és de tipus positiva[22].

Per la fabricació de matrius de punts es basa en exposicions punt a punt. El feix làser no ha de seguir una trajectòria ni omplir àrees, sinó que ha d'exposar la resina aturant-se sobre un mateix punt un cert temps. La proximitat o densitat vindrà limitada pel radi finit dels punts resultants.

En aquest sentit, les dimensions mínimes dels punts que es poden aconseguir, inicialment hauria de correspondre al diàmetre del feix làser, però el perfil d'aquest no és estrictament binari. La

potència lliurada a la resina segueix més aviat un perfil gaussià com el que es mostra a la figura 3.1. Aquest aspecte s'ha de tenir en compte a l'hora de triar els diferents paràmetres de l'exposició com més endavant és comentarà i limita la resolució. En el cas d'aquest equip utilitzant el capçal més petit, d' $1 \mu\text{m}$ , la resolució hauria de ser d'aquest ordre.



*Figura 3.1: Representació gràfica de la distribució de Gauss.*

### 3.2. Descripció general de l'equip

L'equip utilitzat el és model Dilase 650 fabricat per l'empresa Kloe [26]. Un feix làser amb longitud d'ona en el rang de la radiació UV induceix el procés de polimerització o escissió de la fotoresina.

L'equip de litografia es composa per un hardware controlat amb el software DilaseSoft650. El hardware està format, d'una banda, pel làser i la seva òptica, i, d'altra banda, per la base (*stage*) on es posa la mostra. La base està dotada amb motors que permeten el seu moviment mentre que el làser es manté fixe. Mitjançant el software es controla tant el moviment de la base i, per tant de la mostra, com el subministrament del làser i altres paràmetres de l'exposició.

La fabricació de motius amb l'equip descrit consta de dos passos, generar els dissenys i convertir-los, amb el software *kloédesign*, a un format que el software *Dilasesoft650* reconegui. I seguidament s'han de fixar les condicions d'exposició que influiran en el resultat, potència, temps d'exposició, etc.

- ***Kloédesign***

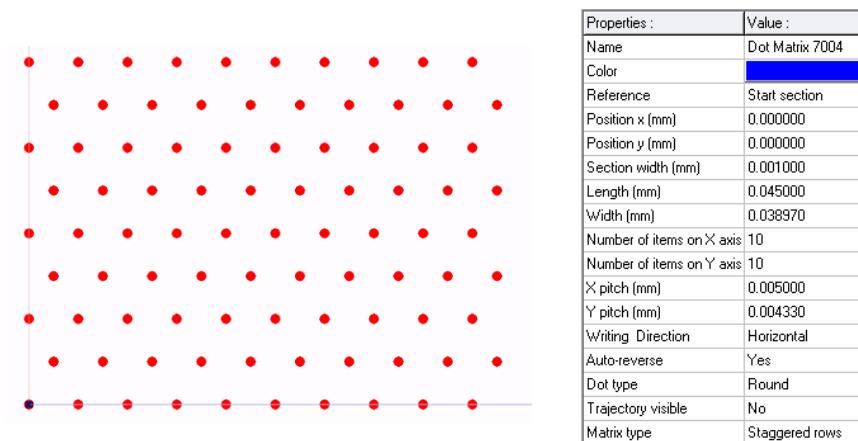
Aquest software permet importar arxius en format “*.gds*”, és a dir, ens permet importar dissenys fets amb altres softwares com per exemple *Glade* [23], que és un dels programaris en obert més utilitzats per a disseny de màscares.

De fet, el disseny de l'estructura periòdica es va fer inicialment fent servir el software *Glade*, però a l'hora de fer la importació de l'arxiu de disseny sorgien problemes relacionats, segurament amb la quantitat de punts i ser de dimensió molt reduïda. La gran majoria de programes tracten totes les figures amb mida finita com polígons, una circumferència per tant és un polígon regular amb un numero elevats de costats. Al fer aquestes circumferències molt petites i al haver-hi una gran quantitat, el número de polígons és molt gran i comporta un cost computacional alt o és incompatible.

Com a alternativa es va utilitzar directament el software *KloeDesign* per generar les matrius de punts (*dots*). Aquest programa posseeix entre altres opcions, una funció anomenada “*dot-*

"matrix" que permet crear directament matrius d'elements. Aquesta funció genera una matriu de la que podem escollir diferents paràmetres, tals com el número de files i columnes, el període tant en el eix X com en el eix Y, així com la mida nominal i la disposició dels motius que componen la matriu, e.g. si volem que les fileres parelles estiguin transposades o no.

D'aquesta manera si utilitzem les coordenades relatives descrites a l'apartat del disseny (2.4) per fixar els períodes tant horitzontal com vertical i transposem les fileres parelles, aconseguim una matriu amb cel·la hexagonal amb constant de cel·la "a". A l'apartat de disseny (2.4.1) es comenta que la relació entre el radi dels punts i la constant de cel·la ha de ser  $r=0.38a$ . Per poder aplicar aquesta condició i fixar el període adequat és necessari saber quins seran els radis finals dels punts, com que a priori és desconeix quines seran les dimensions reals dels *dots*, és decideix decidir el període amb separació en excés per evitar solapament. Un cop es determini la mínima resolució dels *dots*, s'ajustarà en base a aquesta condició.



**Figura 3.2:** a) Captura del disseny un cop implementat al software Kloedesign: és pot observar com els motius tenen una forma circular i estan disposats de manera que formen una cel·la hexagonal. b) Captura dels paràmetres que controlen la funció "dot-matrix": "X pitch" i "Y pitch" són respectivament el període horitzontal i vertical de l'estructura, podem escollir el numero de columnes i files, el diàmetre, la forma dels motius, o si volem que les fileres estiguin esglaonades.

Per assegurar que els punts tinguin les mínimes dimensions possibles (nominalment 1 micròmetre o superior), fixem la mida dels motius a la més petita possible (0.0000001 nm) i a més requerim que els motius tinguin un perfil circular.

Un cop tenim el nostre disseny es poden aplicar diverses estratègies per preparar l'exposició, com veure la trajectòria d'escriptura del làser i modificar-la, triar quines formes o figures seran només contorn o quines hauran de ser tractades com àrees. En el nostre cas els dissenys estan formats únicament per punts, de dimensions mínimes. Això vol dir que el làser no ha de dibuixar cap forma ni omplir cap àrea sinó que ha d'efectuar exposicions puntuals sobre el substrat de forma que els punts o *dots* resultants estaran molt determinats/limitats pel perfil del feix de llum làser, així com altres efectes com la seva interacció amb la resina, per exemple.

Per poder accedir als dissenys amb el *Dilasesoft650* és necessari, un cop acabada la preparació de l'arxiu de disseny, exportar-lo en format ".lwo", ja que és l'únic que pot ser reconegut pel software de litografia.

- **Dilasesoft650.**

Aquest software és l'encarregat de controlar l'aplicació del feix làser i coordinar-lo amb el moviment de l'*stage*. Un cop importats els dissenys en format “*.lwo*” hem de fixar els diferents paràmetres per fer l'exposició, els quals determinen el resultat final. Un cop els paràmetres i els dissenys estan fixats podem començar l'exposició. El temps que trigarà a executar-se la litografia també dependrà del disseny i els paràmetres i a vegades és optimitzable.

El mode de treball utilitzat en aquest cas, l'anomenat *Dot-Matrix*, presenta una paràmetres característics, que poden diferir en altres modes de treball com el temps d'exposició. En qualsevol cas, els paràmetres més importants són els següents:

- **Focus (Height)**

Aquest paràmetre ens serveix per triar la altura o el pla on volen que es doni l'exposició, està per tant relacionat amb l'eix Z i el valor dependrà del gruix del substrat i de la resina. Idealment aquest pla se situa a la superfície de la resina, per optimitzar el focus, i per a fer-ho s'ha d'enfocar manualment amb el microscopi òptic integrat. Experimentalment es troba que un cop la superfície està enfocada hem d'anotar el valor que es mostra a la pantalla i sumar-li un valor de correcció en funció del capçal triat (-0.105 mm pel capçal de 1  $\mu\text{m}$  i 0.075 mm pel de 10  $\mu\text{m}$ ). Aquests son els valor típic amb Si com a substrat i un gruix de resina de 1,5 micròmetres.

- **Velocitat / Velocitat de reposicionament**

El paràmetre velocitat correspon al moviment en els eixos X i Y de la base o stage sobre la que se situa la mostra, en unitats de mm/s. La velocitat de reposicionament controla el moviment del stage durant el reposicionament entre dues trajectòries diferents, també en unitat de mm/s.

- **Modulació**

El paràmetre modulació és l'aplicació d'un factor, s'expressa en % i per tant pot prendre valors entre 0 i 100. Aquest paràmetre ens permet controlar la potència subministrada pel làser en el moment de l'exposició, una modulació 100 significa que s'aplica el total de la potència disponible per a cada capçal. En el cas d'aquest treball pel capçal petit s'han utilitzat valors de tot el rang, mentre que pel capçal de 10  $\mu\text{m}$  no s'han agafat modulacions més grans de 50, típicament 50 i 25.

- **Temps d'exposició**

El temps d'exposició és un paràmetre característic del mode de treball “*dot-matrix*”. Serveix per indicar el temps que volem que duri cadascuna de les exposicions puntuals, és a dir, quanta estona ha d'estar exposant cada punt. S'expressa en segons i té com a valor mínim 0.02ms.

Els dos últims paràmetres comentats (temps d'exposició i modulació) es poden englobar per analogia amb l'EBL en el concepte de dosi. Un dels objectius d'aquest treball és determinar la dosi adequada per a cada estructura.

A més de fixar les condicions de l'exposició es trien les coordenades sobre la mostra on es vol exposar cada motiu. Aquestes coordenades són relatives a un origen que prèviament s'han fixat convenientment, en el nostre cas situat al centre de la mostra.

### 3.3. Treball en un entorn de sala blanca

En aquest apartat es descriurà, d'una banda, les instal·lacions on s'han fabricat les estructures i, d'altra banda, el procés que s'ha seguit.

#### 3.3.1. Descripció de la sala blanca

En general, una sala blanca és un espai o ambient dotat amb un sistema especial de control ambiental. Es caracteritza per tenir baixos nivells de contaminants i partícules tals com partícules d'aerosol, vapors químics o microbis aerotransportats.

El funcionament d'aquests espais es basa en un flux laminar d'aire de sostre a terra i a la presència de filtres HEPA\* (*Hight Efficiency Particulate Air*) que restringeixen la presència de partícules de 3 micròmetres o més. La gent autoritzada a entrar ha d'utilitzar la vestimenta reglamentària, determinada segons el tipus i classificació de la Sala Blanca. La idea és evitar contaminar l'ambient, i concretament en el nostre cas les mostres processades, amb partícules i materials provinents dels tèxtils o humans.

Les sales blanques estan presents a pràcticament totes les indústries on la presencia de petites partícules contaminants, pugui afectar negativament els processos que s'hi desenvolupen o contaminar els materials processats. Alguns exemples d'aquest tipus d'indústria seria la de fabricació de semiconductors, biotecnològica, biosanitària, farmacèutica o la aeroespacial entre d'altres.

Les sales blanques es classifiquen segons el número de partícules d'una determinada mida que poden haver per metre cúbic [21]. La contaminació típica d'una ciutat és de 35.000 partícules, de més de 0,5 micròmetres de diàmetre per metre cúbic. Segons la classificació ISO una ciutat equivaldria al nivell ISO 9.

La Sala Blanca on s'han fabricat les estructures es troba a l'interior del IMB-CNM-CSIC [30] posseeix una qualificació ISO 5-7 el que significa que com a màxim poden haver  $10^{5-7}$  partícules de 0.1 micròmetres o més de diàmetre.

A l'Annex 2 es proporciona més informació sobre la classificació ISO i la Sala Blanca on s'ha treballat.

#### 3.3.2. Procés de Litografia

A continuació, es llisten els procediments executats a la sala blanca per a la fabricació de les estructures, acompanyat d'algunes fotografies.

- 1) Deshidratació del substrat en una placa calefactora (*hot-plate*) durant 10 minuts a 100 graus, d'aquesta manera assegurem evaporar les restes que puguin quedar d'aigua/humitat o isopropanol (figura 3.3b).
- 2) Dipositar HMDS (Bis(trimethylsilyl)amine) [24] per millorar la adherència de la resina (figura 3.3a).

- 3) Situar la mostra sobre el capçal (chuck) del *spinner* i dipositar suficient quantitat de resina (HIPR 6512) per a que la mostra estigui totalment recoberta. Posar en marxa el *spinner*, en el nostre cas, amb el programa número 7 (3000 rpm, amb el s'obté un gruix aproximat d'1,4 µm) (figura 3.3c)
- 4) *Soft-bake*: tractament tèrmic en *hot-plate* a 80 graus durant 2.5 min.
- 5) Exposició de la mostra amb el *laser writer*, definició dels motius latents en resina (figura 3.3d).
  - Situar la mostra amb cura i el màxim de centrada possible en el buit, fer el buit, tancar la cambra.
  - Ajustar la posició vertical (eix Z). Acostuma a estar entorn els -2.06mm per a xips de Si d'oblies estàndard i la resina descrita (i.e. variarà segons el gruix de la mostra i de la resina depositada)
  - Aplicar el factor de correcció (0.075mm pel capçal de 10 micròmetres i -0.105mm pel capçal de 1 micròmetre)
  - Buscar el centre del xip i establir en aquesta posició el punt (0,0), l'origen de coordenades de referència
  - Definir la velocitat de reposicionament (es recomana entre 0.1 i 1 mm/s)
  - Importar el disseny a exposar i definir la resta de paràmetres (coordenades de les diferents exposicions, velocitat, modulació, temps, etc), que es poden recollir en un arxiu anomenat, *positionlist*.
  - Executar l'exposició.
- 6) *Post exposure bake*: tractament tèrmic en *hot-plate* 2 min a 80 graus





**Figura 3.3:** Imatges del procés e fabricació: **a)** Maquina de primer, diposita HDMS. **b)** Hot plate,, superfície metàl·lica que s'escalfa a la temperatura escollida. **c)** Spinner, instrument que gira sobre si mateix seguent una recepta prèviament triada. **d)** Equip Kloe650, làser de litografia.

**7)** Revelat de la mostra (figura 3.4).

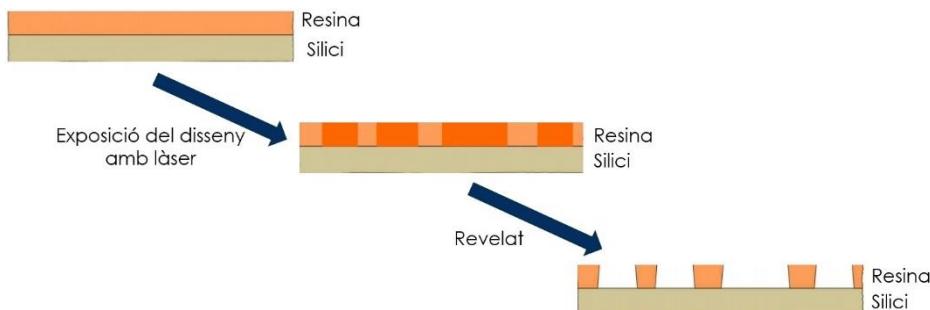
- Encendre flux laminar i llum del banc químic, posar-se guants antiàcids i ulleres de protecció.
- Preparar en un got de precipitats la quantitat de revelador (OPD 4662) suficient, com per poder submergir totalment la mostra. Obrir la clau de cascada d'aigua.
- Submergir en el revelador, movent suavament la mostra, durant 30-45 segons. Esbandir durant 15 segons en aigua en la cascada i per acabar 15 segons més en aigua sense agitació.
- Assecar la mostra amb la pistola de nitrogen.



**Figura 3.4:** Revelat de la mostra al banc químic, s'utilitzen guants especials com a mesura de prevenció

- 8)** En aquest punt es pot procedir a l'observació al microscopi òptic per tal de veure quin ha estat el resultat dels motius exposats .
- 9)** En alguns casos es pot fer un *Hard Bake* (e.g. 4 minuts a 80 graus) per tal d'endurir la resina, si per exemple es vol aplicar un tractament de gravat subseqüentment.

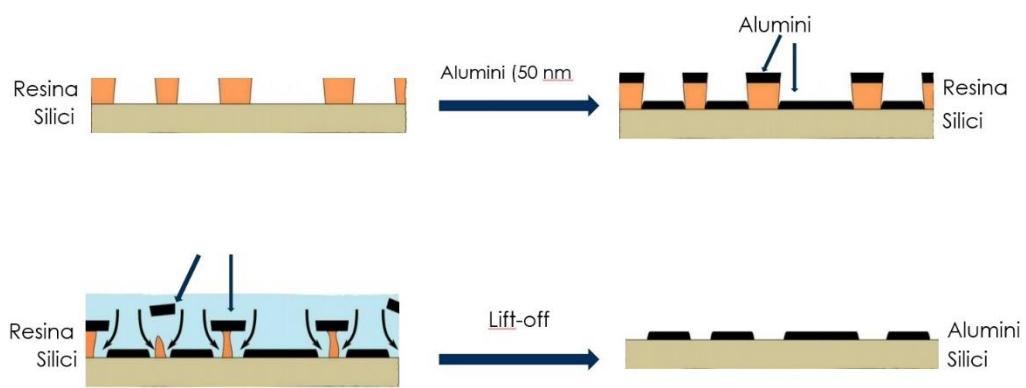
La figura 3.5 mostra un resum del procés de fabricació, on podem anar veient com evoluciona el perfil de la mostra.



**Figura 3.5:** Perfil de la mostra durant el procés de fabricació. En primer lloc s'observa el substrat de silici amb la resina a sobre, en segon lloc la resina ha estat exposada pel làser i les zones que han rebut radiació apareixen de color fosc i l'última imatge mostra el resultat final després dels revelats, les zones fosques són eliminades..

### 3.3.3. Processos posteriors a la litografia

Un cop s'ha fet el revelat de la mostra, ja podem observar i caracteritzar els resultats amb microscòpia òptica o altres. Si ens interessa transferir l'estructura podem, entre altres coses, efectuar una metal·lització. Aquest procés té com a objectiu produir la mateixa estructura litografiada, complementària, i amb metall en comptes de resina. És a dir, si després del revelat el que tenim és una matriu de forats cilíndrics de resina sobre silici, després de la metal·lització el que obtenim és una estructura de cercles (punts) amb una certa alçada (depèn del gruix aplicat en el procés de metal·lització) de metall sobre el Silici. A la figura 3.6 es pot veure un esquema del perfil de la mostra en aquest procés. A l'annex 3 s'inclou un report complet sobre una fabricació amb posterior metal·lització on és donen més detalls sobre aquest procés.



**Figura 3.6:** Perfil de la mostra durant el procés de metal·lització. En primer lloc es veu la mostra després del revelat, després es diposita el metall, en aquest cas alumini, i finalment s'eliminen les restes de resina quedant així únicament el substrat (Si) i el metall (Al).

## 4. Resultats i caracterització de les estructures

En aquest capítol s'exposaran i comentaran els resultats que s'han obtingut en la fabricació de les estructures. Les imatges que es mostraran han estat obtingudes principalment amb un equip de microscòpia òptica dotat amb una videocàmera i un software que permeten registrar i processar les imatges. També es mostren altres imatges obtingudes amb microscòpia electrònica de rastreig (de l'anglès *scanning electron microscope*, SEM) [15]. A l'annex 4 es dóna més informació sobre el microscopi SEM i la tècnica.

En primer lloc, s'explicarà com es va arribar a l'optimització dels principals paràmetres d'exposició amb *laser writer*, els quals han estat descrits a l'apartat 3.2, i les característiques de les estructures obtingudes per a cada cas. En segon lloc, s'avaluaran les condicions optimitzades fent servir diferents substrats i, en últim lloc, es comentaran els resultats aplicats a una geometria de cel·la diferent i introduint variacions al disseny original, en línia amb la idea de generar defectes en l'estructura dels PhCys.

### 4.1. Optimització paràmetres de fabricació

No existeixen precedents de fabricació d'aquest tipus d'estructures (matrius de punts) a l'IMB-CNM-CSIC fent servir l'equip de litografia làser. Es per aquest motiu que s'haurà de començar de zero a determinar els diferents paràmetres de la litografia i per tal d'obtenir les matrius de punts desitjades. Com veurem, els dos objectius principals de l'optimització són que els punts definits siguin perfectament circulars i el més petits possibles, comptant amb que el revelat doni resultats reproduïbles i robusts.

La fabricació de les estructures s'ha dividit en dues accions: una etapa en la que es treballa amb el capçal de 1 micròmetre per tal d'establir la mínima mida dels motius, i.e. màxima resolució possible, i una segona etapa treballant amb el capçal de 10 micròmetres.

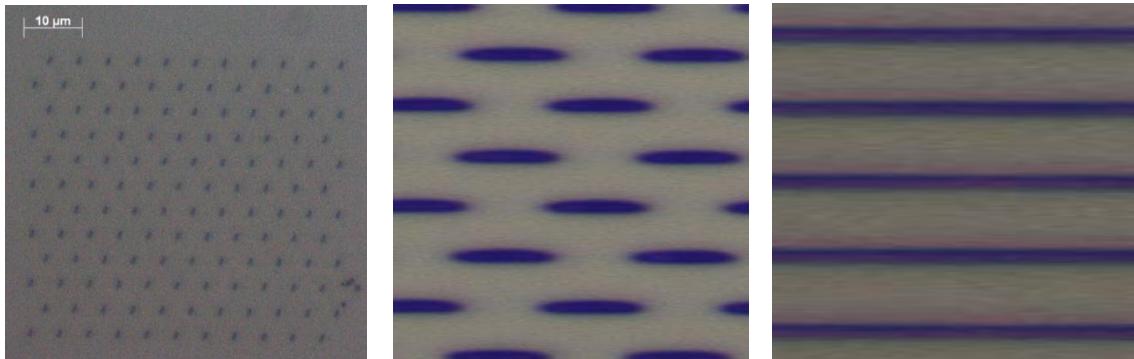
Els resultats que es mostraran a continuació és una tria dels experiments realitzats, són aquells que es consideren més significatius o han comportat l'aplicació de canvis importants en el disseny o en el valor d'alguns dels paràmetres. A l'Annex 3 es troben els reports complerts d'algunes les exposicions realitzades durant aquest projecte.

#### Capçal de 1 micròmetre

En aquesta primera fase de la fabricació, amb el capçal més petit, s'han dissenyat diferents exposicions a mode de test per provar diferents valors de velocitat, modulació i temps d'exposició. A continuació, es resumirà la influència que s'ha observat dels diferents paràmetres sobre la mostra un cop revelada i quins són els valors òptims. Per norma, es treballa amb dissenys de 5 micròmetres de període, si no s'indica el contrari.

- **Optimització velocitat**

La velocitat com ja s'ha comentat controla el moviment de la base, pot prendre un valor mínim i màxim de 0.1 mm/s i 10 mm/s respectivament. Conseqüentment, la duració de les exposicions es veu fortament determinada per la velocitat.



**Figura 3.7:** Motius fabricats coma a test per la velocitat. **a)** Velocitat=0.1 mm/s, modulació=40, temps d'exposició 0.823ms. **b)** Velocitat=1 mm/s, modulació=20, temps d'exposició 0.03ms. **c)** Velocitat=3 mm/s, modulació=40, temps d'exposició 0.823ms

S'ha pogut observar que una velocitat inadequada pot distorsionar la forma dels motius en la mateixa direcció en la que és mou la base. A la figura 3.7a-c es poden veure diferents mostres amb diferents valors de velocitat i una dosi similar, on la distorsió és clara.

En un principi caldria esperar que la velocitat fos un paràmetre que no afectés a la forma dels punts, doncs en aquest mode de treball, el làser només s'encén estan aturat per efectuar exposicions puntuals. S'ha arribat a la conclusió que aquesta distorsió és deguda a la entrega de potència del làser. Com s'ha comentat a l'apartat 3, el làser tot i que té dos estats, encès i apagat, la intensitat de la radiació que arriba no es uniforme sinó que segueix un perfil gaussià (figura 3.1), podríem dir, per tant que el làser triga un cert temps en encendre's i apagar-se. Aquest fet és determinat doncs quan el temps d'exposició de cada punt acaba, la base avança amb la velocitat fixada a la següent posició mentre el làser s'està apagant. Això explica perquè els motius no s'observen com a exposicions puntuals sinó que segueixen una trajectòria. En el cas amb màxima velocitat (figura 3.7d) podem observar com els motius arriben a solapar-se. D'altra banda el cas amb mínima velocitat (figura 3.7a), els punts si que apareixen com exposicions puntuals. Per aquest motiu el valor òptim triat per la velocitat és el mínim, 0,1 mm/s. La velocitat de repositionament també es fixa amb aquest valor.

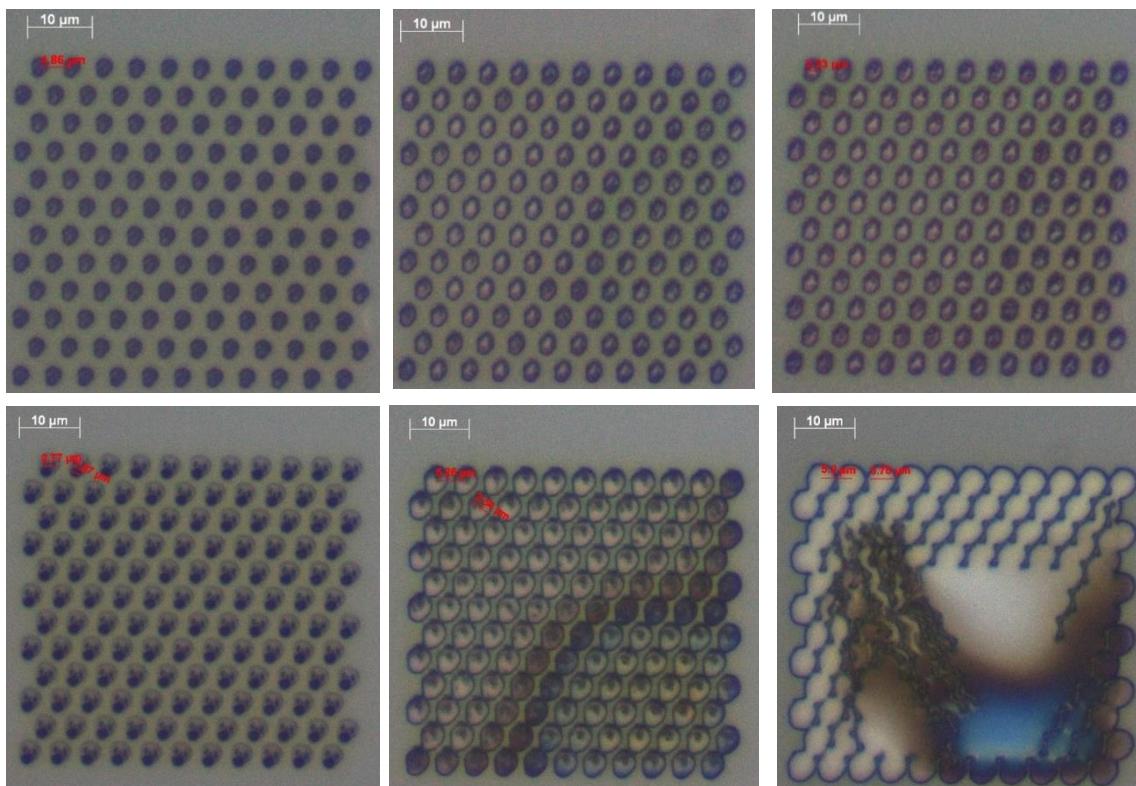
- **Optimització de la dosi (Modulació + Temps d'exposició)**

Com ja s'ha comentat en apartats anteriors la modulació i el temps d'exposició són paràmetres determinants en com la radiació interactua amb la resina, expressen, d'una banda la potència del feix que es liu i, d'altra banda, el temps que se subministra aquesta potència en cada punt.

Per optimitzar aquests dos paràmetres primer és necessari entendre la seva influència sobre el resultat final. La qualitat de les estructures després del revelat està directament relacionada amb com ha estat la interacció entre la resina i la radiació. D'una banda, si la interacció entre la resina i la radiació és insuficient, és possible que la radiació no exposi totalment la resina o no arribi al substrat de manera que al fer el revelat les estructures no queden ben definides o no

apareguin, ens troben en un cas de infraexposició. D'altra banda, si la radiació és excessiva pot provocar que no només s'exposin els punts triats sinó que les zones del voltant també s'exposin augmentat així la mida dels punts o sobreescalfant la resina, aquest cas es denomina sobreexposició.

A continuació es mostren els resultats de diferents fabricacions on ja s'ha fixat una velocitat mínima de 0.1 mm/s (figura 3.8), en primer lloc (figura 3.8a-c) es mostren exposicions on s'ha mantingut el temps d'exposició constant i s'ha anat augmentant la modulació. I en segon lloc es manté constant la modulació i s'augmenta el temps d'exposició (figura 3.8d-f).

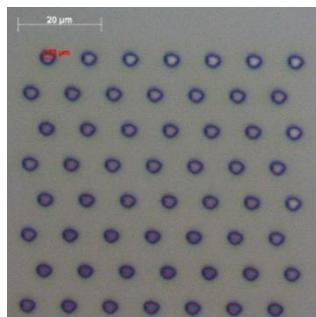


**Figura 3.8:** Fabricacions per provar diferents DOSIs, els punts tenen una mida aproximada compresa entre 3.5 i 5.5  $\mu\text{m}$ . **a)** Velocitat=0.1 mm/s, modulació=70, temps d'exposició=3ms. **b)** Velocitat=0.1 mm/s, modulació=80, temps d'exposició=3ms. **c)** Velocitat=0.1 mm/s, modulació=100, temps d'exposició=3ms. **d)** Velocitat=0.1mm/s, modulació=100, temps d'exposició=1ms. **e)** Velocitat=0.1 mm/s, modulació=100, temps d'exposició=4ms. **f)** Velocitat=0.1 mm/s, modulació=100, temps d'exposició=10ms.

Si observem les figures anteriors podem extreure diferents conclusions. Es pot observar que en ambdós casos al augmentar la dosi, ja sigui augmentant el temps o la modulació, augmenta la mida dels punts i com més grans són, més s'aproximen a una forma perfectament circular. En la figura 3.8a i 3.8b el color liliós dels motius després del revelat ens indica que no estem veiem el substrat i que, per tant, no ha exposat prou, així que estem davant d'un cas de infra-exposició. En canvi a la figura 3.8e el contrast blanquinós d'alguns punts ens indica que la radiació ha penetrat fins al substrat i que la exposició s'ha efectuat de forma correcte, tot i que la forma continua sense ser circular. Per acabar si observem l'última figura 3.8f es pot veure que, tot hi que estan correctament revelats, com els punts han crescut massa de mida se solapen, estem en un cas de certa sobreexposició. El diàmetre dels punts està comprès entre 2 i 3.5  $\mu\text{m}$ .

Si ens fixem en la última exposició, el cas de sobre-exposició, veiem que la forma dels punts es prou circular comparada amb la resta de fabricacions així que es torna a realitzar la mateixa

fabricació, mantenint els mateixos paràmetres, però en aquest cas utilitzem un disseny amb 10 micròmetres de període per evitar el solapament i observar els punts individualment.



**Figura 3.9:** Fabricació estructura amb període de 10 micròmetres per evitar solapament, el diàmetre dels punts és aproximadament 5.8  $\mu\text{m}$ . Velocitat=0.1 mm/s, modulació=100, temps=10ms

Aquesta ultima fabricació és la que més s'aproxima al disseny original/desitjat, utilitzant el capçal de 1 micròmetre. El color blanquinós ens indica que la eposició ha estat definida correctament i que la mostra ha estat ben revelada. El diàmetre dels punts és casi 1 micròmetre inferior respecte al cas amb període de 5 micròmetres (figura 3.9).

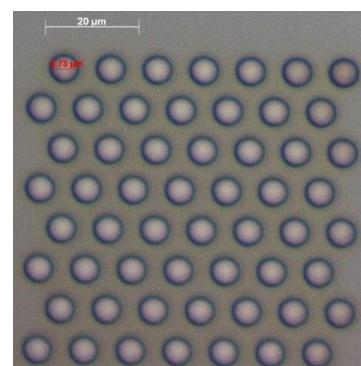
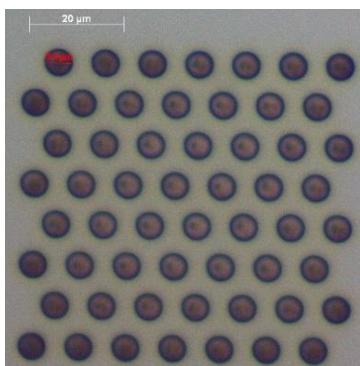
Podem observar en general per totes les fabricacions que la mida varia molt amb la dosi i que a més es veu influenciada per la proximitat entre punts, és a dir, pel període. També es pot concloure que com més grans siguin els punts més s'aproximen a un perfil circular.

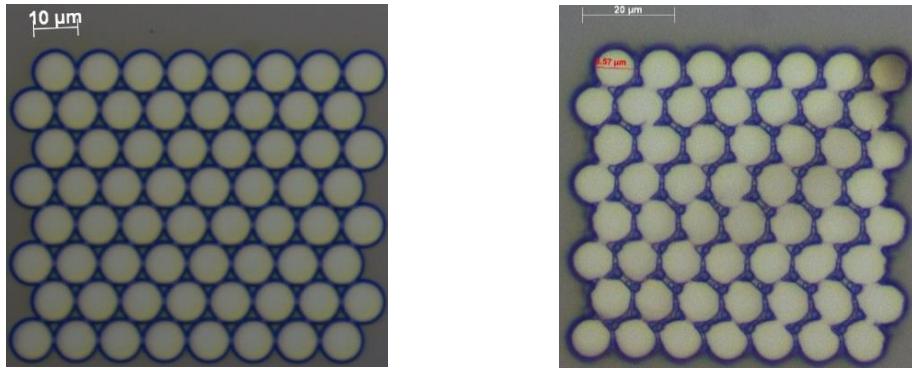
La forma irregular dels punts dificulta establir una mesura pels diàmetres i per aquest motiu la mida d'aquests es tracta de forma qualitativa. En el cas següent, si es tractarà quantitativament la mida dels motius.

### Capçal de 10 micròmetres

Un cop familiaritzat amb la tècnica i que s'han optimitzat els paràmetres de fabricació amb el capçal de 1 micra, es repeteix el procés per trobar la dosi correcte amb al capçal de 10 micròmetres. La velocitat és manté a 0.1 mm/s.

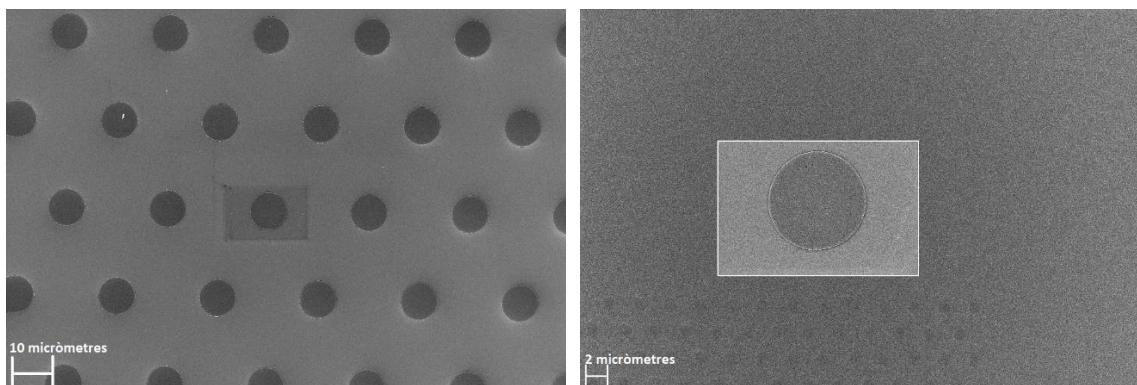
En aquest cas l'augment de mida del capçal implica que la mida dels punts també serà més gran això comporta d'una banda que s'utilitzaran dissenys per començar amb període de 10 micròmetres per, també, establir limitacions per solapament. Es realitzaran fabricacions per optimitzar novament la dosi i, si cal, intentar millorar la forma dels motius.





**Figura 3.10:** Resultats de la fabricació amb el capçal de 10 micròmetres. **a)** Velocitat=0.1mm/s, modulació=50, temps=0.03ms, diàmetre=5.6μm. **b)** Velocitat=0.1mm/s, modulació=50, temps=0.1ms, diàmetre=5.73μm **c)** Velocitat=0.1 mm/s, modulació=50, temps=0.4ms, diàmetre=8.06μm. **d)** Velocitat=0.1mm/s, modulació=50, temps=1ms, diàmetre=8.55μm.

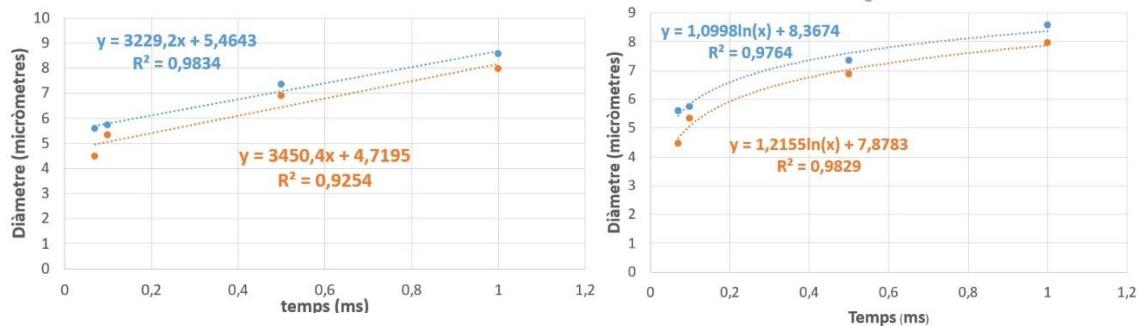
A la figura 3.10a-d, es mostra el resultat de 4 matrius en funció del temps d'exposició mentre que es manté la modulació constant. Com es pot veure a les imatges, la forma dels punts és molt més circular i la mida d'aquests augmenta amb la dosi. Es pot observar, igual que amb el capçal de 1 micròmetre, casos de infraexposició (figura 3.10a) i sobreexposició (figura 3.10d). La matriu de la figura 3.10b és la que mostra els millors resultats.



**Figura 3.11:** Imatges obtingudes amb SEM d'una matriu de punts amb cel·la hexagonal i període de 25 μm; s'utilitza el detector d'electrons secundaris, voltatge de 5KV i distància de treball de 3.8 mm. **a)**  $x2.17 \cdot 10^3$  augment. **b)**  $x5.69 \cdot 10^3$  augment

A la figura 3.11 es mostra el resultat d'una fabricació fent servir els mateixos paràmetres que a la figura 3.11c però amb un període de 25 μm. La imatge amb menys augment (figura 3.11a) és molt similar a l'obtinguda amb microscòpia òptica, la qual cosa permet confirmar els resultats de la fabricació. La imatge amb més augment (figura 3.11b) mostra el detall de un punt individual de la mateixa fabricació, es pot corroborar que el contorn dels punts s'aproxima molt bé el perímetre d'una circumferència, tal i com es veia a les imatges òptiques.

La forma perfectament circular dels dots permet fer anàlisi automatitzat dels diàmetres. I poder així fer un anàlisis quantitatiu sobre la variació de la mida dels punts respecte la dosi. Com que la dosi està influenciada pel temps d'exposició i la modulació, es fabriquen estructures amb 4 valors diferents pel temps d'exposició entre 0.07 ms i 1 ms i amb dos valors de modulació (25 i 50) per a cada temps. Per a cada fabricació es calcula el diàmetre mig dels punts amb el software *ImageJ* [25]. En base al resultats, s'elabora un gràfic on es representa la mitjana del diàmetre mig per a cada fabricació en funció del temps d'exposició utilitzat (figura 3.12).



**Figura 3.12:** Representació del diàmetre dels punts respecte el temps d'exposició per a dos valors de modulació.  
**a)**Ajust lineal amb valor de  $R^2=0.9834$ . **b)**Ajust logarítmic amb valor de  $R^2=0.9764$

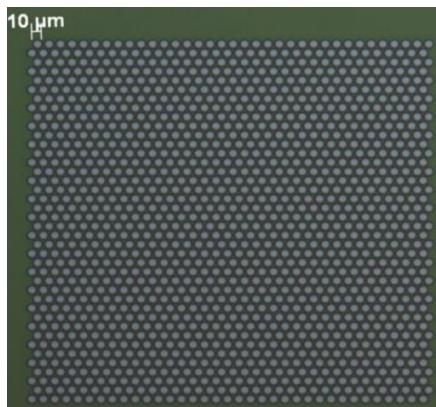
La línia de color taronja representa l'ajust per al cas amb modulació 25 i la blava amb modulació 50. Podem confirmar les observacions prèvies, la mida dels punts augmenta amb el temps d'exposició i el cas amb modulació més alta presenta sempre un diàmetre major a igual temps d'exposició. S'han afegit dues línies de tendència diferents amb les respectives equacions, a la figura 3.12a s'aproxima fent servir una regressió lineal i a la figura 3.12b s'utilitza una regressió logarítmica. El valor de  $R^2$  ens dóna una idea de com d'acurada és la regressió, com més proper a 1 més precisa és la regressió. Si comparem les dues regressions seguint aquest criteri, l'aproximació o ajust lineal s'ajusta més al comportament observat pel cas de modulació 50 mentre que per modulació 25 és al contrari..

A la taula següent es recullen els paràmetres que millors resultats han donat per cada un dels capçals utilitzats.

Capçal (micròmetres)	Velocitat (mm/s)	Modulació	Temps d'exposició (ms)	Diàmetre ( $\mu\text{m}$ )
1	0.1	100	10	-
10		50	0.4	9.07
10		25	0.1	9.20

**Taula 1:** Paràmetres per diferents fabricacions amb el corresponent diàmetre del dot

Anteriorment s'ha comentat que la relació entre el radi i el període ( $r=0.38a$ ) no s'aplicaria durant l'optimització dels paràmetres, sinó que el període es tria segons calgui per evitar el solapament dels punts. Un cop els paràmetres estan correctament optimitzats i coneixem el diàmetre dels punts per a cada dosi, podem dissenyar una estructura on s'ajusti el període per tal de complir la relació ( $r=0.38a$ ). Concretament s'apliquen els paràmetres òptims pel capçal de 10  $\mu\text{m}$  i modulació 50.



**Figura 3.13:** Matriu fabricada seguint la relació  $r=0.38a$  entre el radi i el període. Els paràmetres utilitzats són: velocitat=0.1mm/s, modulació=50, temps d'exposició=0.4ms, període de 12.105 micròmetres i diàmetre de 9.20 micròmetres

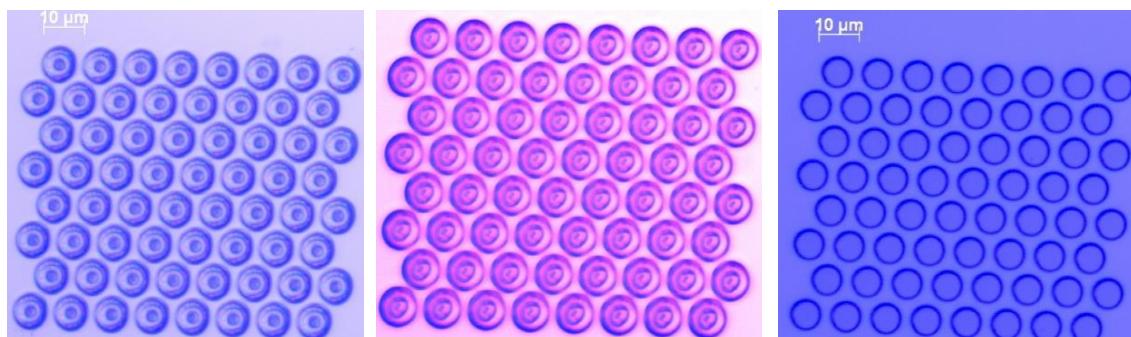
Aquesta última figura representa la fabricació ideal de l'estructura. D'una banda els motius presenten la forma que es buscava, l'estructura replica la cel·la hexagonal i és manté la relació entre el radi i el període.

#### 4.2. Estructures amb diferents substrats, Metal·lització i Transflex

A l'apartat anterior s'ha descrit com s'han obtingut els valors òptims de fabricació per les estructures proposades sempre amb silici com a substrat. En aquest apartat es tractarà la fabricació dels dissenys sobre substrats diferents: capa fina d'or sobre silici, pírex i capa de poliimida sobre Si.

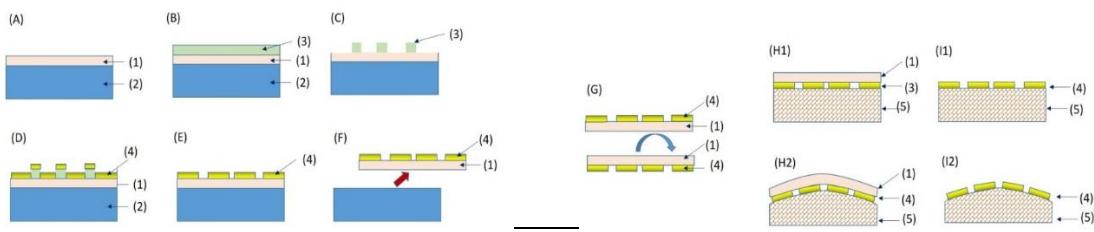
Per comprovar com el substrat afecta al resultat final de la exposició, per exemple, per efectes de reflexió de la llum, es trien uns mateixos paràmetres per l'exposició dels tres casos. Si són totalment independents del substrat les estructures resultants haurien de ser exactament iguals per als tres substrats.

A la figura 3.14 es mostren els resultats d'aquest test, a primera vista es veu que els motius sobre silici i or (figura 3.14 a i b) no estan igual de ben exposats que en el cas del pírex (figura 3.14c), tot i que les diferències no són molt grans, ajustant una mica la dosi aconseguiríem els mateixos resultats per tots els substrats. Es pot concloure, per tant, que el tipus de substrat sí influeix sobre la dosi que cal aplicar.



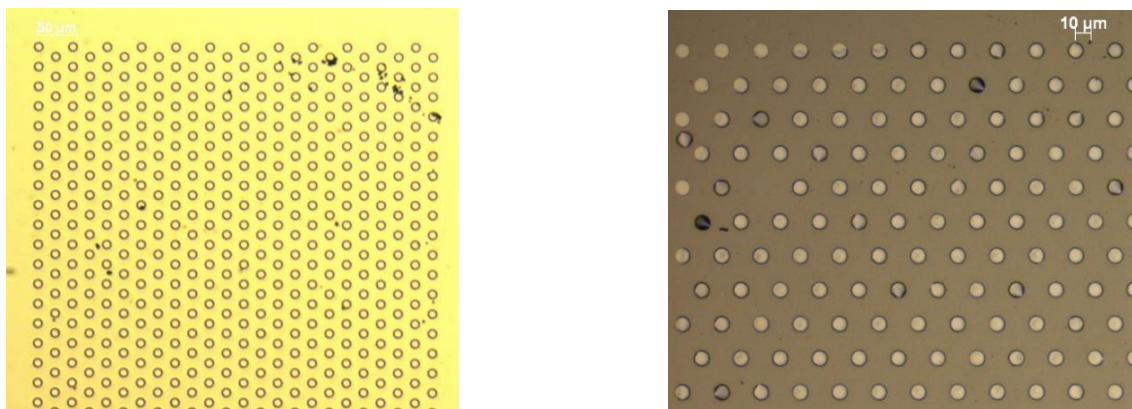
**Figura 3.14:** Resultat de la fabricació d'un determinat disseny sobre diferents materials, s'utilitzen els mateixos paràmetres per les 3 exposicions. Velocitat=0.1mm/s, modulació=50, temps=. **a)** Silici. **b)** Or. **c)** Pírex.

El cas amb silici amb poliimida és un cas especial on la idea és aplicar un nou mètode desenvolupat a l'IMB i patentat<sup>5</sup>.



**Figura 3.15:** Esquema del procés de fabricació amb poliamida. (1) Poliamida, (2) Substrat, (3) Resina, (4) Metall (5) substrat final. En primer lloc es segueix un procés litogràfic normal sobre el substrat amb poliamida (A-C). Després del revelat es realitza una metal-lització i un lift off (D-E) quedant així les estructures metàl·liques sobre la capa de poliamida que es separa del primer substrat per ser enganxada al substrat final, la poliamida s'elimina amb oxigen ionitzat (F-I).

Els paràmetres d'exposició utilitzats són els mateixos que pel cas del silici un cop optimitzats. El resultat de la fabricació just després del revelat és igual que en el cas del silici (figura 3.16a). Després de transferir el patró a un substrat d'acer polit fent servir aquesta tècnica, els resultats són els de la figura 3.16b. A l'Annex 3 es pot trobar un report sobre una fabricació on es fa servir aquesta tècnica i es detalla el procediment seguit.

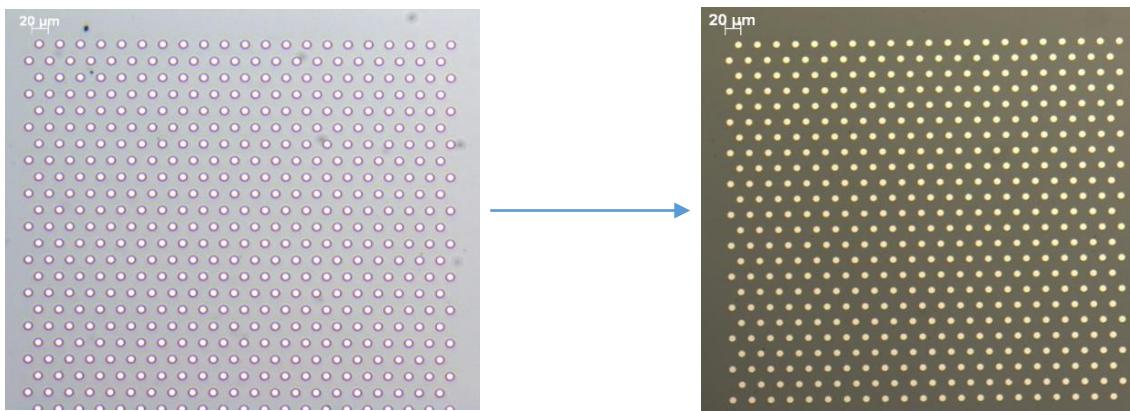


**Figura 3.16:** a) Resultat de la fabricació sobre Si amb una capa de poliamida a sobre. Velocitat 0.1 mm/s, modulació=50, temps=4ms. b) Matriu de punts transferida a un substrat d'acer polit fent servir plasma d'oxigen per eliminar la poliamida.

#### Transferència de patrons. Metalització + lift off de la resina

De fet, en la fabricació s'ha aplicat el mètode de metal-lització més lift off de la resina comentat anteriorment i que es mostra amb més detall a l'annex 3. A la figura 3.17 es mostra el resultat d'una fabricació després del revelat i abans de la metal-lització i lift off de la resina. Després de la metal-lització el que observem és el substrat de silici sobre el qual s'observen els motius d'alumini de forma circular i de 50 nm d'altura (gruix del metall).

<sup>5</sup>Rius et al. (2018) Patent Ref. P20183075

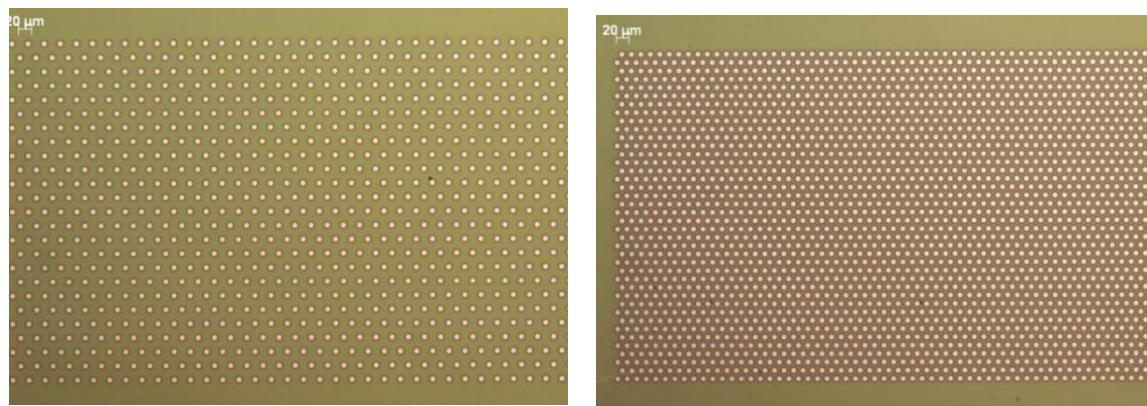


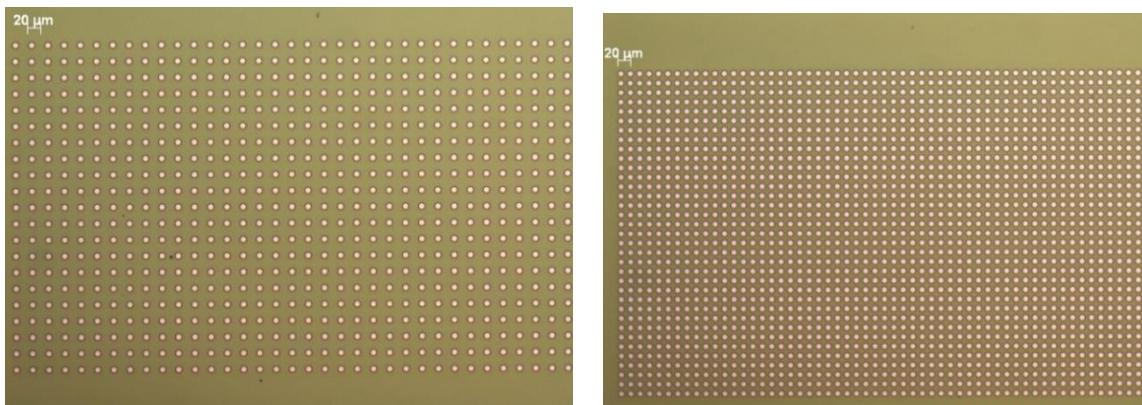
**Figura 3.17:** a) Resultat fabricació d'una matriu hexagonal, modulació=50, temps d'exposició=0.4ms, capçal de 10 micròmetres i període de 25 micròmetres. El diàmetre dels punts és de 9.03 micròmetres. b) Resultat de la metal·lització amb 50nm d'alumini, el diàmetre dels punts és de 9.04 micròmetres.

#### 4.3. Estructures amb geometries, períodes i defectes diferents

Un cop ja s'ha aconseguit optimitzar els principals paràmetres d'exposició i hem replicat les estructures en diferents substrats, el següent pas es variar el disseny de l'estruatura. Per fer-ho es pot canviar la constant de cel·la o període, alterar la geometria de cel·la, e.g. passar a una cel·la plano-quadrada, o bé fixant-nos en les estructures aplicades al guiatge de llum en cristalls fotònics podem introduir defectes en l'estruatura.

La primera fabricació efectuada en aquests sentit combina el canvi de període i el canvi de geometria entre i una cel·la hexagonal i una cel·la plano-quadrada. Es fabriquen amb el capçal de 10 micròmetres i fent servir els paràmetres òptims de la taula 1, 4 estructures 2 amb geometria hexagonal o triangular i 2 amb geometria plano-quadrada, i de cada una de les geometries dos períodes diferents, 15 i 25 micròmetres.

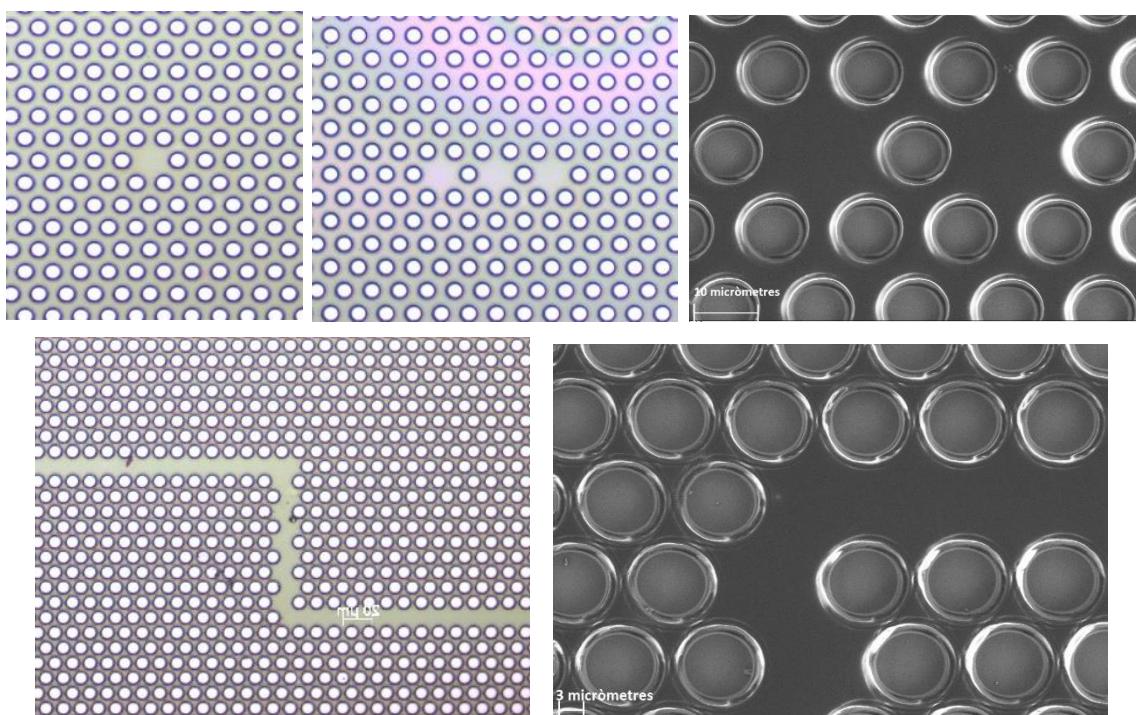




**Figura 3.18:** Fabricacions amb diferents geometria i període, els paràmetres utilitzats són: velocitat =0.1mm/s, modulació=50, temps=0.4ms. Els dots tenen uns diàmetres entre 9 i 10  $\mu\text{m}$  **a)** Geometria hexagonal, període de 25 micròmetres. **b)** Geometria hexagonal, període de 15 micròmetres. **c)** Geometria quadrada i període de 25 micròmetres. **d)** Geometria quadrada i període de 15 micròmetres

A la figura 3.18 es pot veure 4 imatges corresponents a les 4 fabricacions comentades, podem veure com la geometria de cel·la es replica de forma correcte i que els períodes també es reproduueixen adequadament. El diàmetre dels punts es troba entre 9 i 10  $\mu\text{m}$  i aquesta mida es manté independentment del període o la geometria

Una altra manera de modificar l'estructura és amb la introducció de defectes. Concretament s'han dissenyat tres estructures de punts amb cel·la hexagonal amb diferents tipus de defectes. A la figura 3.19a es pot veure un defecte de tipus puntual, on s'ha omés un únic punt, la figura 3.19b mostra la omissió de diferents punts alternats i la figura 19d s'ha dissenyat de manera que els defectes formin un camí o canal com el que trobaríem en un cristall fotònic real per utilitzar com a guia d'ones.



**Figura 3.19:** Els motius s'han fabricat amb els següents paràmetres: velocitat=0.1mm/s, modulació=50, temps=0.4ms, capçal de 10 micròmetres i període de . **a)** Defecte puntual: s'ha omès un punt de la matriu. **b)** Omissió alternada de punts. **c)** i **d)** Imatge SEM de l'estructura amb omissió alternada de punts **d)** i **e)** Omissió de punts formant un camí que travessa tota la matriu, amb microscòpia òptica i electrònica respectivament;  $\times 4.4 \cdot 10^3$  augment, distància de treball de 3.7mm i voltatge de 3 KV

Podem veure a les figures anteriors, que l'equip de litografia làser és capaç de replicar els dissenys amb defectes sense cap tipus de problema. El disseny d'aquestes estructures en un principi pot semblar senzill doncs només cal ometre alguns punts del disseny original, el software però tracta l'estructura com a una única entitat i no permet suprimir punts individuals. Així doncs per generar cada un dels dissenys, s'han sumat diferents matrius amb les coordenades adequades de manera que el resultat final sigui com una sola matriu amb omissió de certs punts concrets. Per limitacions de temps no s'ha pogut caracteritzar la seva funcionalitat.

## Conclusions

En aquest treball s'han descrit els experiments de fabricació de matrius de punts amb dissenys inspirats en cristalls fotònics bidimensionals, fent servir una tècnica fotolitogràfica d'escriptura directa, *laser writing*.

Entre les conclusions que podem extreure no ha estat possible aconseguir que els punts tinguin un diàmetre entorn d'1  $\mu\text{m}$  i que a la vegada presentin un perfil prou circular amb el capçal d'1  $\mu\text{m}$ . En canvi, aquestes limitacions no es donen amb el capçal al de 10 micròmetres, la forma dels punts es perfectament circular, i els diàmetres es troben per sota del valor del capçal, entorn als 7-8 micròmetres en diàmetre. A més, s'han utilitzat diferents materials com a substrat i s'ha aconseguit replicar les estructures correctament sobre tots ells. El qual demostra la versatilitat i robustesa de la tècnica.

En segon lloc, en termes d'experiència i formació, el treball a la sala blanca ha servit per familiaritzar-se amb el mètode científic, conèixer la manera de funcionar d'una instal.lació d'aquest tipus, i assolir autonomia en l'ús del làser writer *Kloe650* i tota una sèrie de processos necessaris per la fabricació de les estructures. També s'ha tingut la possibilitat de guanyar experiència en l'ús d'un equip de microscòpia electrònica de rastreig (SEM).

D'altra banda, la recerca d'informació i estudi sobre els PhCy's, la seva estructura i aplicacions m'ha permès conèixer amb més detall un camp que resulta emolt interessant a nivell d'interés personal. La simulació de les estructures fent servir el software MPB ha servit també per guanyar certs coneixements i pràctica per poder aplicar mètodes de simulació en futurs treballs.

Com a conclusió final a títol personal, es pot dir que s'està satisfet amb el treball realitzat i els resultats obtinguts, així com amb l'àmbit en el que s'ha desenvolupat.

Es plantegen diverses propostes en les que es podria continuar-se o aplicar el projecte aquí desenvolupat:

- Comprovar la funcionalitat de les estructures com a PhCys
- Utilitzar una resina de tipus negativa, per obtenir les estructures complementàries a les obtingudes en aquest treball
- Intentar reduir més el diàmetre dels punts de les matrius sense perdre la forma circular
- Utilitzar les matrius de punts pel creixement de columnes de material magnètic
- Funcionalitzar les estructures amb biomolècules.

## Bibliografia (Format American Psychological Association (APA); ordre alfabètic)

### Artícles

- [1] Minnu Anthrayose, T. Sridarshini, Dr. Indira Gandhi. S. Performance analysis and characterization of 2D photonic crystals-An analytical approach. 2017 Fourth International Conference on Signal Processing, Communication and Networking. (2017).
- [2] Bykov, V.P. Spontaneous emission from a medium with a band spectrum. Sov. J. Quantum Electron. **4. 7.** (1975).
- [3] Choi GC, kee CS, Schift H. Fabrication of polymer photonic Crystal slabs using nanoimprint lithography. Current Applied Physics. **6. 8-11.** (2006).
- [4] Daniela Dragoman, Adrian Dinescu, Raluca Muller, Cristian Kusko, Alex. Herghelegiu, Mihai Kusko. PMMA Photonic crystals for waveguiding Applications. 2008 International Semiconductor Conference. (2008).
- [5] L. J. Guo. Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements. Advanced Materials. **19. 4. 495-513.** (2007).
- [6] K. Kitayana. Light propagation in Optical fibres. In Optical Code Division Multiple Access: A Practical Perspective. **65-106.** (2014)
- [7] Attila Mekis, Shanhui Fan, J. D. Joannopoulos. Bound State in photonic Crystal waveguides. Physical Review B. **58. 8.** (1998).
- [8] O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser. Science. **284. 1819-1821.** (1999)
- [9] G. Rius. Electron beam lithography for Nanofabrication.(Tesis doctoral). Universitat Autònoma de Barcelona. (2008)
- [10] D. Saranya, A. Rajesh. Design and Analysis of Optical AND and OR Logic gates using two dimensional photonic Crystal. 2017 International Conference on Inventive Computing and Informatics. (2017).
- [11] N. L. Smith, A. Coukouma, S. Dubnik and S. A. Asher. Debye ring diffraction elucidation of 2D photonic crystal self-assembly and ordering at the air–water interface. Phys. Chem. Chem. Phys. **19. 31813-31822.** (2017).
- [12] E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in Solid-State physics and electronics. Physical review letters. Phys. Rev. Lett. **58, 2059.** (1987).
- [13] J.-T. Zhang, Xing Chao, Xinyu Liu and Sanford A. Asher. Two-dimensional array Debye ring diffraction protein recognition sensing. Chem.Commun. **49. 6337.** (2013) .
- [14] J.-T. Zhang, Luling Wang, Jia Luo, Alexander Tikhonov, Nikolay Kornienko, and Sanford A. Asher. 2-D Array Photonic Crystal Sensing Motif. J. Am. Chem. Soc. **133. 9152-9155.** (2011).

## Llibres

- [15] Boehlke ,Paul R. Scanning Electron Microscopy. Salem Press Encyclopedia of Science. 5. (2018)
- [16] Christoph Fenzl, Thomas Hirsch, and Otto S. Wolfbeis. Photonic Crystals for Chemical Sensing and Biosensing. Angewandte Review. (2014).
- [17] Jaeger, C. R. Introduction to Microelectronic Fabrication. 5.(2002)
- [18] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, Robert D. Meade. Photonic Crystals, Molding the Flow of Light. Princeton University Press. (2017).
- [19] Rosenthal, Julia A., BA, MS. Litography. Salem Press Encyclopedia of Science. 4. (2018).
- [20] Sukhoivanov, I.A. Gurvey, I.V. Photonic Crystals, Physics and Practical Modeling. Springer. (2009).

## Fonts digitals

- [21] Classificació Sala blanca: <https://www.cleanairtechnology.com/cleanroom-classifications-class.php>. (visitada el 13.05.2019)
- [22] Fujifilm, fabricant resina i revelador: [https://www.fujifilm.com/products/semiconductor\\_materials/location/](https://www.fujifilm.com/products/semiconductor_materials/location/) (visitada el 30.01.2019)
- [23] Glade. <https://glade.gnome.org/> (visitada el 3.11.2018)
- [24] HDMS Data Sheet. [https://www.microchemicals.com/fileadmin/user\\_upload/TechnicFrance/SPEC/spec\\_HMDS\\_V\\_LSI.pdf](https://www.microchemicals.com/fileadmin/user_upload/TechnicFrance/SPEC/spec_HMDS_V_LSI.pdf). (Visitada el 15.12.2018)
- [25] Software ImageJ. <https://imagej.nih.gov/ij/>. (visitada el 20.01.2019)
- [26] Kloé, company. (2019) Kloé. Keys to your expectations in optics. Manual d'usuari . Extret de : <https://www.kloe-france.com/>. (visitada el 3.03.2019)
- [27] Meep software: <https://meep.readthedocs.io/en/latest/>
- [28] MIT (Massachusetts Institute of Technology): <http://www.mit.edu/> (visitada el 20.10.2018)
- [29] MPB (MIT Photonic bands) Software: <https://mpb.readthedocs.io/en/latest/>. (Visitada el 20.10.2018)
- [30] Sala blanca IMB-CNM. <http://www.imb-cnm.csic.es/index.php/en/clean-room>(visitada el 10.12.2018).

## Annex 1

En aquest primer annex es mostra un resum del procés seguit durant la simulació per obtenir els resultats que mostren al cos del treball

### A1.1 Simulació estructura 2D de forats amb PMMA

En el següent text es simularà una estructura bidimensional seguint el tutorial oficial del software que es pot trobar a: [https://mpb.readthedocs.io/en/latest/Scheme\\_Tutorial/](https://mpb.readthedocs.io/en/latest/Scheme_Tutorial/). Com a arxiu .ctl d'entrada s'utilitza un dels exemples proporcionats pel propi software a la carpeta d'exemples, concretament el de l'estructura triangular. Les dades utilitzades per realitzar la simulació han sigut extretes de l'article de referència [4].

- **Simulació**

En primer lloc cal escollir les variables d'entrada, les quals es defineixen en l'arxiu d'entrada o input amb extensió ".ctl". A continuació es mostra l'arxiu utilitzat per simular una matriu 2D de forats amb radi  $R=0.38a$  on  $a$  és el paràmetre de cel·la.

```
; 2d system: triangular lattice of air holes in dielectric
; This structure has a complete band gap (i.e. a gap in both TE and TM
; simultaneously) for a hole radius of 0.45a and a dielectric constant of
; 12. (See, e.g., the book "Photonic Crystals" by Joannopoulos et al.)
;
; first, define the lattice vectors and k-points for a triangular lattice:
(set! geometry-lattice (make_lattice (size 1 1 no-size)
                                      (basis1 (/ (sqrt 3) 2) 0.5)
                                      (basis2 (/ (sqrt 3) 2) -0.5)))
(define-param kz 0) ; use non-zero kz to consider vertical propagation
(set! k-points (list (vector3 0 0 kz) ; Gamma
                      (vector3 0 0.5 kz) ; M
                      (vector3 (/ -3) (/ 3) kz) ; K
                      (vector3 0 0 kz))) ; Gamma
(define-param k-interp 4)
(set! k-points (interpolate k-interp k-points))
;
; Now, define the geometry, etcetera:
(define-param eps 3.8) ; the dielectric constant of the background
(define-param r 0.38) ; the hole radius
(set! default-material (make dielectric (epsilon eps)))
(set! geometry (list (make cylinder (center 0) (material air)
                                    (radius r) (height infinity))))
;
(set-param! resolution 32) Definim la resolució i número de bandes a computar
(set-param! num-bands 8)
;if (= kz 0)
(begin
  (run-te)
  (run-tm))
(run)) ; if kz != 0 there are no purely te and tm bands
```

**Definim la cel·la unitat**

**Definim els k-points**

**Definim el radi en funció de a i el valor de la permitivitat relativa**

**Escollim la geometria del material, posició del centre, etc**

**Definim la resolució i número de bandes a computar**

Figura A1 1: Arxiu complet d'entrada amb extensió ".ctl".

Un cop tenim tots els paràmetres definits a l'arxiu d'entrada, podem executar la simulació fent servir l'ordre – *mpb entrada.ctl >& sortida.out*. Aquesta comanda farà correr la simulació i genera diferents arxius de sortida ".out". L'arxiu de sortida conté informació referent al sistema: bandes, informació del camp elèctric, de la constant dielèctrica, etc.

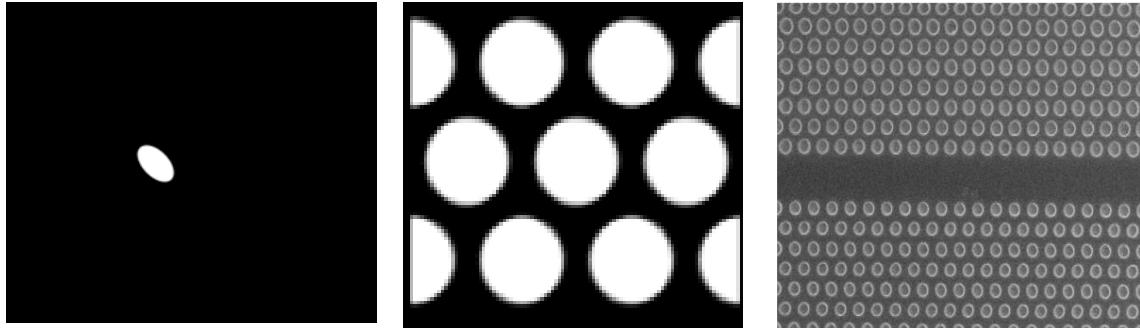
- **Resultats**

Un cop la simulació ha estat executada i hem obtingut l'arxiu de sortida ".out", comencem generant una imatge de l'estructura.

Per obtenir una imatge de l'estructura executem l'ordre "*h5topng*" per generar un arxiu ".png" utilitzant la funció dielèctrica generada amb la simulació. Inicialment la imatge (figura 14 a) té una forma ovalada, perquè la cel·la primitiva de la nostra xarxa és un rombe amb angles de 60

graus. Com que la sortida de la simulació defineix el “grid” sobre la cel·la unitat no ortogonal, però la imatge produïda per *h5topng* és quadrada, la imatge generada apareix distorsionada.

Per arreglar la imatge s'utilitza la funció “*mpb-data*”, permet reorganitzar les dades en una cel·la rectangular amb la mateixa àrea i volum, ampliar les dades per incloure períodes múltiples i canviar la resolució per unitat de distància en cada direcció, a un valor fixat.



**Figura A1 2:** a) Imatge obtinguda de la funció dielèctrica amb l'ordre “*h5topng*” abans de la correcció. b) Imatge obtinguda després de la correcció. c) Imatge real de l'estructura de l'article de referència [5].

Un cop tenim una idea de com és l'estructura simulada podem buscar el gap i extreure les dades per dibuixar el diagrama de bandes. Per trobar fàcilment el gap podem escriure a la terminal l'ordre “*grep Gap sortida.out*” aquesta funció ens buscarà tota la informació continguda en l'arxiu que inclogui la paraula Gap (figura 15).

```
nacho@nacho-HP-EliteBook-8440p:~/Documentos/mpb-1.6.1/PhCy$ grep Gap pmma038.out
Gap from band 1 (0.39754354937164316) to band 2 (0.47899128999701024), 18.58402814519772%
Gap from band 1 (0.39308558391024156) to band 2 (0.3931813478163416), 0.024359133580694907%
Gap from band 3 (0.672173760981808) to band 4 (0.672446735033304), 0.04060239336004999%
Gap from band 7 (1.0409077885287599) to band 8 (1.0540528239412128), 1.2549195755002616%
```

**Figura A1 3:** Captura de pantalla després d'executar l'ordre “*grep Gap*” sobre l'arxiu de sortida, el resultat mostra tot el text que inclogui la paraula Gap.

Podem veure que en aquest cas hi ha 4 gaps, entre parèntesis s'especifica el valor de la freqüència (unitats de c/a) on comença i acaba cada un. Al final de cada un s'especifica la mida del Gap en %. Destaquem dos gaps entre la banda 1 i 2, un pels modes TE i l'altre pels TM, amb 18 % i 0.02 % d'ample respectivament.

Per obtenir el diagrama de bandes primer cal extreure les dades, referents a cada una de les bandes, de l'arxiu de sortida “.out” i passar-les a un arxiu “.txt” per poder representar-les. Per fer-ho utilitzem l'ordre “*grep tmfreqs sortida.out > tmfreqs.txt*” , amb aquesta ordre estem, concretament, extreien les freqüències corresponents als modes TM. Es genera un arxiu com el de la figura 16

```

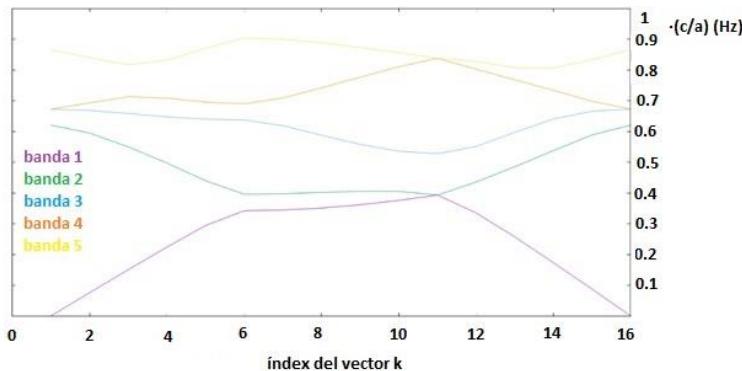
tmfreqs:, k index, k1, k2, k3, kmag/2pi, tm band 1, tm band 2, tm band 3, tm band 4, tm band 5, tm band 6, tm band 7, tm band 8
tmfreqs:, 1, 0, 0, 0, 0, 0.620256, 0.672174, 0.672447, 0.866124, 0.866233, 0.931089, 1.15616
tmfreqs:, 2, 0, 0.1, 0, 0.11547, 0.0754992, 0.594721, 0.668058, 0.692582, 0.839347, 0.87481, 0.967481, 1.12547
tmfreqs:, 3, 0, 0.2, 0, 0.23094, 0.150398, 0.549715, 0.658153, 0.713135, 0.816622, 0.89783, 1.0263, 1.07698
tmfreqs:, 4, 0, 0.3, 0, 0.34641, 0.223864, 0.497324, 0.647453, 0.708286, 0.831842, 0.92967, 1.02164, 1.09237
tmfreqs:, 5, 0, 0.4, 0, 0.46188, 0.293965, 0.439761, 0.6397, 0.695179, 0.869862, 0.96395, 0.971638, 1.07548
tmfreqs:, 6, 0, 0.5, 0, 0.57735, 0.34202, 0.39583, 0.636908, 0.689745, 0.904027, 0.934295, 0.984145, 1.05405
tmfreqs:, 7, -0.0666667, 0.466667, 0.581187, 0.344231, 0.397364, 0.618456, 0.708658, 0.899499, 0.929608, 0.987869, 1.05822
tmfreqs:, 8, -0.133333, 0.433333, 0, 0.592546, 0.350772, 0.401348, 0.587484, 0.741468, 0.887962, 0.917524, 0.996906, 1.06876
tmfreqs:, 9, -0.2, 0.4, 0, 0.61101, 0.361376, 0.405554, 0.557728, 0.776155, 0.872657, 0.9017, 1.00765, 1.08222
tmfreqs:, 10, -0.266667, 0.366667, 0, 0.635959, 0.375646, 0.405072, 0.535455, 0.81011, 0.855602, 0.885458, 1.01703, 1.09621
tmfreqs:, 11, -0.333333, 0.333333, 0, 0.666667, 0.393086, 0.393181, 0.527292, 0.83777, 0.837871, 0.8754, 1.02126, 1.10938
tmfreqs:, 12, -0.266667, 0.266667, 0, 0.533333, 0.334901, 0.43569, 0.551119, 0.80218, 0.827361, 0.924112, 0.999578, 1.10498
tmfreqs:, 13, -0.2, 0.2, 0, 0.4, 0.257121, 0.485069, 0.596793, 0.767655, 0.80764, 0.954142, 0.99048, 1.12662
tmfreqs:, 14, -0.133333, 0.133333, 0, 0.266667, 0.173334, 0.5376, 0.640275, 0.733546, 0.806477, 0.90975, 1.04091, 1.06328
tmfreqs:, 15, -0.0666667, 0.0666667, 0, 0.133333, 0.087142, 0.588608, 0.665534, 0.698036, 0.833682, 0.877856, 0.976146, 1.11805
tmfreqs:, 16, 0, 0, 0, 0, 0.620256, 0.672174, 0.672447, 0.866124, 0.866233, 0.931089, 1.15616

```

**Figura A1 4:** Arxiu de text generat amb la l'ordre “grep tmfreqs sortida.out > tmfreqs.txt”, on és dóna el valor de la freqüència dels modes tm de cada una de les bandes per a cada punt de l'índex de K.

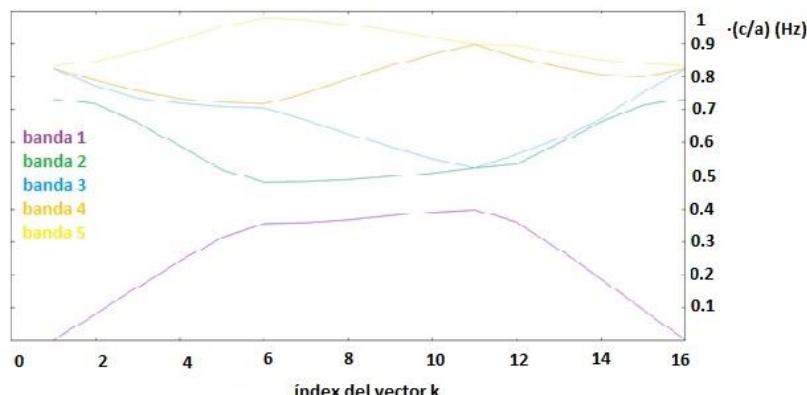
Es pot veure informació referent a 8 bandes del modes TM. Abans de representar gràficament les bandes cal modificar el fitxer “.txt” per tal que compleixi amb els requisits de forma, que la funció “*GNUpot*” exigeix. Aquesta funció es pròpia del sistema operatiu Ubuntu i permet fer representacions gràfiques a partir d'arxius de text en format de columnes, sense comes ni cap tipus d'element extra.

Un cop l'arxiu està preparat s'utilitza l'aplicació “*GNUpot*” per representar la primera columna referent a l'índex dels “K-points” respecte les columnes 6,7,8,9 i 10, que corresponen a les freqüències de les 5 primeres bandes (figura 17 i 18).



**Figura A1 5:** Representació gràfica de la freqüència dels modes TM permisos per a cada punt del vector K, aquesta representació és coneix com diagrama de bandes

A l'anterior imatge podem veure que hi ha un petit gap entre les dos primeres bandes, el de 0.02% que s'havia comentat anteriorment, que va de  $(3.685 - 3.686) \cdot 10^{14}$  Hz.



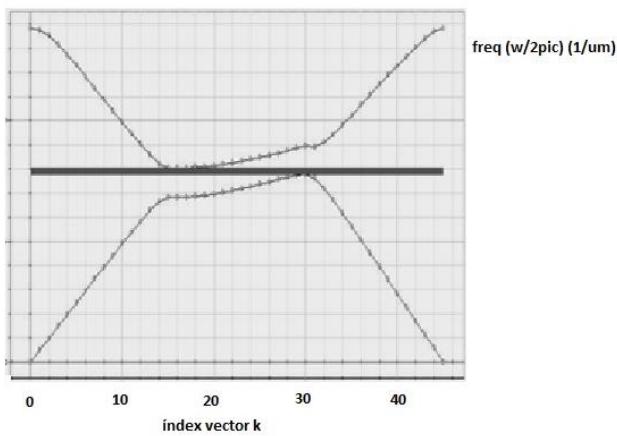
**Figura A1 6:** Diagrama de bandes pels modes TE

Aquest segon diagrama correspon als modes TE i novament podem veure l'existència d'un gap entre la primera i la segona banda, aquest cop molt més evident, corresponent al del 18% anteriorment comentat. El rang de freqüències que compren és:  $(3.73 - 4.49) \cdot 10^{14}$  Hz.

- **Comparació resultats amb l'article de referència.**

Les dades utilitzades per fer la simulació han estat extretes de l'article prèviament mencionat. En aquest article es proposa una estructura de PMMA sobre òxid de silici amb la intenció d'obtenir un gap en l'espectre visible i posteriorment afegir defectes per tal de poder utilitzar l'estructura com a guia d'ones

En aquest apartat es compara el diagrama de bandes obtingut en l'apartat de simulació 2-D de l'article amb el diagrama que s'obté amb la simulació aquí presentada.



*Figura A1 7: Diagrama de bandes resultant de la simulació de l'article de referència*

El diagrama de bandes corresponent a l'article mostra un gap centralitzat en voltants dels 650nm mentre, que l'obtingut amb la simulació amb el software "mpb" en el cas d'aquest treball es troba entornats dels 814nm. A més podem trobar diferències en l'ample del gap i la forma de la banda superior.

## Annex 2

En aquest annex es donarà informació detallada sobre algunes característiques de la sala blanca i sobre la resina fotosensible utilitzada en aquest treball.

### A2.1 Sala blanca

#### A2.1.1 Classificació sala blanca

Les sales blanques es classifiquen segons com de net es l'ambient que contenen, amb el numero de partícules d'una certa mida que poden haver-hi per metre cúbic [21].

La classificació ISO 14644-1 és la més utilitzada avui en dia. Expressa el logaritme decimal del numero de partícules, amb diàmetre igual o superior a 0.1 micròmetres, per unitat de metre cúbic permeses. Per exemple una ISO 8 permet fins a  $10^8$  partícules per metre cúbic.

La següent taula mostra la classificació ISO per diferents diàmetres de partícula.

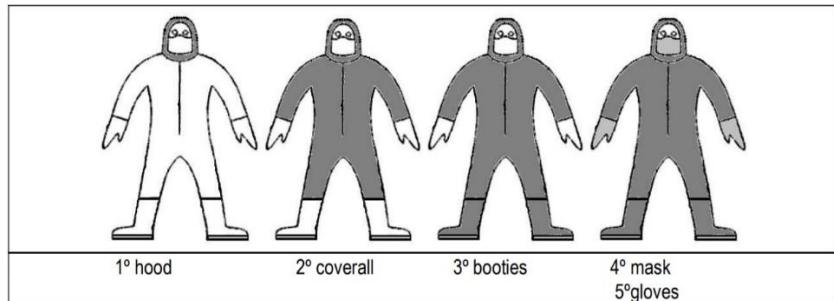
Classe	Número màxim de partícules/m <sup>3</sup>					
	>= 0.1μm	>=0.2μm	>=0.3μm	>=0.5μm	>=1μm	>=5μm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1,000	237	102	35	8	
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO 7				352,000	83,200	2,930
ISO 8				3,520,000	832,000	29,300
ISO 9				35,200,000	8,320,000	293,000

Taula A2 1

#### A2.1.2 Vestimenta sala blanca

Per accedir a una sala blanca cal dur la indumentària reglamentari, per tal de reduir al mínim la contaminació que pugui entrar des de l'exterior. En funció de la classificació ISO de la sala caldrà utilitzar una vestimenta mes o menys restrictiva.

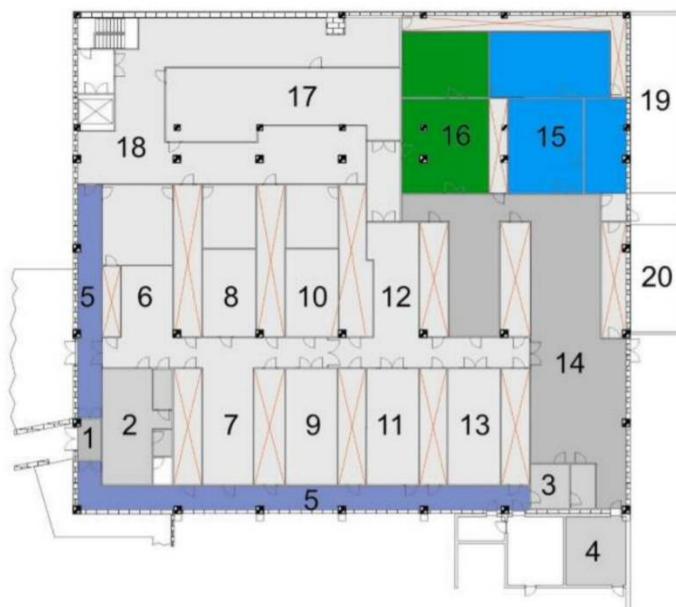
A la sala blanca on s'ha treballat és necessari portar la vestimenta que es pot observar a la imatge. A l'hora de vestir-se cal fer-ho a la sala identificada amb el nom SAS i d'una forma concreta. En primer lloc cal posar-se la caputxa, després el mono seguit de les botes i per acabar la mascara i els guants. Per desvestir-se cal fer-ho seguint el ordre invers que per vestir-se, es a dir, primer es treuen guants i mascareta i després botes mono i caputxa.



**Figura A2 1:** Vestimenta necessària per accedir a la sala blanca. La figura mostra l'ordre en que cal posar-se la indumentària

#### A2.1.3 Mapa sala blanca

La sala blanca on s'ha treballat disposa de diferents espais equipats adequadament, on es duen a terme diferents tipus de processos. A la figura següent es mostra un mapa de la sala blanca amb els diferents espais que la conformen.



**Figura A2 2:** Mapa de la sala blanca, s'assigna un número a cada sala o espai diferent. 1) Pre-SAS. 2) JSAS principal. 3) SAS-2. 4) Lab. Microsistemes. 5) Passadís perimetral. 6) Àrea d'inspecció. 8) Forns atmosfèrics. 9) Fotolitografia – CMOS. 10) Forns de baixa pressió. 11) "Steppers Area". 12) Planificació/Oblees. 13) "Wet Etching". 14) "Mixt Zone". 15) Àrea de Nanotecnologia. 16) MNC fotolitografia. 17) RIE-Àrea polvorització. 18) RIE-Passadís servei de polvorització. 19) Magatzem gasos. 20) Magatzem productes químics.

#### A2.2 Informació tècnica fotoresina (HIPR-6512)

A continuació es presenta una taula on es recullen diferents característiques químiques de la fotoresina utilitzada en les fabricacions [22].

<b>Solids (%) Min.</b>	26.5
<b>Sòlids (%) Max.</b>	27.5
<b>Viscositat (cps) Min.</b>	33.8
<b>Viscositat (cps) Max.</b>	36.2

<b>Contingut d'aigua</b>	<0.5%
<b>Filtració</b>	0.2 $\mu$ m
<b>Índex de refracció</b>	1.6441
<b>Punt d'inflamabilitat</b>	55°C
<b>Traces de metall &gt;</b>	50 ppb

Taula A2 2

### Annex 3

En aquest annex es mostren reports complerts de diferents fabricacions. A cada report es donen els paràmetres que s'utilitzen, el disseny i es comenten els resultats obtinguts.

#### A3.1 Report Metal-lització

En aquest informe es presenten els resultats d'una metal-lització de 50 nm d'Alumini sobre diferents substrats. S'utilitzaran 2 mostres, Silici i Silici + Poliamida (**1** i **2** respectivament) on s'han exposat prèviament 3 motius amb el làser.

A la següent taula es recullen els principals paràmetres per l'exposició de les mostres **1** i **2**.

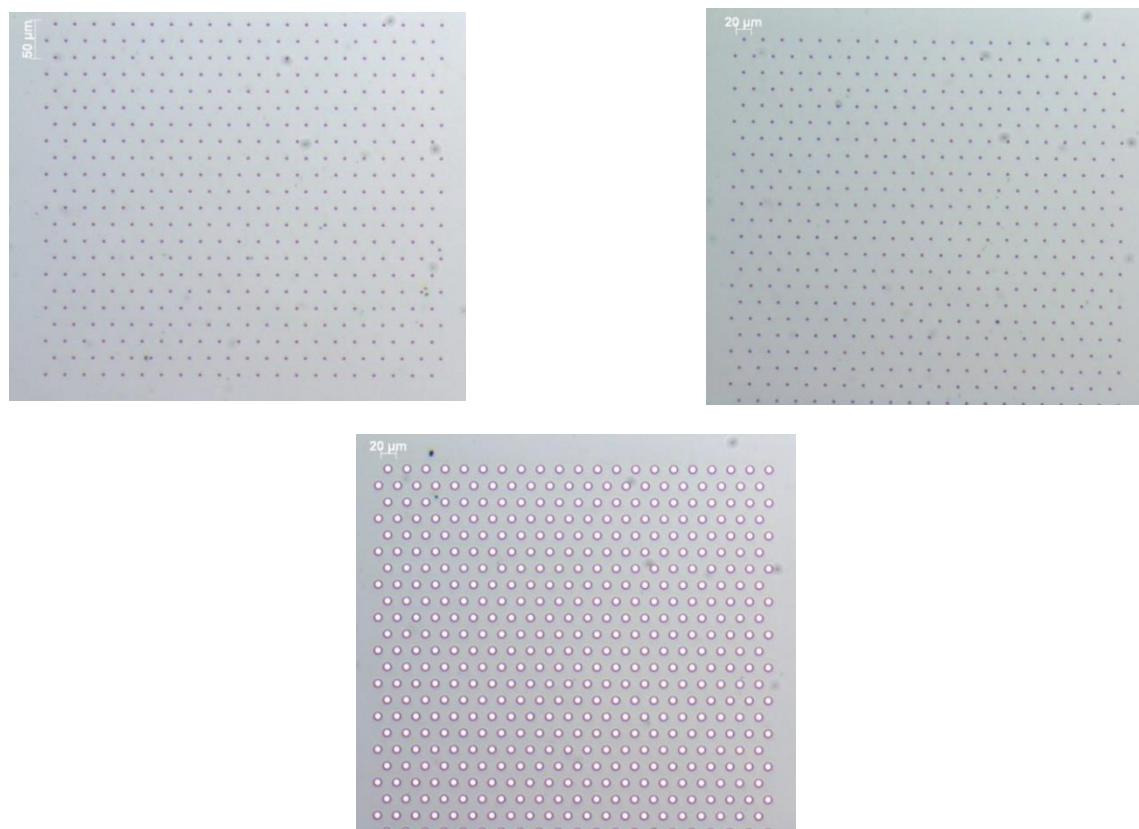
S'utilitza per aquestes dues mostres un pitch de 25 micròmetres per assegurar que els "dots" no es solapin. L'àrea de cada motiu es aproximadament  $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$

Mostra	Motiu	Capçal (micròmetres)	Velocitat (mm/s)	Modulació	Temps (ms)
1 i 2	A	1	0.1	100	10
	B				9ms
	C	10		50	0.4ms

Taula A3 1

A continuació es mostren les imatges corresponents a les mostres 1 i 2 abans de la metal-lització.

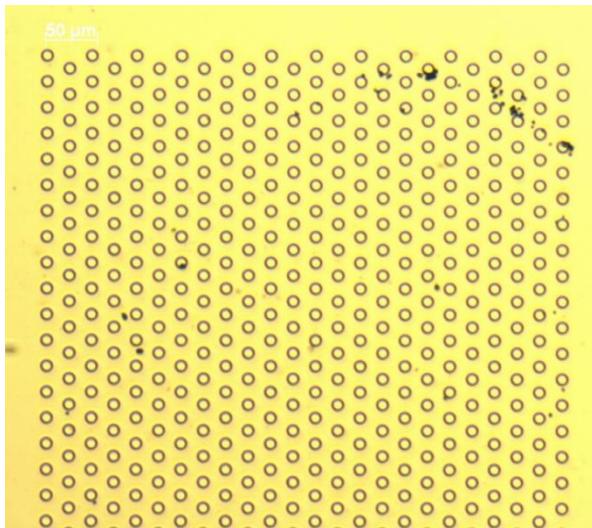
- **Mostra 1:** Silici



**Figura A3 1:** Resultats de la fabricació amb els paràmetres indicats. a) Imatge de la mostra A b) imatge de la mostra B. C) Imatge de la mostra C.

Observant aquestes imatges, gràcies al color dels motius, podem veure que el cas **C** és l'únic que sembla estar ben exposat i revelat. Això implica que a l'hora de metal·litzar el motiu **C** serà l'únic visible.

- **Mostra 2:** Silici + Poliamida



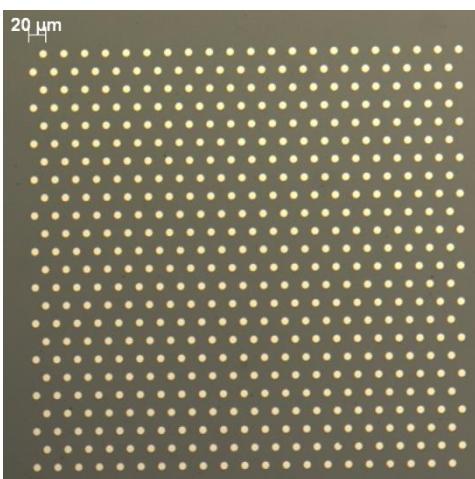
**Figura A3 2:** Resultat de la fabricació sobre un substrat de Silici amb poliamida, cas C, després del revelat els casos A i B no apareixen.

Els motius **A** i **B** no apareixen en aquesta mostra, després del revelat només s'aprecia el cas **C**. Això pot ser degut a una DOSI baixa o a que el revelat no s'ha fet correctament.

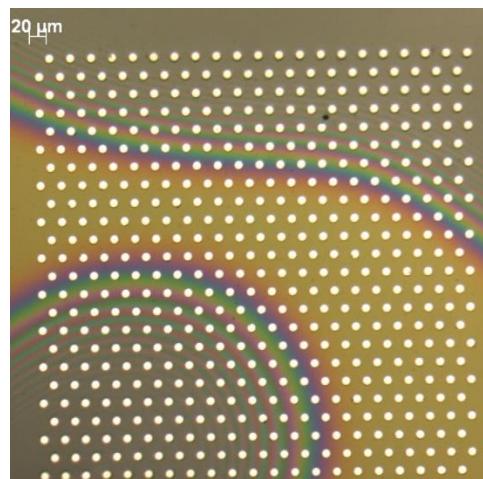
### Metal·lització i Lift-Off

A continuació es mostren els resultats després de sotmetre les mostres a un procés de metal·lització

#### 1) Silici



#### 2) Silici + Poliamida



**Figura A3 3:** Imatges de les mostres 1 i 2 després de la metal·lització de 50nm d'Alumini. **a)** Mostra de silici cas C . **b)** Mostra de silici amb poliamida cas C.

En aquests dos últims casos només el motiu **C** apareix després de la metal·lització i el Lift-Off, tal com calia esperar.

Per una banda en el cas **1** els motius A i B no apareixen ven exposats, i ja havíem anticipat que no sortirien després de la metal·lització.

Per altra banda pel que fa al cas **2** els motius A i B no apareixen prèviament a la metal·lització i per tant tampoc apareixen després. Aquesta mostra es farà servir a més per realitzar un procés anomenat Transflex

#### Taula diàmetres

Mostra	Motiu	Diàmetre (micròmetres)
1	C	9.07
2	C	9.60

*Taula A3 2*

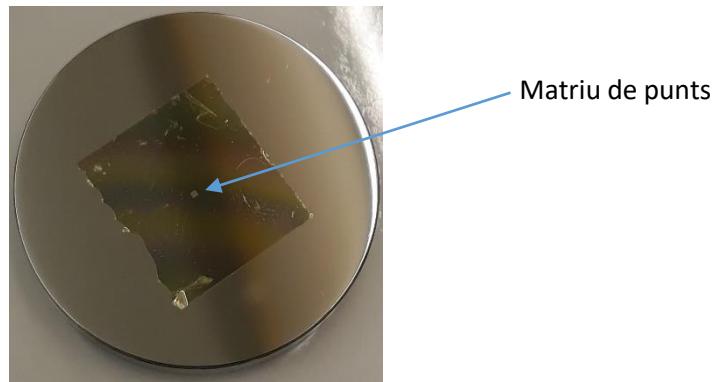
#### A3.2 Report “Transflex”

“**TRANSFLEX**”: Tècnica basada en generar amb poliamida (PI) un motlle per poder transferir el disseny del substrat original (Silici) a un nou substrat (Acer polit)

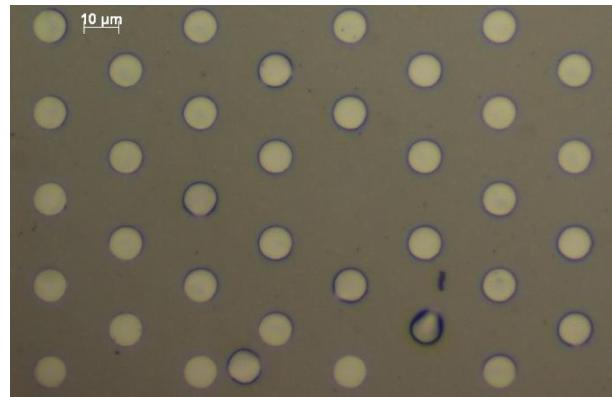
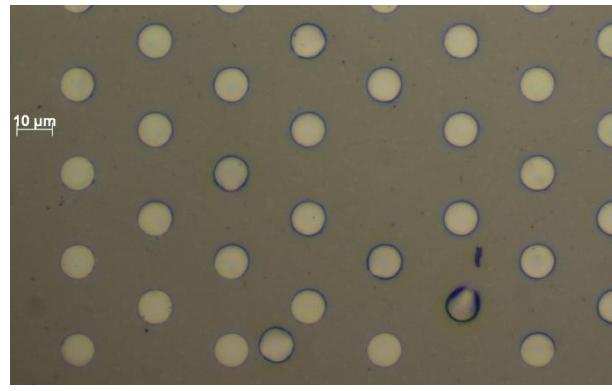
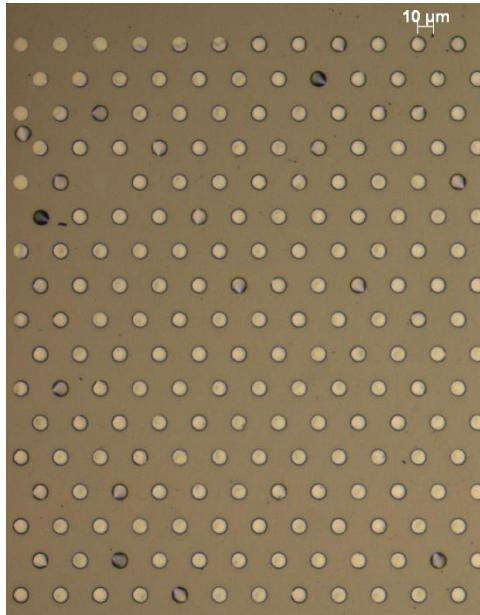
La tècnica consisteix en, un cop fet el Lift-off, desenganxar la capa de PI existent sobre el Silici i depositar-la sobre el nou substrat, seguidament el nou substrat amb la poliamida adherida s'introdueix a una màquina anomenada “keplar”, aquesta elimina la matèria orgànica utilitzant plasma d'oxigen, així al introduir acer+PI amb un gravat d'Alumini, s'eliminarà la Poliamida i quedarà el motiu d'Alumini sobre el substrat d'acer polit, és a dir ens quedarà l'acer polit amb punts d'alumini a sobre.

Els motius gravats a la poliamida són els que apareixen al report anterior, concretament a la mostra 2 (Silici + PI).

A continuació es mostren imatges del procés abans de la reacció amb el plasma d'oxigen i del resultat final.



*Figura A3 4: Substrat d'acer polit amb la poliamida dipositada a sobre, abans d'introduir la mostra al “keplar”*



**Figura A3 5:** Observacions al microscopi òptic de la mostra un cop la poliamida ha estat eliminada. El fons és en substrat d'acer polit i els punts o motius són d'alumini.

### Observacions

D'una banda veien les imatges, podem concloure que la transferència dels motius d'un substrat a un altre s'ha donat de forma correcte, i que és mantenen les dimensions.

Per altra banda es pot observar que alguns dels punts del disseny apareixen desplaçats respecte a la seva posició original, això és degut a que durant el procés d'eliminar la poliamida amb el plasma d'oxigen alguns dels punts d'alumini no s'han adherit de forma correcte sobre l'acer polit.

## Annex 4

### Caracterització amb SEM (Scanning Electron Microscope)

SEM es un tipus de microscòpia electrònica que permet generar imatges d'una mostra escanejant la superfície amb un feix d'electrons. Els electrons en interaccionar amb els àtoms de la superfície emeten diferents senyals amb diferent informació sobre la topografia i la composició de la mostra, aquestes senyals són captades per detectors específics que utilitzen les dades per generar imatges.

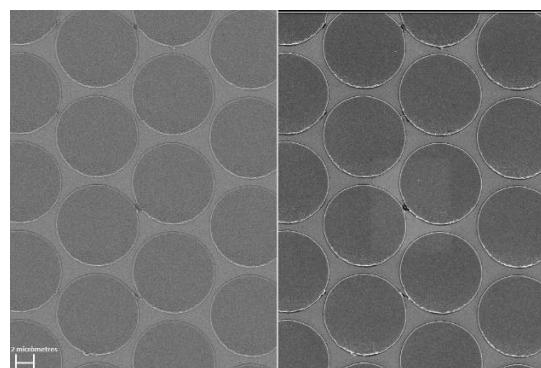
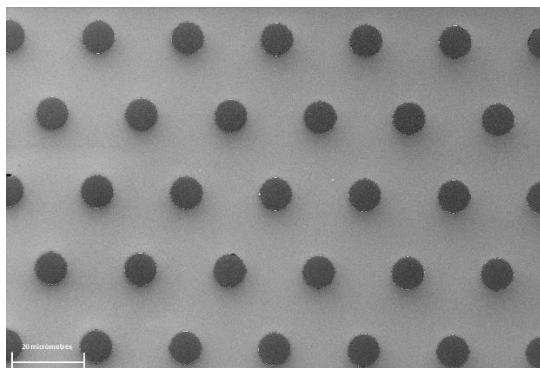
La fons d'electrons és un filament de tungstè escalfat que opera en un rang entre 1 i 30 KV. Els electrons que surten de la font són focalitzats i dirigits en forma de feix, mitjançant camps magnètics i elèctrics que actuen coma lents. No s'utilitzen lents convencionals de vidre doncs interferirien en el feix d'electrons.

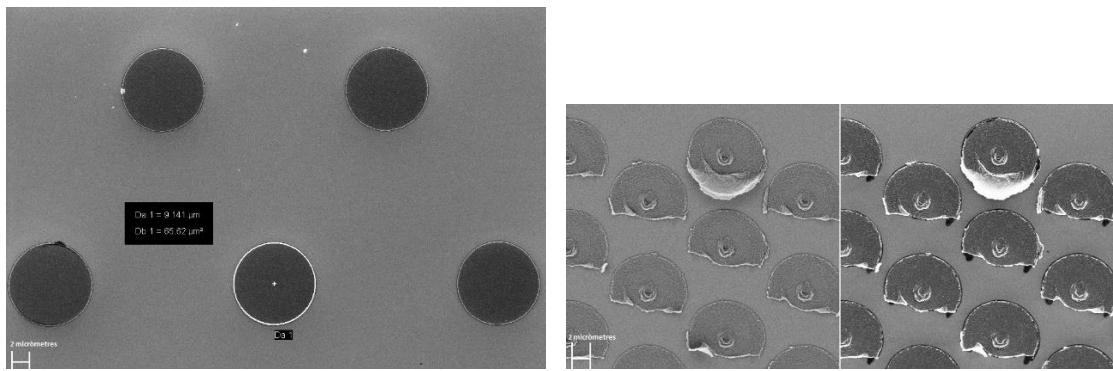
Si es focalitza el feix d'electrons sobre la superfície de la mostra es manifesten importants efectes. D'una banda alguns electrons són reflexats per la mostra i altres són retrodispersats (backscattered electrons). D'altra banda el bombardeig de la mostra amb el feix provoca l'emissió d'electrons secundaris de la mostra amb la suficient energia com per escapar dels àtoms de la mostra. Totes aquestes emissions d'electrons poden ser detectades com a senyals, i un cop amplificades s'utilitzen per formar imatges de la superfície.

Per generar imatges amb un equip SEM és necessari tenir diversos factors en compte. La mostra d'una banda acostuma ser recoberta d'un metall per tal que sigui conductora doncs la majoria de SEMs ho requereixen, augmenta la quantitat d'electrons secundaris emesos i ajuda a protegir la mostra.

La qualitat de les imatges generades depèn directament dels paràmetres que governen el funcionament del microscopi. El voltatge (accelerating voltatge) influeix en la resolució de les imatges. Es trien valors petits per a mostres sensibles com les biològiques per minimitzar els danys. Per mostres metàl·liques es poden utilitzar valors alts. La distància de treball (Working Distance) fa referència a la distància entre la superfície de la mostra i la part inferior de la lent d'on surt el feix. La mida de l'apertura del feix controlada per la lent objectiu (OL), i la corrent total que irradia la mostra controlada per la lent condensadora (CL) són dos paràmetres que també tenen un gran pes en la qualitat de la imatge.

A continuació es mostren algunes imatges obtingudes amb aquest tècnica





**Figura A4 1:** Imatges obtingudes amb microscòpia òptica d'algunes matrius de punts, s'utilitza una voltag de 3KV i una distància de treball de 5.6mm. a) i b) x2000 i x5000 augmentos respectivament. Matriu de punts amb cel·la hexagonal, període de 25μm, fabricació feta amb modulació 50 i temps 0.4ms. c) i d) x5000 augmentos, Matriu hexagonal amb període de 10μm. En aquest cas s'observa per un banda una matriu on els punts estan correctament exposats i revelats(c) i per altra banda una matriu on els punts no s'han exposat prou bé (d), perquè la DOSI no és prou elevada.