



Formation d'image dans une optique de projection

Application à la Microlithographie

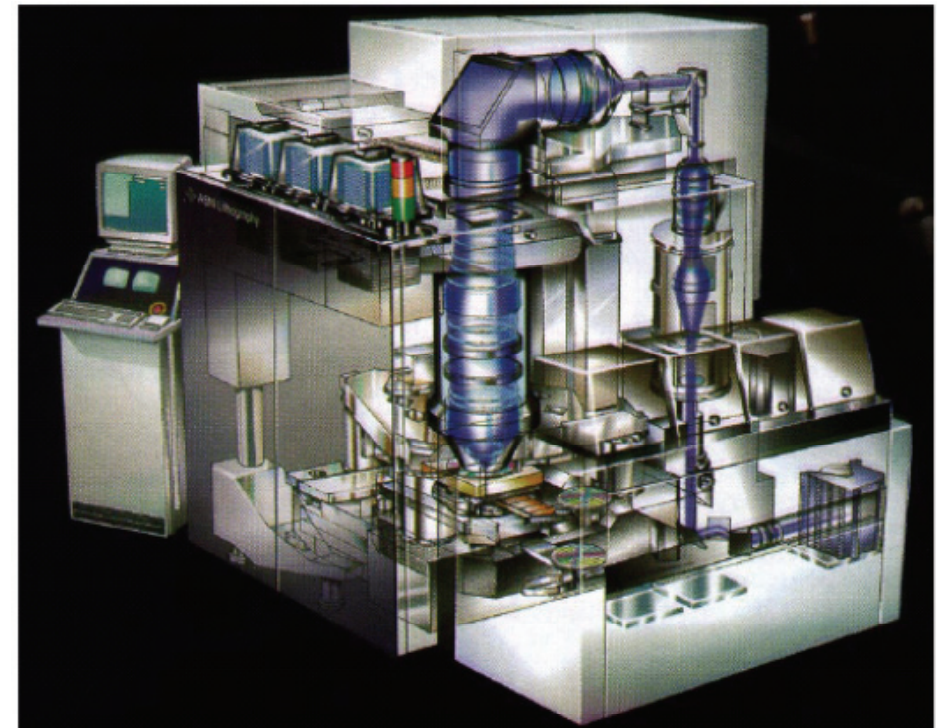
/ 31-05-2012/

/01/

Introduction

INTRODUCTION

- Un dispositif de projection associe en général une Optique d'Illumination à un Objectif de Projection (PO)
- Il est possible d'adapter les conditions d'illumination (cohérence, polarisation, etc.) à un type d'objet particulier, afin d'optimiser les performances globales de la chaîne
- Cette présentation décrit la formation d'images dans un tel système du point de vue de l'optique physique, avec une orientation particulière vers la lithographie



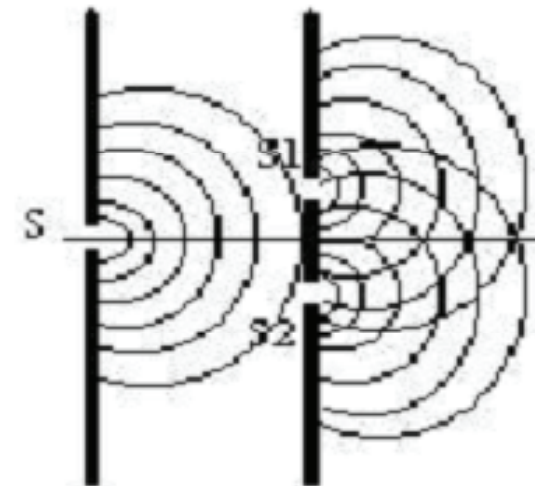
/02/

LES BASES

Le Principe d'Huygens-Fresnel

- Dans une optique en général, et de projection en particulier, la formation d'images relève d'un processus de propagation et d'interférences d'ondes lumineuses
 - Le formalisme des « rayons » est totalement inapproprié, et ne sera jamais évoqué ici
- La première tentative de description de la propagation de la lumière en tant qu'onde a été intuitée par Huygens (1678) et formalisée par Fresnel (1815)

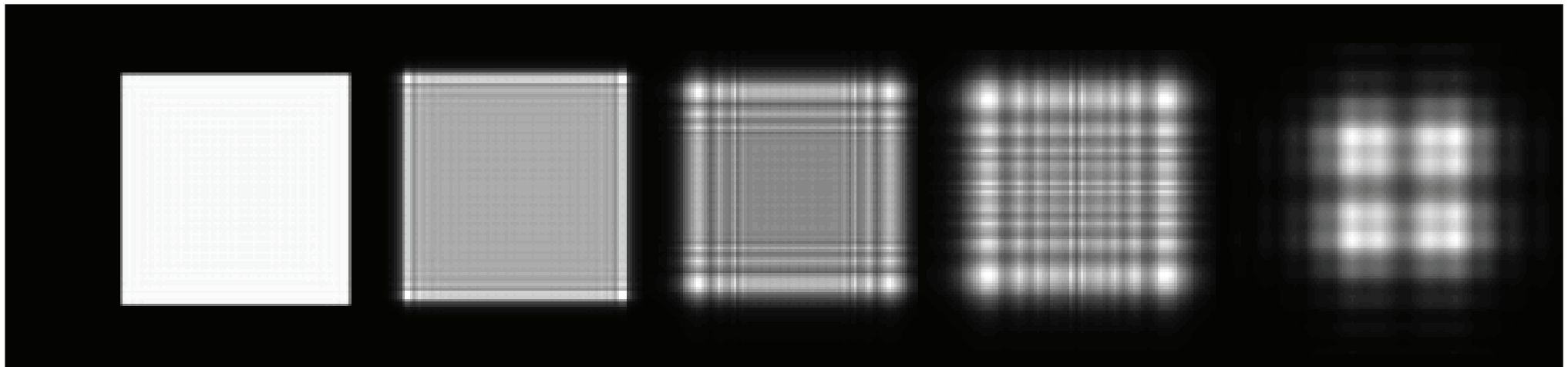
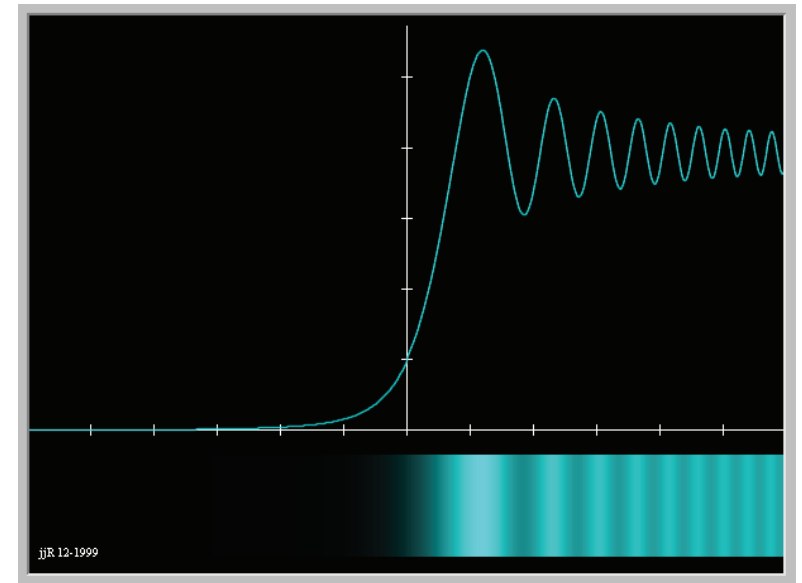
→ A l'origine, il s'agit d'une métaphore sans base physique (comme celle des rayons) : la lumière est décrite comme une « onde » dont chaque point se comporterait comme une source secondaire rayonnant une onde sphérique, l'« onde » se propageant comme la somme des amplitudes secondaires



-Figura 1-

Le Principe d'Huygens-Fresnel

- A l'époque, aucune hypothèse sur la nature de ces ondes
- Néanmoins ça marche, formellement
 - Revérification de la loi de Descartes, justification quantitative de la diffraction d'une onde plane par un demi-plan (cf. la spirale de Cornu, etc.)
 - Voir aussi ce que fait Code V avec BPR

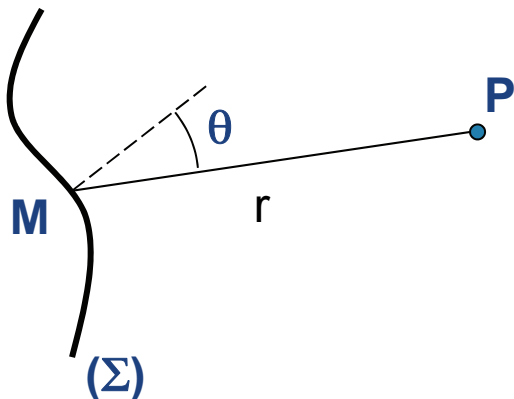


Le Principe d'Huygens-Fresnel

→ Depuis, grâce à Maxwell et quelques autres (Kirchhof, Helmholtz, Hertz), on a pu identifier les ondes lumineuses aux ondes électromagnétiques

- Après quelques transformations, les équations de Maxwell permettent d'établir les conditions de propagation d'une onde monochromatique
- Soit $U(x,y,z)$ l'amplitude du champ électrique sur une surface (Σ) quelconque. On montre que l'amplitude du champ en un point P est donnée par la relation suivante :

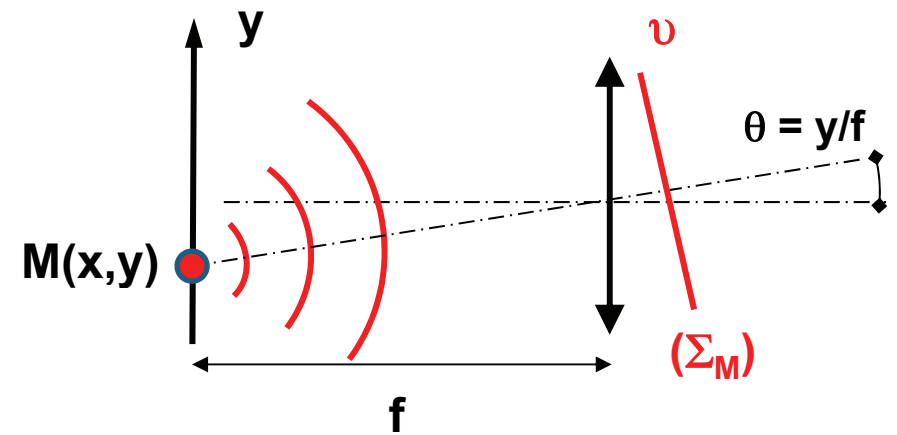
$$U(P) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U(M) \cdot \frac{e^{i\frac{2\pi}{\lambda}r}}{r} \cdot \cos(\theta) \cdot dS$$



Ce qui, à bien regarder, équivaut à assimiler chaque point « M » à une source rayonnant une onde sphérique (voir le terme en $e^{i\phi}/r$). Le champ en P est égal à la somme des contributions élémentaires : c'est exactement la reformulation mathématique du « Principe » historique

Diffraction à l'infini par un objet éclairé par une onde plane

- En général, $U(x,y)$ est une fonction compliquée et la relation précédente ne permet pas d'aller très loin (hors exploitation numérique)
 - cf. l'aspect d'un hologramme d'un objet diffusant au microscope
- La situation est simple dans le cas d'un objet plan éclairé par une onde plane uniforme
 - Soit $U(x,y)$ la transmission complexe (amplitude et phase) de l'objet dans le plan focal objet d'une lentille : c'est aussi l'amplitude du champ dans le plan objet
- La contribution de chaque point objet $M(x,y)$ à l'infini est une onde plane (Σ_M) modulée par l'amplitude $U(x,y)$ et inclinée de l'angle $\theta = y/f$



$$\Sigma_M(v) = U(x, y) \cdot e^{2\pi i \cdot \frac{yv}{\lambda f}}$$

Diffraction à l'infini par un objet éclairé par une onde plane

→ L'amplitude totale rayonnée à l'infini est la somme des contributions individuelles de tous les points du champ

$$\tilde{U}(\mu, \nu) = \iint U(x, y) \cdot e^{\frac{2\pi i}{\lambda f} \cdot \nu y} \cdot dS$$

On reconnaît ici la relation de Fourier entre un objet et sa figure de diffraction à l'infini, conséquence directe du principe d'Huygens, lui-même revalidé par Maxwell

CAS SIMPLE : UN OBJET SINUSOÏDAL

→ Soit un objet d'amplitude sinusoïdale éclairé par une onde plane. On a :

- $U(x,y)=1+\cos(2\pi y/p)$

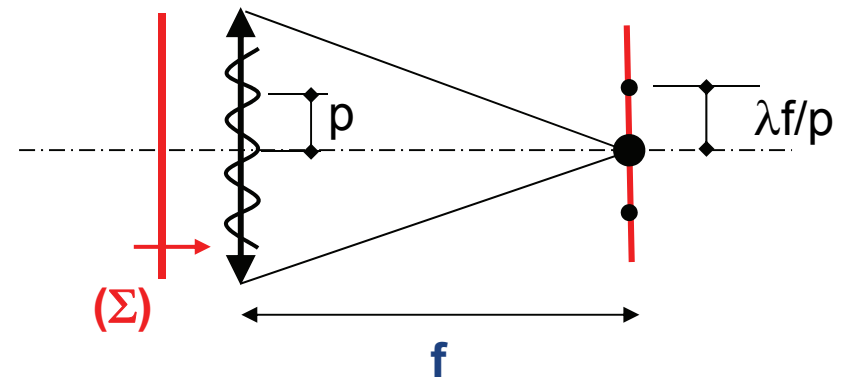
→ La figure de diffraction à l'infini consiste en 3 points séparés de $\pm\lambda f/p$

- Facile à intuiter si on développe $U(x,y)$ sous la forme

$$U(x,y)=1+1/2 [\exp(2\pi iy/p)+ \exp(-2\pi iy/p)]$$

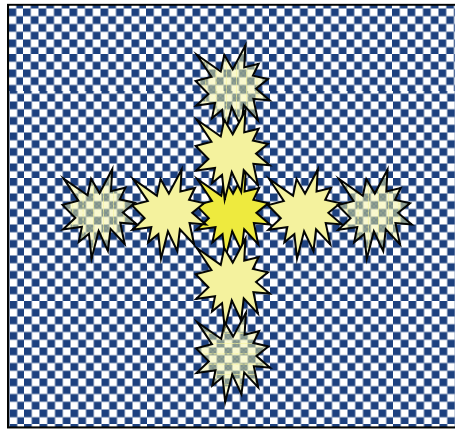
(L'objet est constitué de 3 ondes planes qui génèrent 3 points à l'infini)

→ Pas besoin d'évoquer ici Huyghens, Maxwell *et al.* : c'est l'expérience des franges d'Young, à l'envers



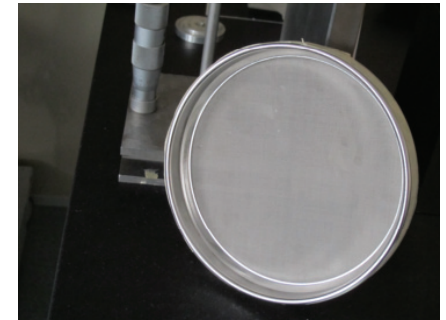
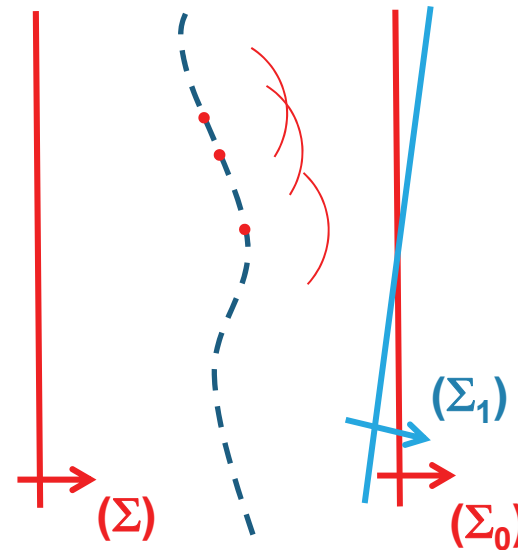
EXEMPLES AU QUOTIDIEN

→ Diffraction par un rideau



Lorsqu'on observe une source ponctuelle (phare, lampe, etc.) à travers un rideau, l'objet semble accompagné de « ghosts », d'autant plus écartés que le tissage est fin

→ L'atténuateur à grille ZYGO



Chaque ouverture de la grille diffracte une onde sphérique. Les ondes transmises interfèrent (à $\pm n\lambda$ près) et reconstituent des ondes parfaitement planes quelle que soit la planéité de la grille (les offset de phase « avant » se compensant « après ») : l'atténuateur placé dans la cavité n'affecte pas la précision des mesures

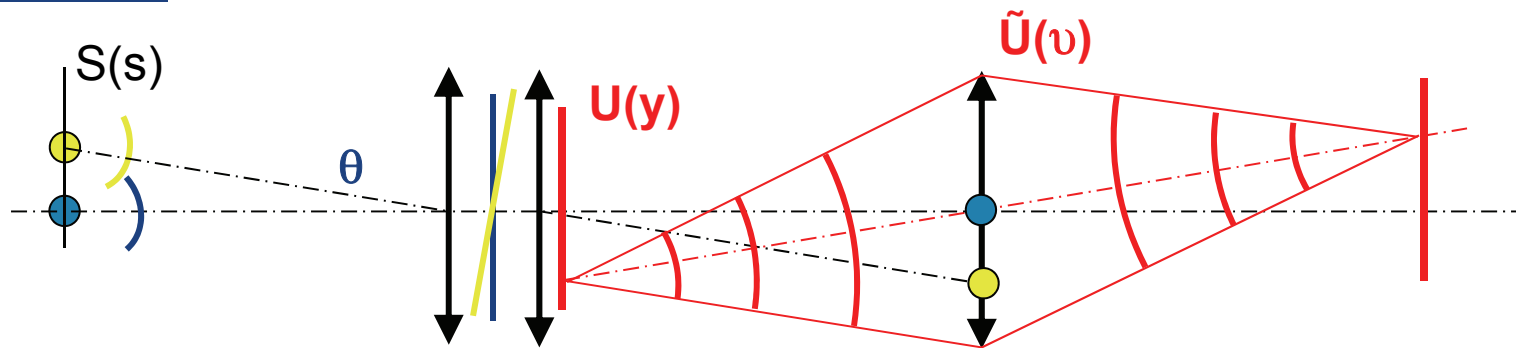
Extension à un source étendue

→ Cas d'une source étendue

- Soit $S(s)$ l'intensité d'un point dans la source à la hauteur s
- Sa contribution à l'amplitude dans le plan objet = $S(s) * \exp[(2\pi isy/\lambda f)] * U(y)$
- Dans l'espace de Fourier (pupille), l'amplitude correspondante est égale à :

$$S(s) \cdot \tilde{U}(v) \otimes \delta(v-s) = S(s) \cdot \tilde{U}(v-s)$$

→ En sommant sur la source, on trouve le résultat suivant : l'éclairement dans la pupille du PO est égale à l'image de la source convoluée par la TF de l'objet



Recap : Expression générale de l'image aérienne

→1 : Amplitude dans la pupille d'entrée

$$E_{Entrance_Pupil}(\xi, \psi) = TF[O(x, y)] \otimes Source(\xi, \psi)$$

→2 : Prise en compte de la contribution du PO

- Limitation de l'extension spatiale de la $E_{Entrance_Pupil}$ par le « stop » physique, + éventuellement vignetting dans le champ
- Terme de phase correspondant aux aberrations du PO

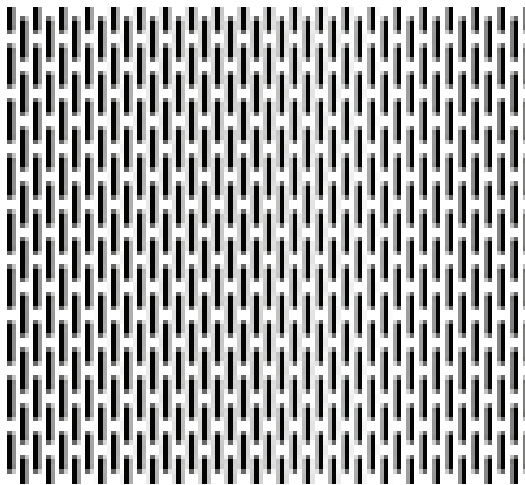
$$E_{Exit_Pupil}(\xi', \psi') = E_{Entrance_Pupil}(\xi, \psi) \cdot T(\xi, \psi) \cdot e^{-2\pi i \frac{WFE(\xi, \psi)}{\lambda}}$$

→3 : L'amplitude dans le plan image est la TF de l'amplitude dans la pupille de sortie

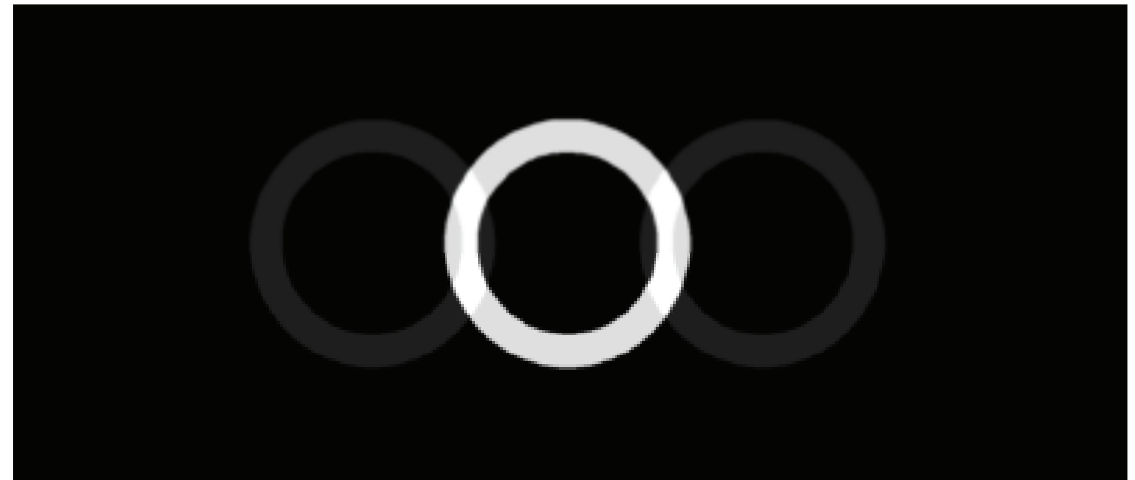
$$O(x', y') = TF[E_{Exit_Pupil}(\xi', \psi')]$$

Travaux pratiques : CODE V avec l'option LUM

- L'objet est un masque de lithographie (motif de DRAM en « brick wall »). L'éclairement est annulaire
- L'objet étant quasiment périodique, il n'y a que 3 ordres diffractés dans la pupille d'entrée de l'optique de projection (moins de 5% d'énergie dans les ordres supérieurs)



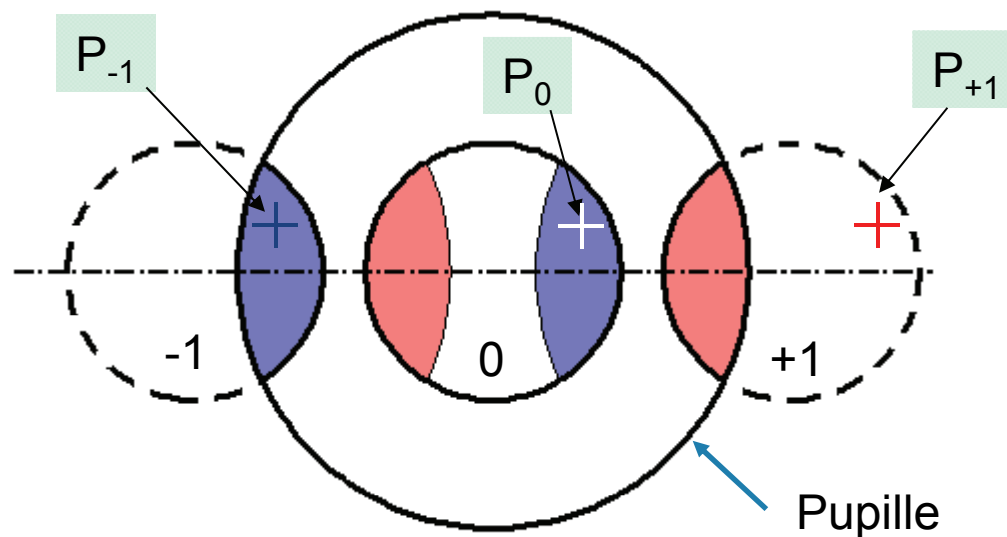
Objet



Distribution d'énergie dans la pupille d'entrée de l'optique de projection

La FTM est une mesure de cohérence dans la Pupille

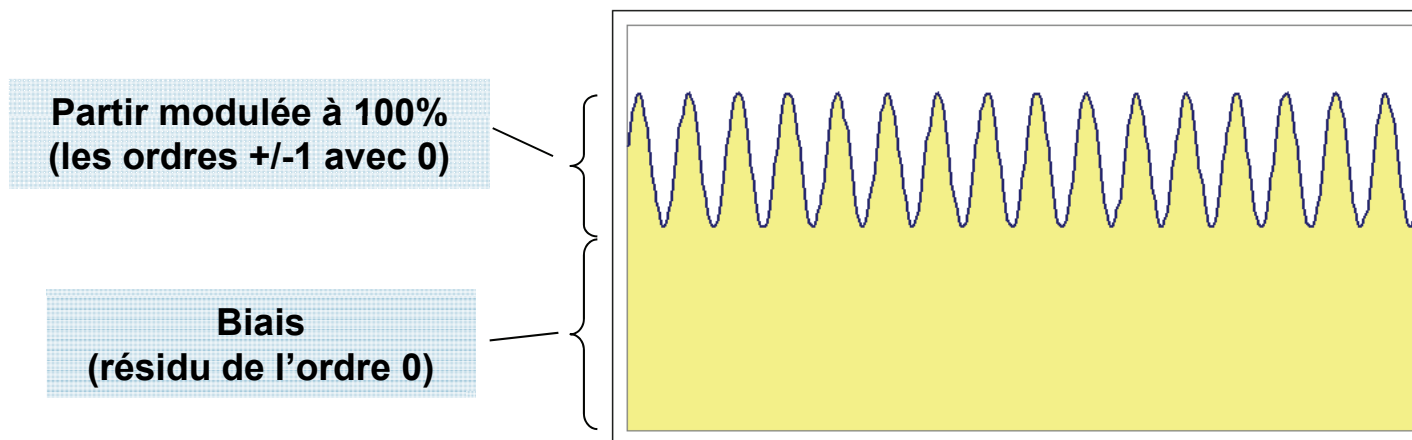
- Lors de la formation d'image d'un objet sinusoïdal, chaque point « P » de la source est diffracté dans les ordres 0 et +/-1 (soient P_{-1} , P_0 et P_{+1})
- Les points homologues sont cohérents les uns avec les autres
- Les parties des ordres -1 et +1 transmises par la pupille interfèrent avec leurs homologues de l'ordre 0 : elles forment dans le plan image une figure d'interférence de contraste 100%
 - Ici, P_{-1} et P_0 interfèrent entre eux, tandis que P_{+1} est « perdu »
- Le reste de l'ordre 0 n'interfère avec rien et ne crée que du biais uniforme



PS : schéma et interprétation retrouvés depuis, quasiment à l'identique, dans la thèse de Nassima Zeggaoui (2011)

La FTM est une mesure de cohérence dans la Pupille

- Dans le plan image, l'image aérienne est constituée de 2 termes : une figure d'interférence due aux parties cohérentes des ordres +/-1 avec leurs homologues de l'ordre 0, et un biais uniforme (le résidu de l'ordre 0 non affecté)
- Le contraste effectif est égal au rapport des contributions de ces deux termes : on peut assimiler la FTM au « taux de cohérence » dans la pupille



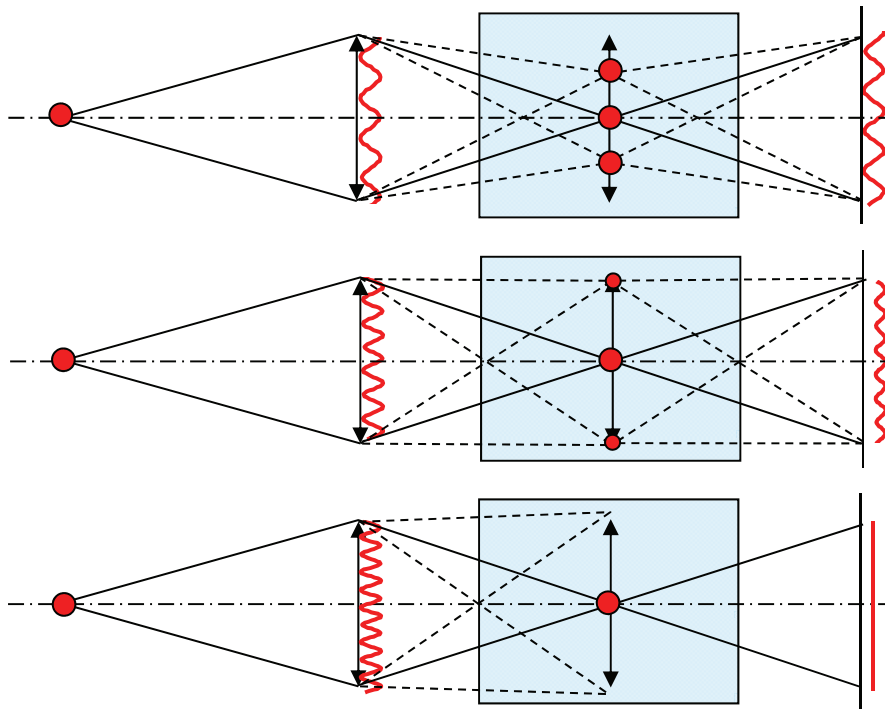
- On voit apparaître intuitivement la notion d'autocorrélation de la pupille, la partie modulée étant proportionnelle au taux de transmission des ordres +/- 1 dans la pupille

/03/

RÔLE DE LA COHÉRENCE SUR LA RESOLUTION

Résolution et Cohérence : cas d'un objet sinusoïdal

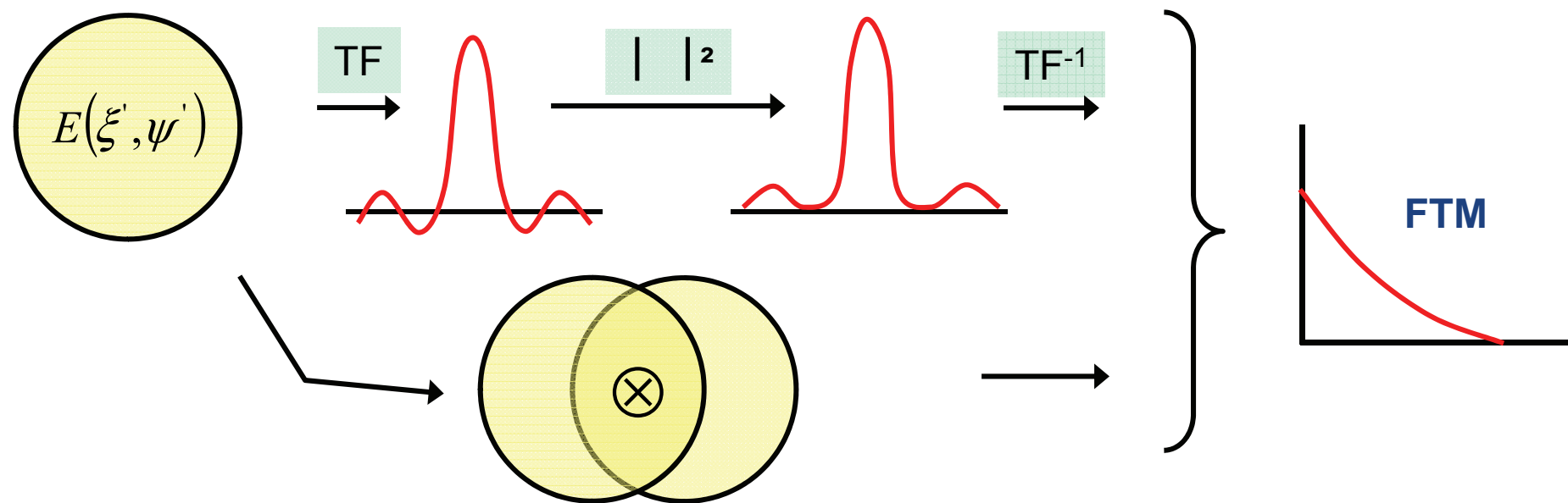
→ On peut évaluer qualitativement l'évolution du contraste de l'image avec la fréquence spatiale de l'objet (FTM), dans le cas d'une source quasi ponctuelle



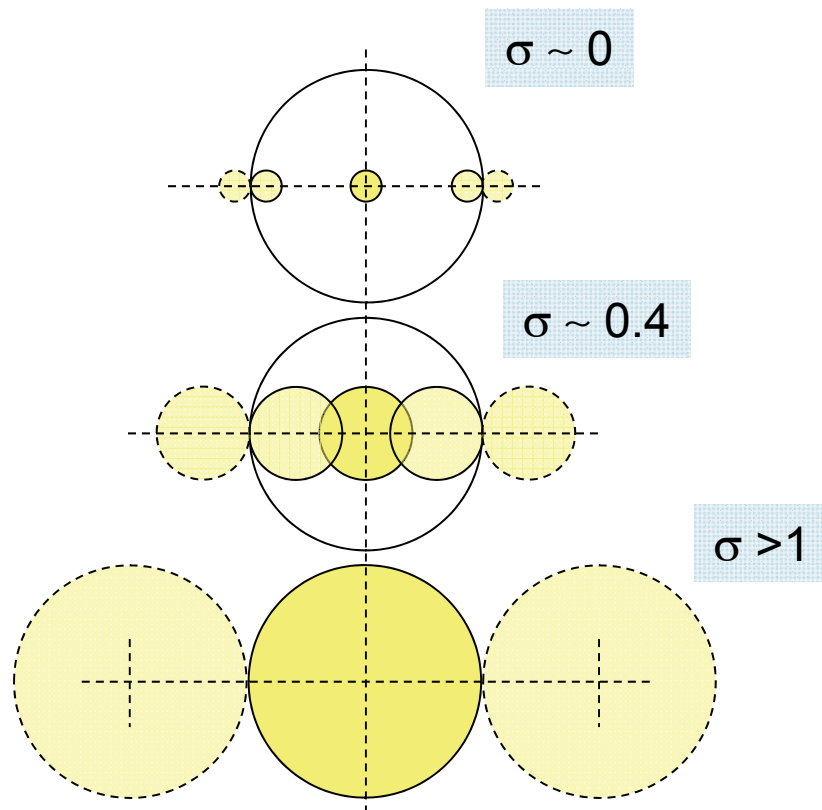
- Aux basses fréquences, les distributions d'énergie dans les pupilles de sortie et d'entrée du PO sont identiques : tout passe, et l'image est identique à l'objet (FTM = 1)
- A partir d'une certaine fréquence, les ordres ± 1 vignettent en bord de pupille : les interférences ne sont plus totalement constructives et le contraste chute (FTM < 1)
- A une fréquence limite, les ordres ± 1 ne passent plus. Il n'y a plus d'interférence dans le plan image, et la modulation est nulle (FTM = 0)

Cohérence et FTM : cas général (résumé *très rapide...*)

- On définit la PSF (Point Spread Function) comme la réponse impulsionnelle de l'optique considérée comme un système linéaire (cf. les équivalents électrique, mécanique, etc.)
- La FTM, « fonction de transfert » du système, est la TF de la PSF
- Comme la PSF est égale au carré de la TF de la fonction pupillaire, on trouve que la FTM est égale à la fonction d'autocorrélation de la pupille

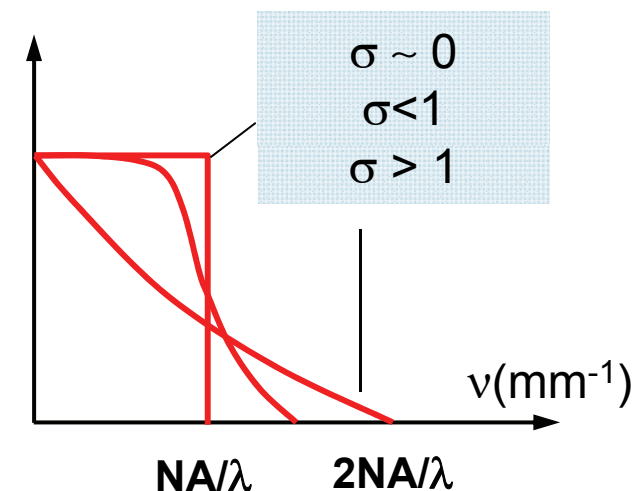


Cohérence et FTM : cas de l'éclairage conventionnel



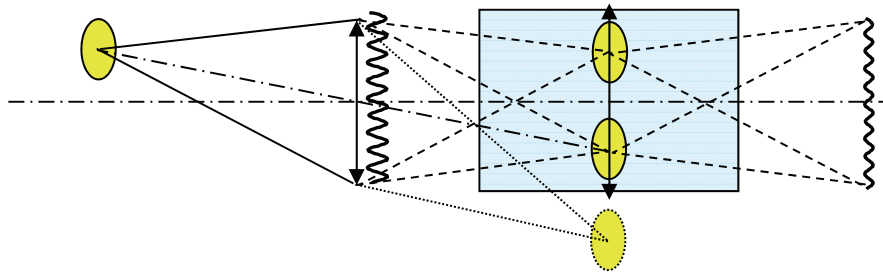
→ La sensibilité de la FTM à la cohérence de la source est illustrée ci-contre pour un éclairage conventionnel à divers « σ »

- Le facteur de cohérence « σ » de la source d'une optique de projection peut être adapté au contenu fréquentiel de l'objet



OFF-AXIS ILLUMINATION

→ Il est possible d'augmenter la fréquence de coupure en adoptant une illumination hors d'axe

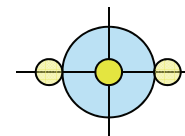
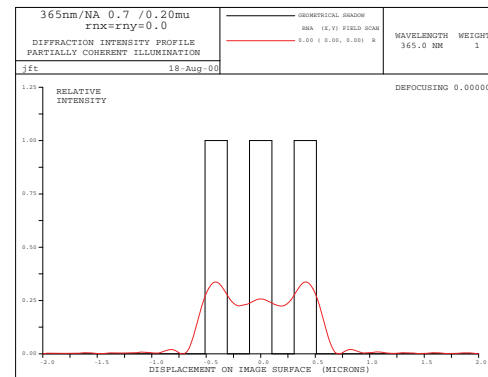


- Une source hors d'axe permet de placer les ordres 0 et 1 en bord de pupille. On laisse passer des fréquences bien supérieures à celles permises par le cas centré
- On peut aller jusqu'au double (cas $\sigma \sim 0$)
- N'est efficace que dans une direction

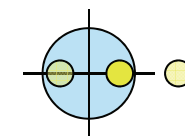
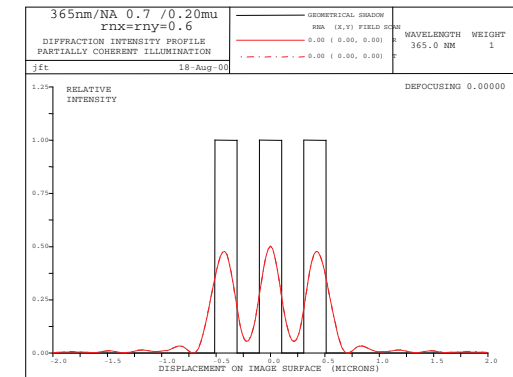
▪ Exemple de simulation CODE V (PAR) : à la fréquence de coupure, on n'a plus de contraste avec une source centrée. On récupère la situation en la décalant latéralement

▪ A cause du rapport 2 entre les amplitudes des ordres transmis, le contraste est limité

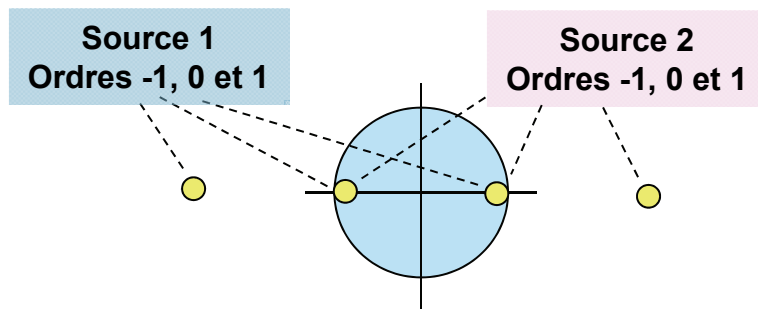
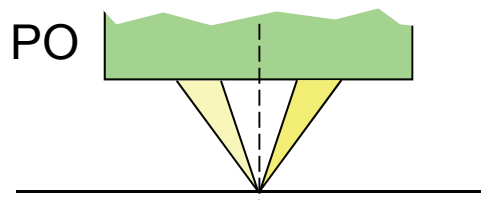
14:20:09



14:10:54



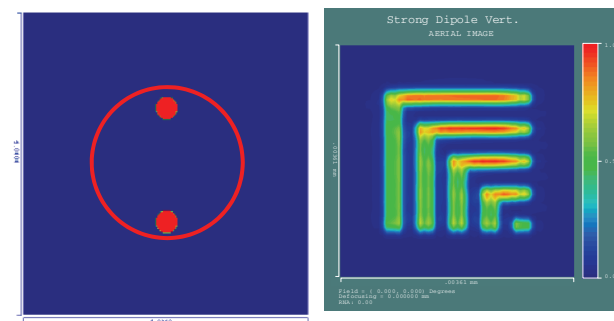
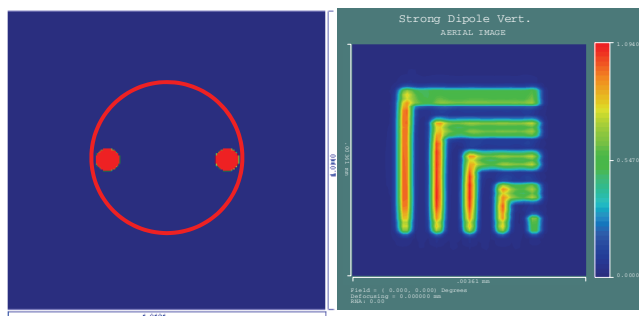
Eclairement dipolaire



→ Une configuration en dipôle permet de restaurer la symétrie d'éclairement dans la pupille

- Du fait de la dissymétrie des amplitudes (rapport 2 entre ordre 0 et ordre +1) dans la pupille, le centroïde des images aurait été sensible au focus(=> pb d'overlay)

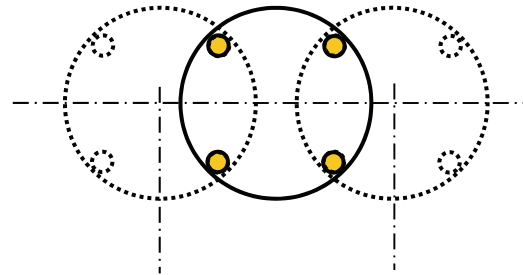
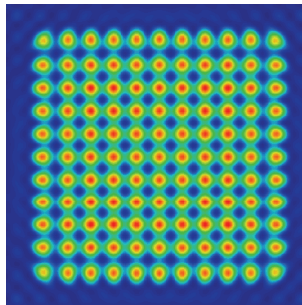
→ On atteint la résolution ultime de la lithographie optique (limitée à une seule direction de traits)



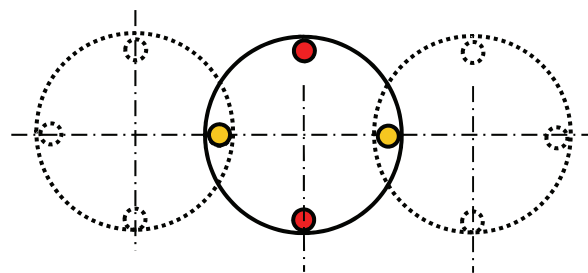
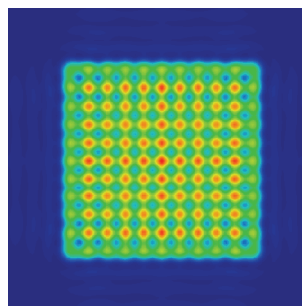
Eclairement quadripolaire

→ L'illumination en quadropole permet de gérer les 2 orientations en une seule exposition

CD = 95nm



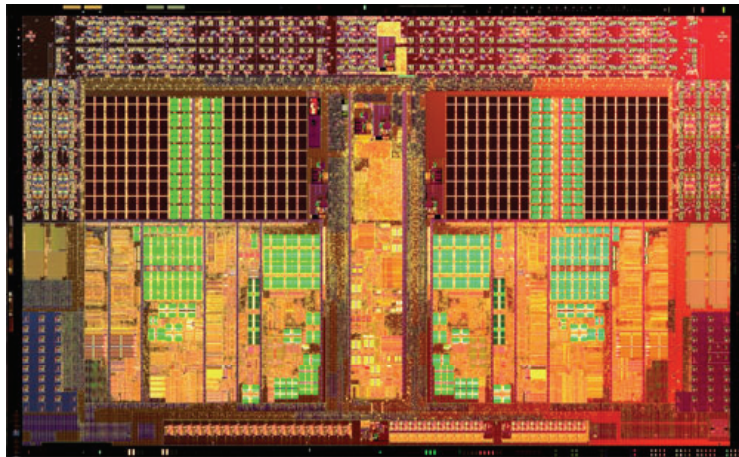
CD = 75nm



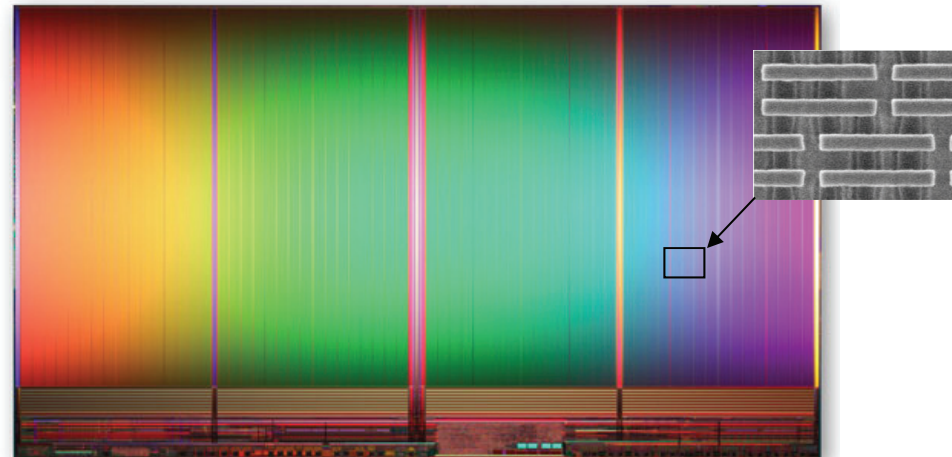
- Moins radicale qu'un dipôle, cette configuration permet d'augmenter la résolution jusqu'à $\lambda/\sqrt{2}NA$
- Contraste élevé jusqu'à la coupure (bon overlap des ordres)
- Configuration la plus agressive (sources le plus écarté possible)
- Résolution jusqu'à $\lambda/2NA$, mais faible contraste : dans chaque direction, seuls deux pôles sur 4 contribuent au contraste

Comparaison : Logique vs. RAM

- Les circuits logiques contiennent une grande diversité de pitches. On est donc limité à des éclairagements annulaires ou quadripolaires relativement peu agressifs
- Pour la RAM, la situation est très différente, et des éclairagements quadripolaires extrêmes sont possibles
 - Ce sont d'ailleurs des procédés et des industries totalement distincts



Logique (100\$)



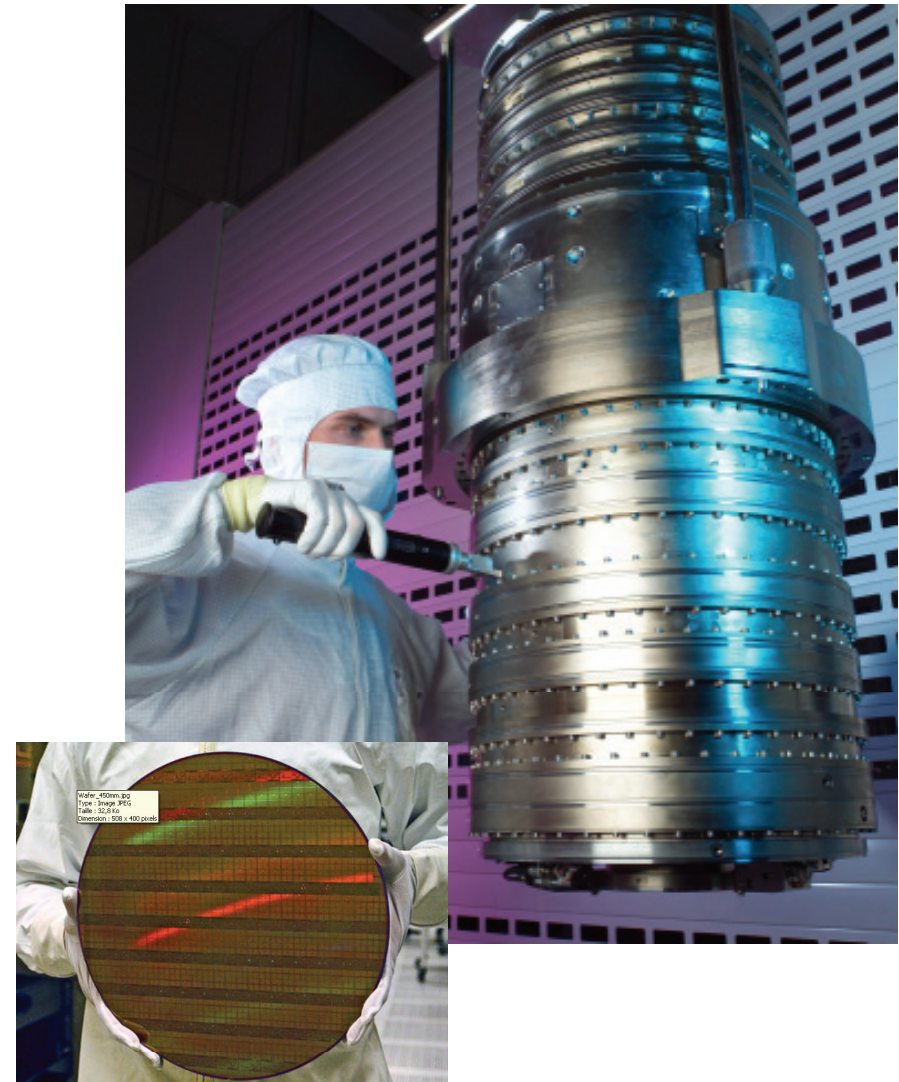
RAM (5\$)

/04/

Application à la Lithographie

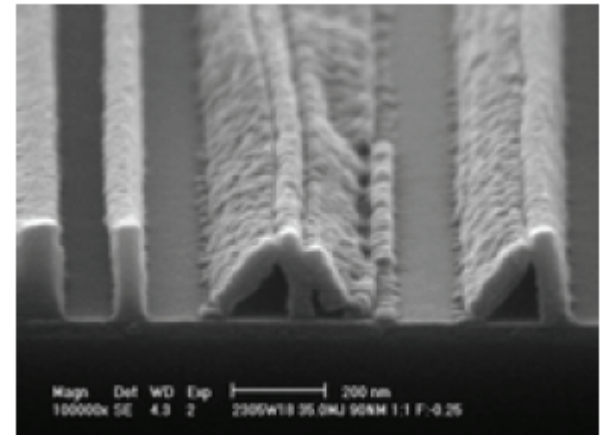
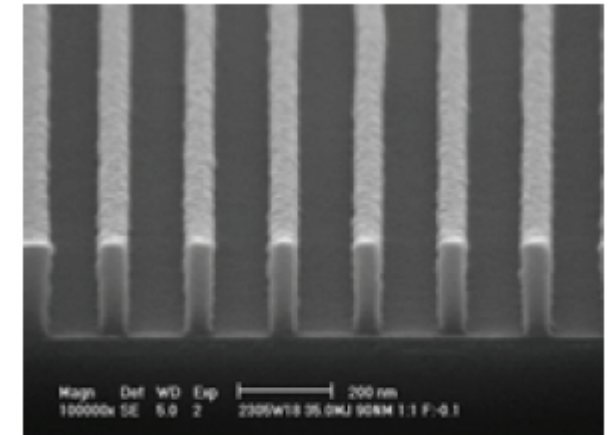
Formation d'image et Lithographie

- La Microlithographie est le procédé au cœur de la fabrication des circuits intégrés (semi-conducteurs)
- C'est essentiellement un procédé optique, où l'image d'un masque est projetée en réduction sur un wafer de silicium recouvert d'une couche de résine photosensible
- Compte tenu des précisions de gravure actuelles (on compte aujourd'hui en nanomètres), la compréhension des conditions de formation de l'image aérienne est critique pour cette industrie, et donne lieu à de nombreux développements



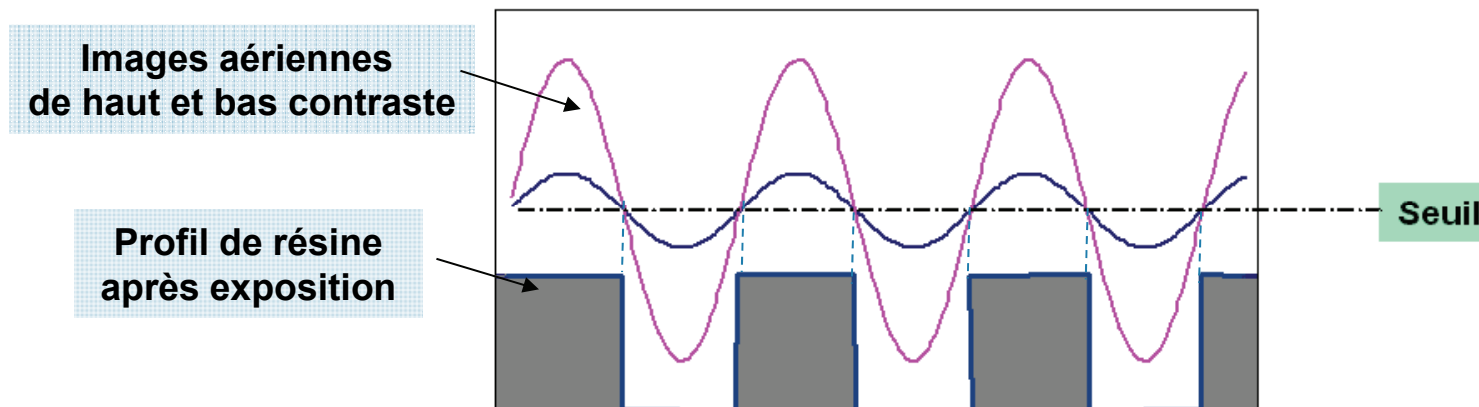
Formation d'image et Lithographie

- C'est essentiellement un process non-linéaire. On imprime au-dessus d'un seuil d'éclairement donné (la « dose to clear ») : ça imprime ou pas
- Dans ces conditions, assimiler le système de projection à un système linéaire (explicite dans le concept de FTM) peut sembler inapproprié pour décrire ce qui se passe dans la résine
- Il est nécessaire d'établir des passerelles entre les métriques des « Lithographes » et des « Opticiens »
 - Les Opticiens ont leur métrique particulière (WFE, « Zernikes »), qui leur est indispensable dans leurs activités de design, de métrologie et de mise au point (« lens tuning »)
 - Des passerelles existent entre les Opticiens et les Lithographes (ex : CODE V vs. Prolith), mais en dernière analyse les performances d'un « tool » seront toujours validées *in situ*, en exposant des wafers



Formation d'image et Lithographie

- En Optique classique, la FTM est une mesure de la quantité d'information contenue dans une image
 - Dans le Spatial ou le Militaire, les FTM dimensionnent la résolution au sol, les portées (détection/reconnaissance/identification), etc. : elles doivent être maximales
- En Astronomie, les instruments sont d'autant plus performants que le diamètre d'énergie encerclée est réduit
- En Lithographie, la FTM (ou la PSF) ne semble pas, *a priori*, une métrique pertinente : deux images aériennes de contraste différent peuvent être équivalentes vis-à-vis de ce qui est imprimé dans la résine



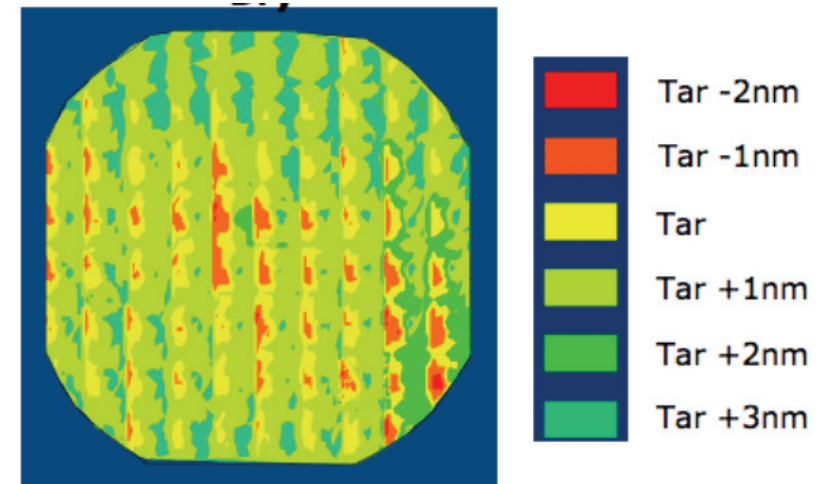
Définition de la « Critical Dimension » (CD)

- La principale métrique en lithographie est la Critical Dimension (« CD ») ie. le plus petit motif qui peut être imprimé à l'intérieur de tolérances de fabrication données : la Process Window (« PW »)*
- Le CD est défini par la diffraction (le terme en λ/NA) ainsi que par un terme lié au process (k_1), d'autant plus petit que les procédés mis en œuvre sont sophistiqués. C'est la relation dite « de Rayleigh »

$$CD = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

(*) La PW est définie par la tolérance sur le niveau d'éclairement, l'« Exposure Latitude » (EL) et par la tolérance sur la profondeur de champ exploitable « Depth of Focus » (DOF), nécessaires à maintenir l'uniformité du CD (« CD uniformity », ou CDU) à l'intérieur d'une plage donnée

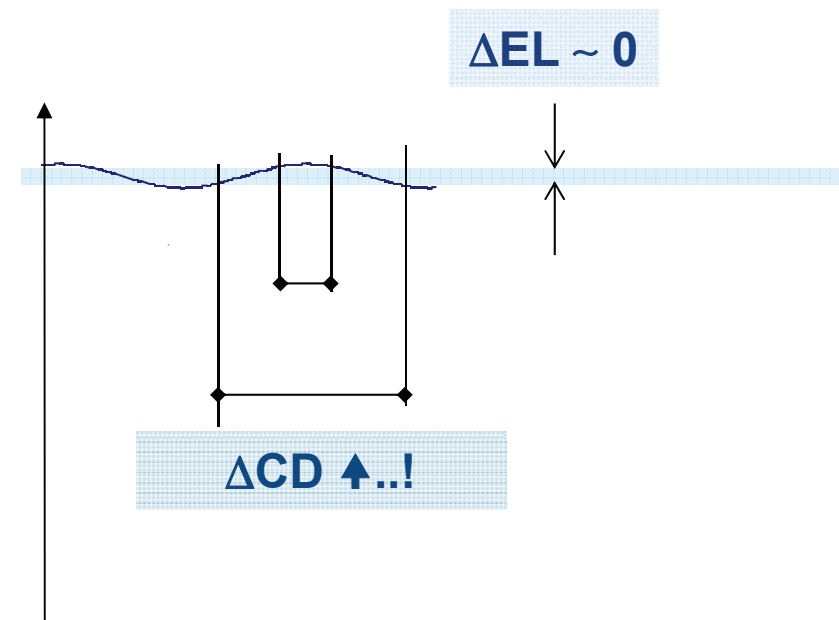
Ci-contre la cartographie d'un wafer gravé en 32nm : l'uniformité du CD est meilleure que $\pm 2nm$)



CDU @ 32nm

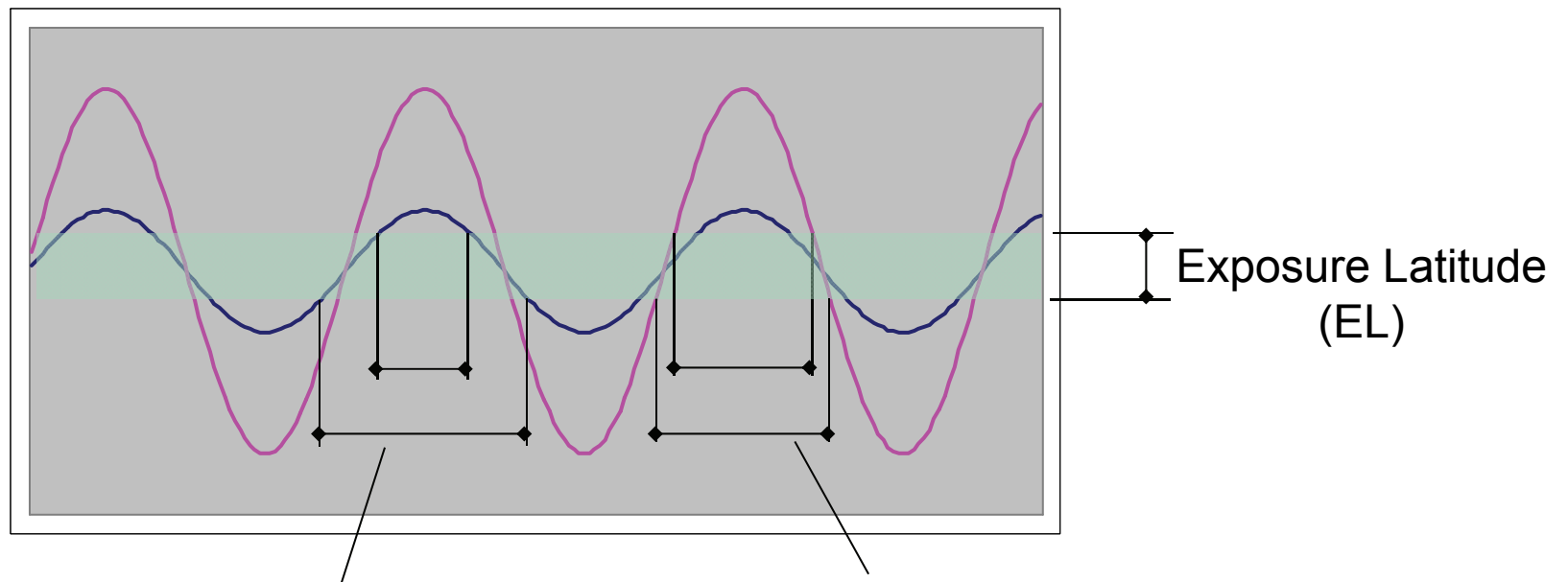
Process Window et FTM

- A la limite, d'après « Rayleigh », on pourrait imprimer du 100nm avec un « vieux » stepper KrF (248nm), à 0.65NA et un k_1 de 0.26
- Avec un contraste quasi nul et sans aucune « Exposure Latitude », on subirait quand même de considérables variations de CD (si tant est qu'on puisse imprimer quoi que ce soit dans ces conditions)
- Vis-à-vis de l'exigence d'une Process Window réaliste, par exemple une ΔEL de $\pm 5\%$ et un ΔCD de $\pm 10\%$, c'est totalement inenvisageable
- Le concept « optique » de FTM est adéquat pour reformuler ce comportement



Process Window et FTM

→ La dimension de la Process Window est directement liée à la FTM de l'Optique de Projection



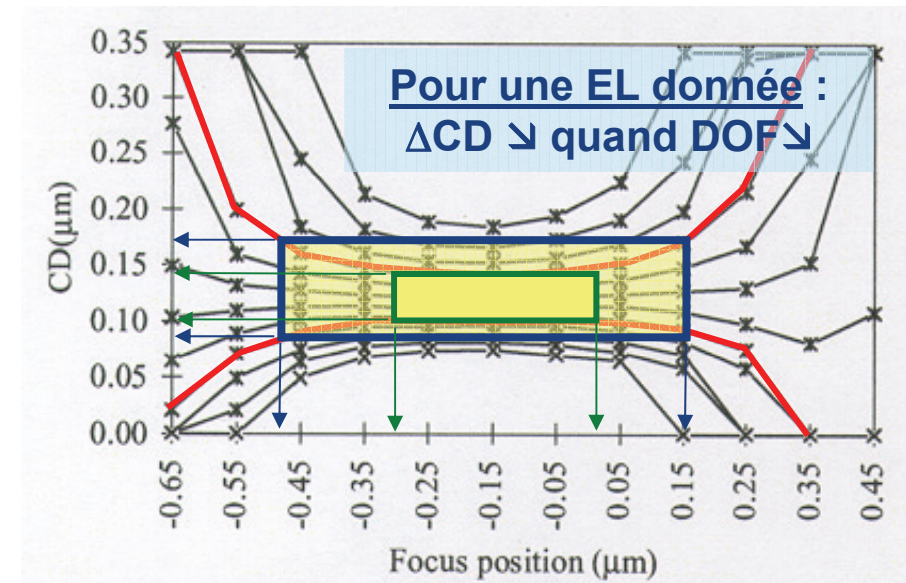
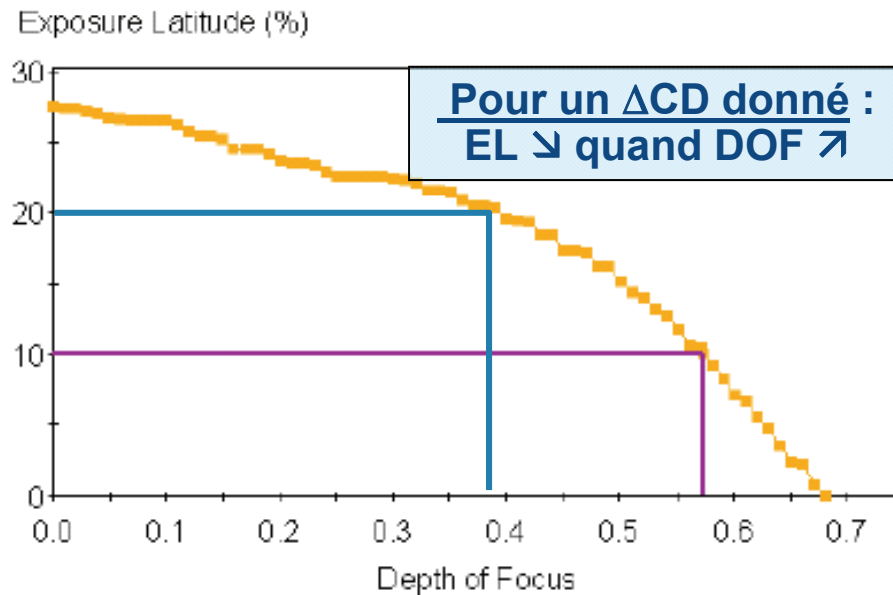
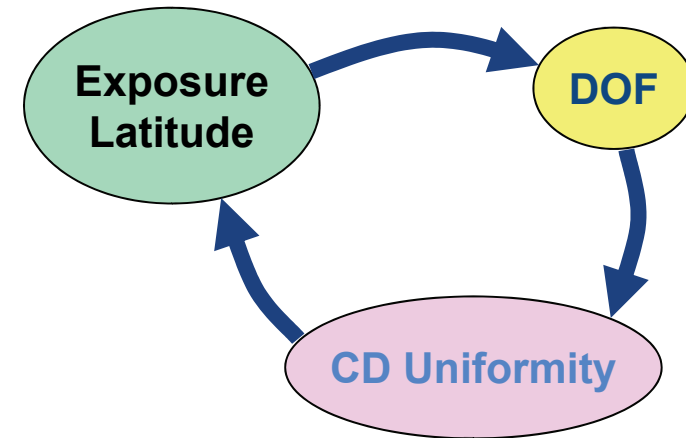
▪ Un faible contraste offre peu de tolérance à l'Exposure Latitude

▪ Avec un contraste élevé, le CD est moins sensible à une variation de dose

Le “Paradigme du Lithographe”

→ Ainsi, les 3 paramètres clef de la Lithographie sont interdépendants : le 3ème est imposé par les 2 autres

- Cette dépendance est bien connue des Lithographes. Sa reformulation en termes d’Optique (FTM) permet de remonter à sa signification « physique »

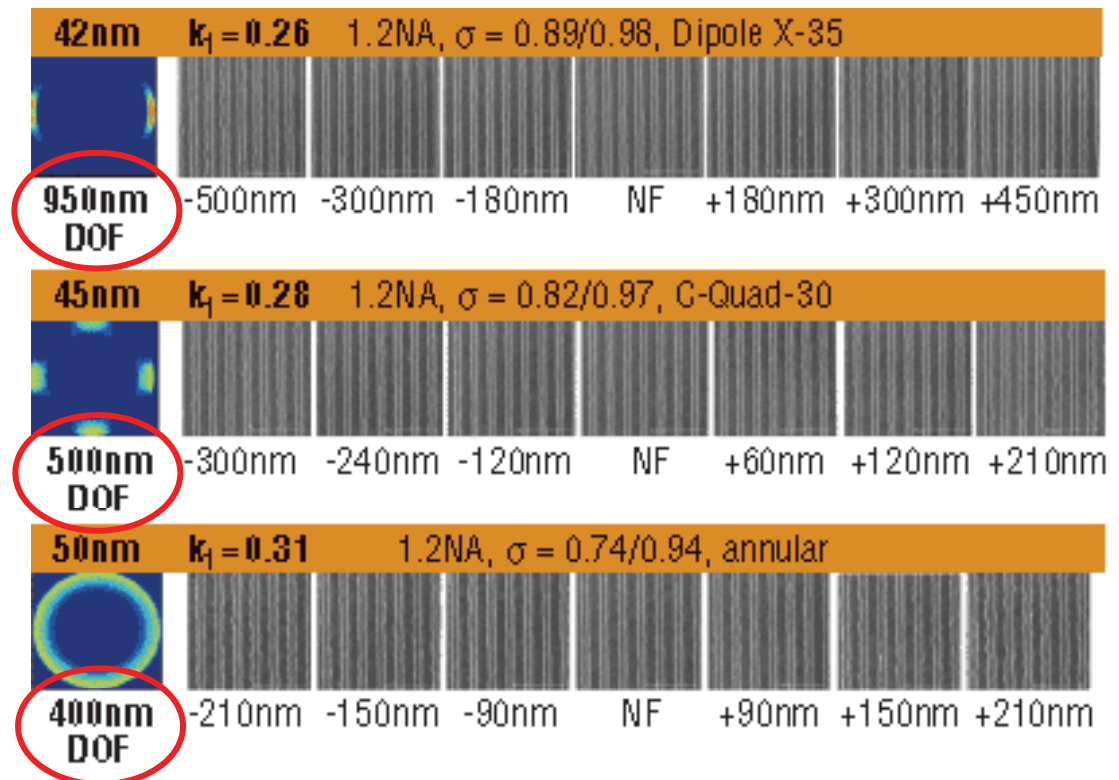


Influence de l'illumination sur la DOF (Depth of Focus)

→ C'est bien parce que la FTM est directement corrélée à la Process Window qu'une optimisation de l'illumination se traduit favorablement sur la DOF

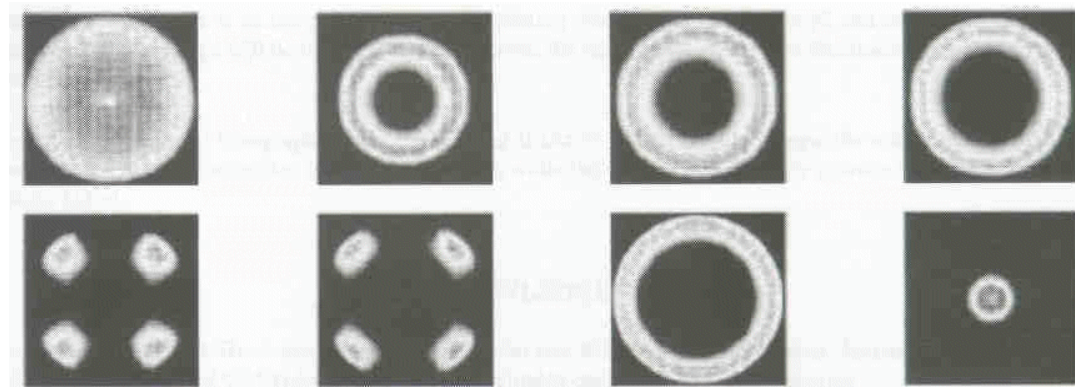
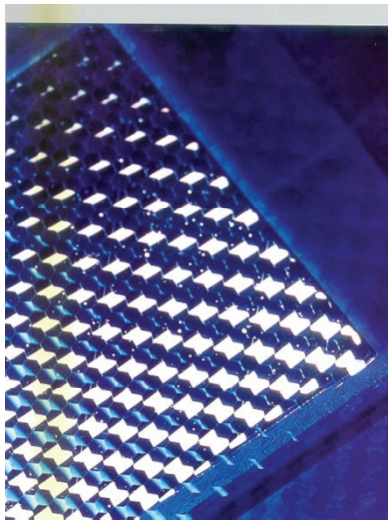
- Si on ne passait pas par la notion de FTM, la relation Illumination vs. DOF n'aurait rien d'intuitif...

→ Dans l'exemple ci-contre, on passe d'une DOF de 400nm en simple éclairage annulaire à 950nm via un dipôle « agressif »



Mise en œuvre des divers types d'illumination

→ Dans un scanner de lithographie, les différents profils de source sont générés par un jeu d'optiques diffractives (DOE) localisées dans l'optique d'illumination



Quadrupole

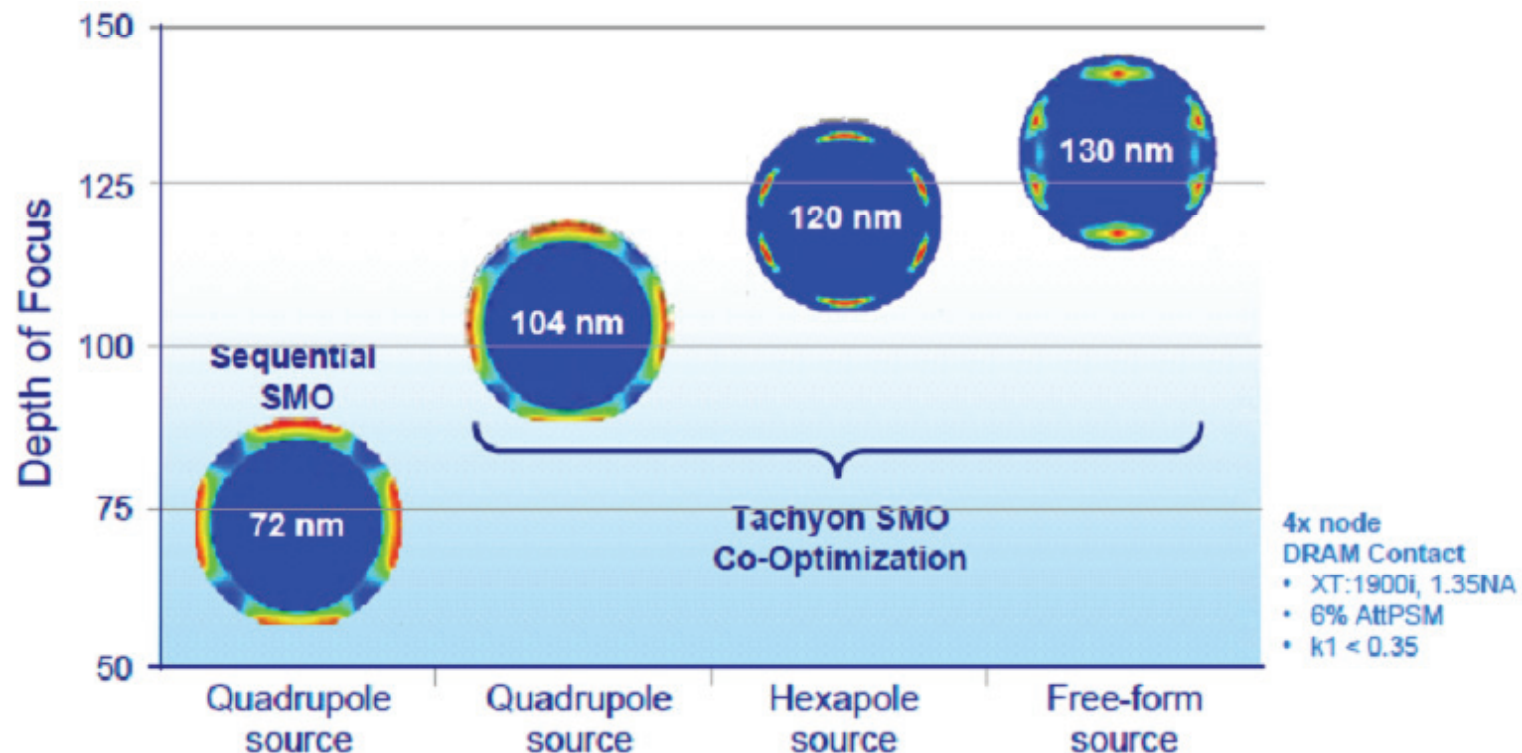
Annulaire

Conventionnel
(petit σ)

Simultaneous source mask optimization (SMO)

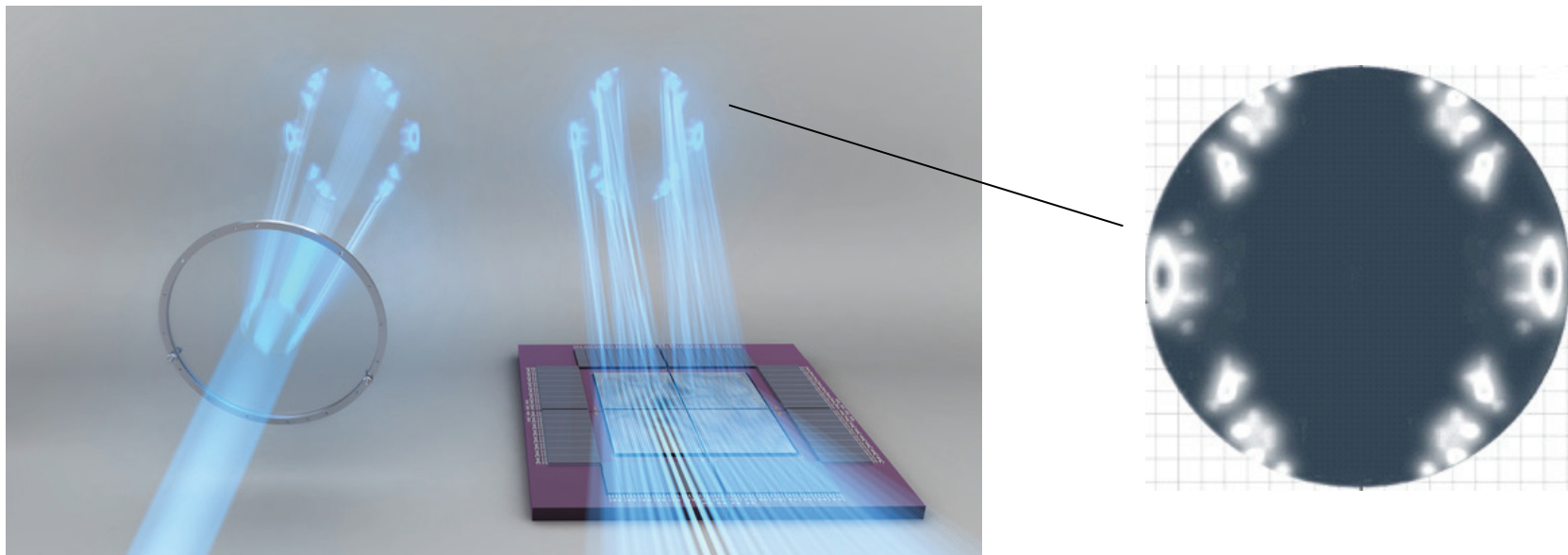
→ Depuis peu, on en vient à réaliser des illuminations « free-form » adaptées au plus près à un masque spécifique

- Voir ci-dessous un exemple pour un CD ~ 50nm



Simultaneous source mask optimization (SMO)

- Les optiques diffractives ne permettent que des types de patterns limités : dipôles, anneaux, quadripôles, etc.
 - Les « customs » sont hors de prix
- Des dispositifs peuvent générer des géométries d'éclairage sophistiquées (comprenant des niveaux de gris) en reconfigurant l'illuminateur « à la demande »



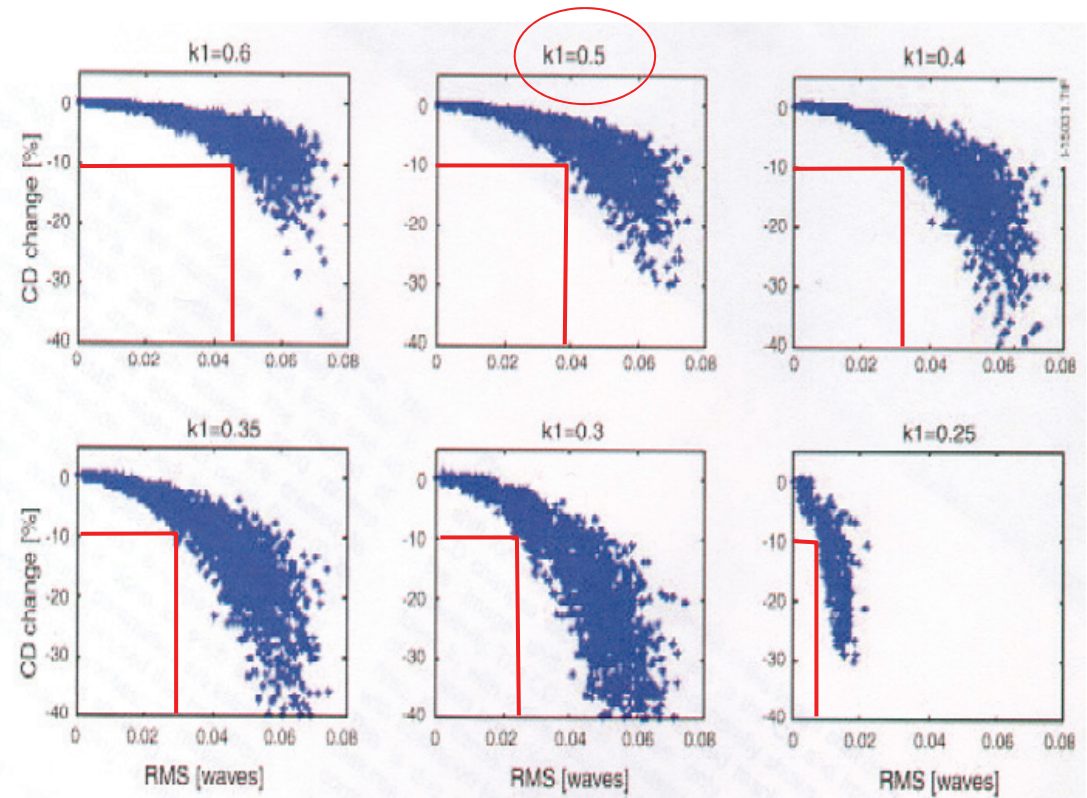
/05/

Aberrations, Résolution et Illumination

Rôle des aberrations sur la Résolution

→ L'effet des aberrations sur le CD peut être évalué pour diverses valeurs de k_1

- On perturbe aléatoirement la surface d'onde sur les 36 premiers coefficients de Zernike (Monte Carlo)
- $k_1 = 0.5$: un ΔCD de 10% est compatible avec une WFE de 40 m λ
- $k_1 = 0.3$: il faut descendre en-dessous de 20 m λ pour imprimer
- $k_1 = 0.25$: seule une optique parfaite donne quelque chose



- On voit que le ΔCD dépend fortement de la distribution actuelle des Zernikes : une spécification en WFE globale est totalement inadéquate (cf. la très forte dispersion des nuages de points)
- Les conséquences d'un jeu de Zernikes donné dépend du type de motif (contact holes, dense L/S, etc.) et des conditions d'illumination : les spécifications d'une optique de projection doivent donc couvrir la totalité des configurations attendues

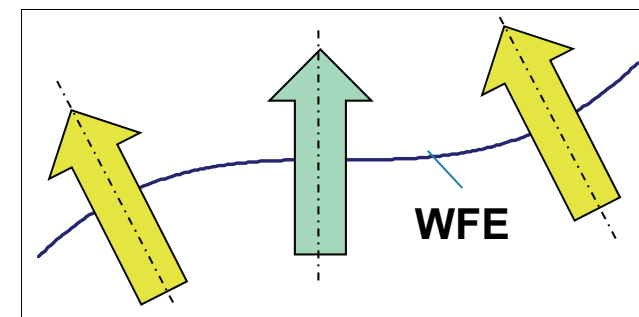
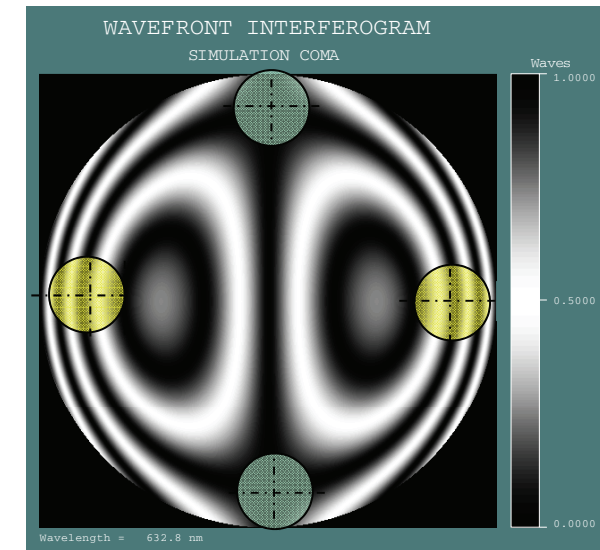
Rôle des aberrations sur la Résolution : la Coma

→ Soit un éclairage dipolaire en présence de Coma

→ L'influence sur l'overlay dépend de l'orientation du dipôle par rapport à la Coma (Z7/Z8)

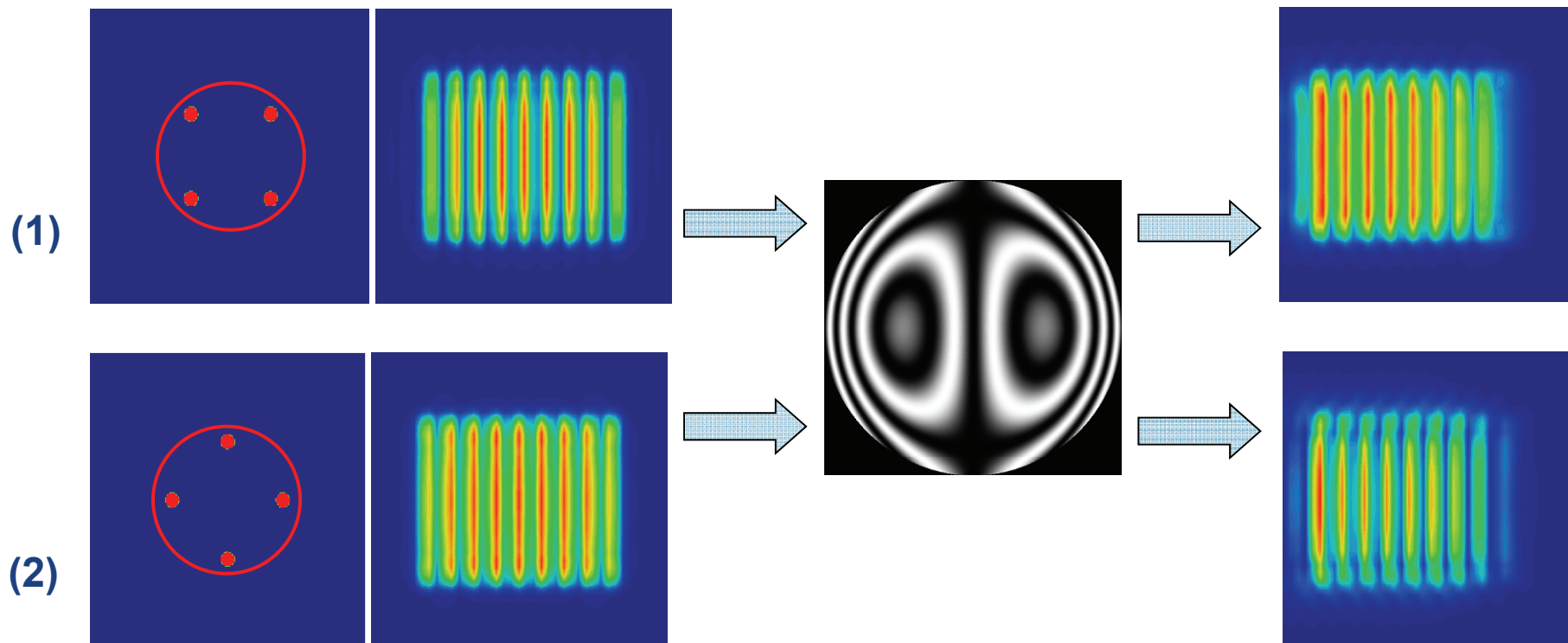
- En limite de résolution et en éclairage multi-polaire (90% des cas), l'énergie est concentrée en bord de pupille
- Le dipôle horizontal passe aux endroits de plus grande pente de la WFE : gros impact sur « l'overlay » et la résolution
- Le dipôle vertical est invariant en WFE et overlay

→ Ainsi, un écart aberrant donné a des conséquences différentes au niveau wafer selon la cartographie d'éclairage dans la pupille



Rôle des aberrations sur la Résolution : la Coma

- Pour un PO « parfait » la configuration (1) est moins favorable à la résolution, bien que le contraste y soit globalement meilleur que pour (2)
- En présence de coma la situation s'inverse, parce que les pôles horizontaux de (2) passent aux « mauvais » endroits dans la pupille



/06/

Les RET (Resolution Enhancing Technologies)

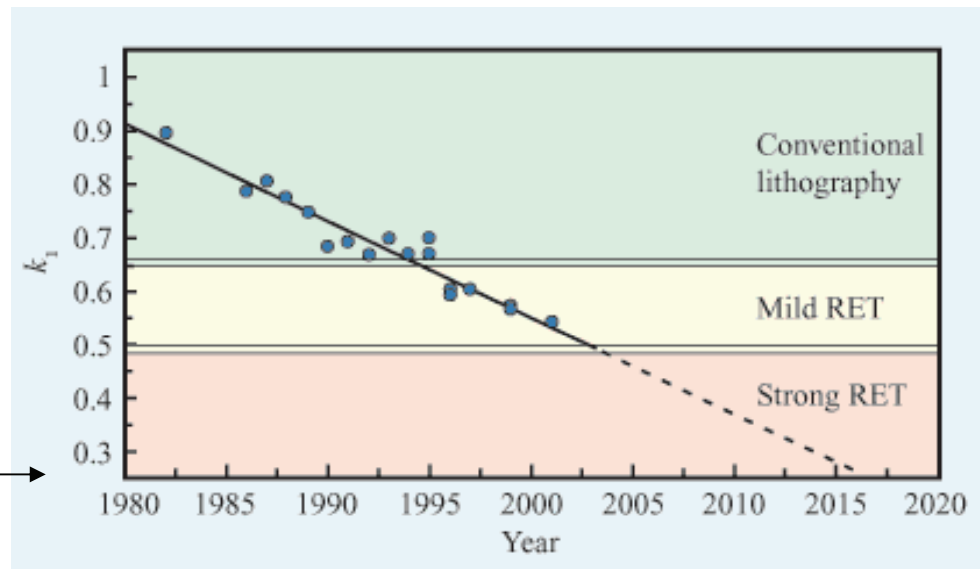
Resolution Enhancing Technologies

→ La « relation de Rayleigh » donne 3 « leviers » pour agir sur la résolution

- Diminuer la longueur d'onde : de $\lambda = 365\text{nm}$ (i-line) à 193nm (excimer ArF)
- Augmenter le NA : de 0.75 à 1.35 (objectifs à immersion)
- Diminuer le k_1

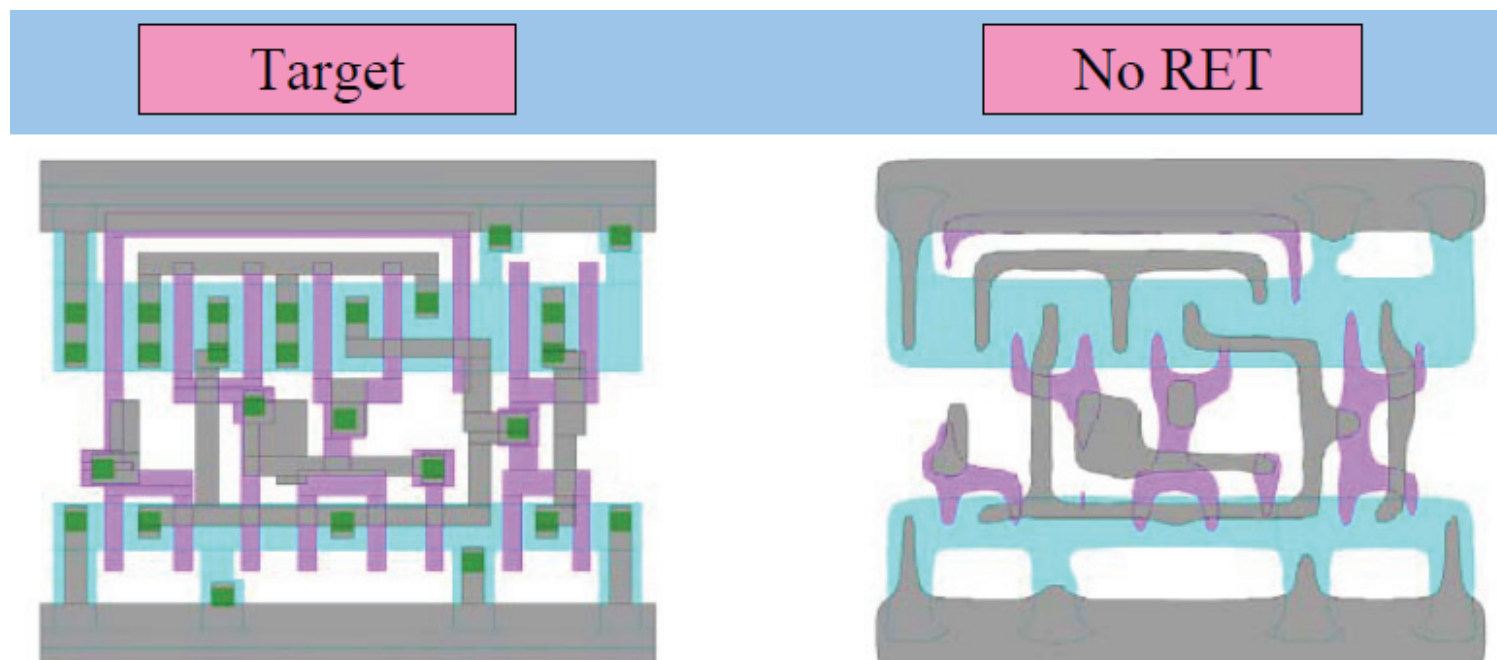
→ Passer en dessous de $k_1 \sim 0.6$ (Airy/Rayleigh) relève des Resolution Enhancing Technologies (RET)

$k_1 = 0.25$ correspond à une limite où plus aucune fréquence objet ne passe dans la pupille



Resolution Enhancing Technologies

- Aux faibles k_1 , les circuits sont infaisables avec de simples masques binaires : effets de proximité entre lignes, de « line-end shortening », « corner-rounding », etc.

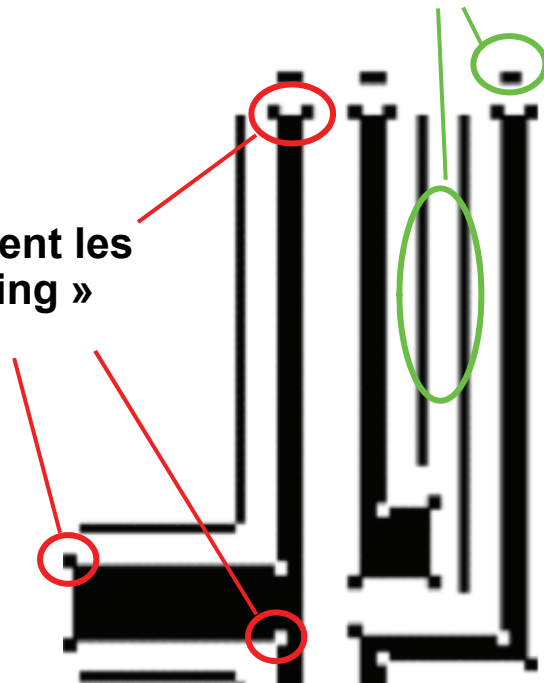


RET : Serifs et Sub-Resolution Assist Features (SRAF)

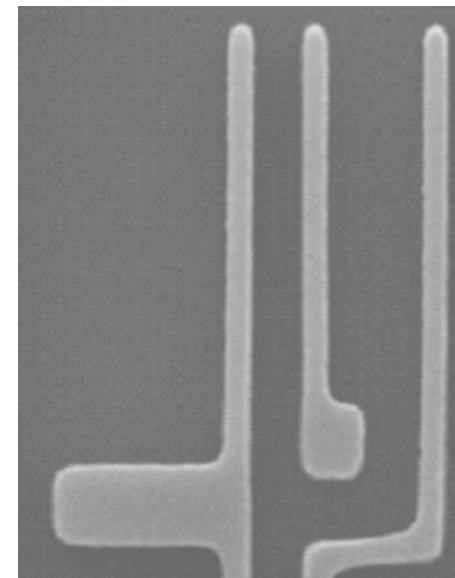
→ L' « Optical Proximity Correction » est une RET consistant en figures correctives de « pré-compensation » appliquées au niveau du masque

Des « sub-resolution assist features » réduisent les effets de proximité entre lignes et les « line-end shortening »

Des serifs réduisent les « corner rounding »

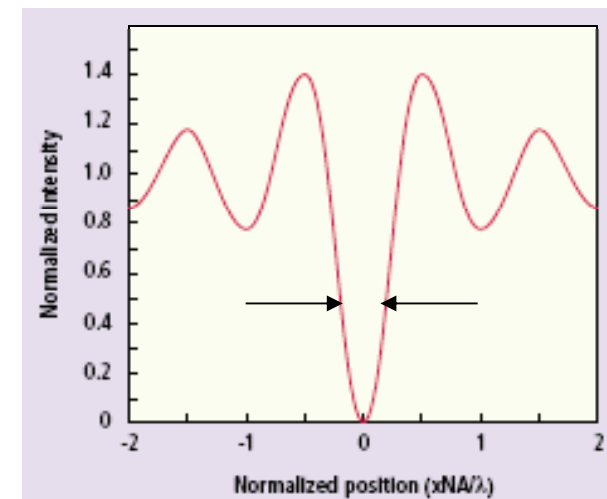
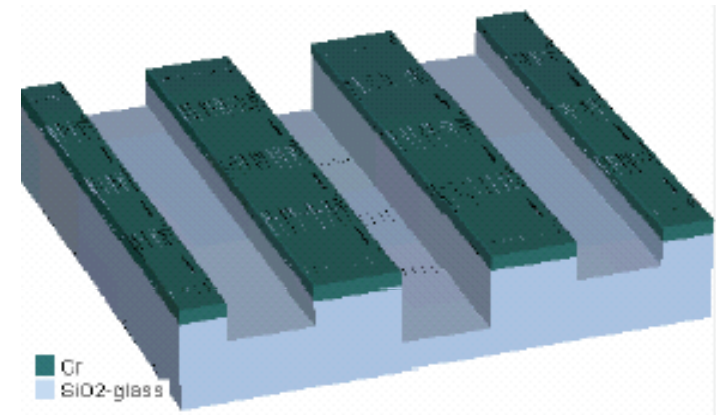
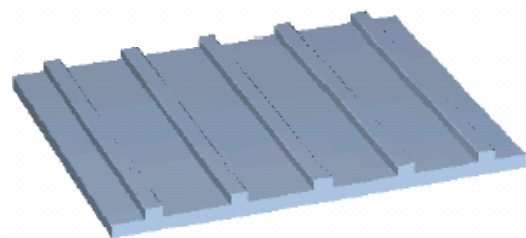


Après exposition, le motif obtenu est pratiquement parfait



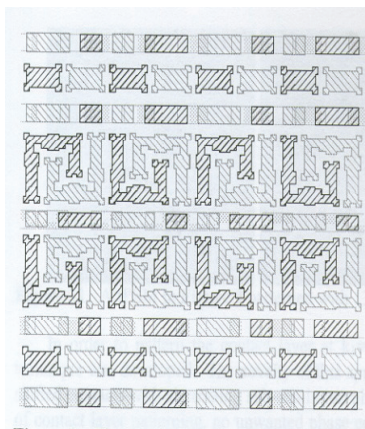
RET : Phase Shift Masks (PSM)

- Le masque peut être constitué de zones transparentes déphasées de 180° ($\lambda/2$)
- Au niveau de l'image, les contributions des zones s'annulent par interférences destructives, se traduisant par des lignes noires
- Dans certains exemples, il n'y a même plus de chrome entre les zones (« Chromeless Masks »)

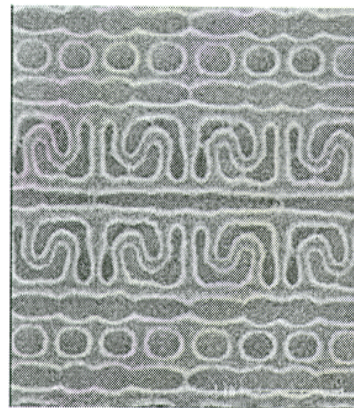


RET : Phase Shift Masks (PSM)

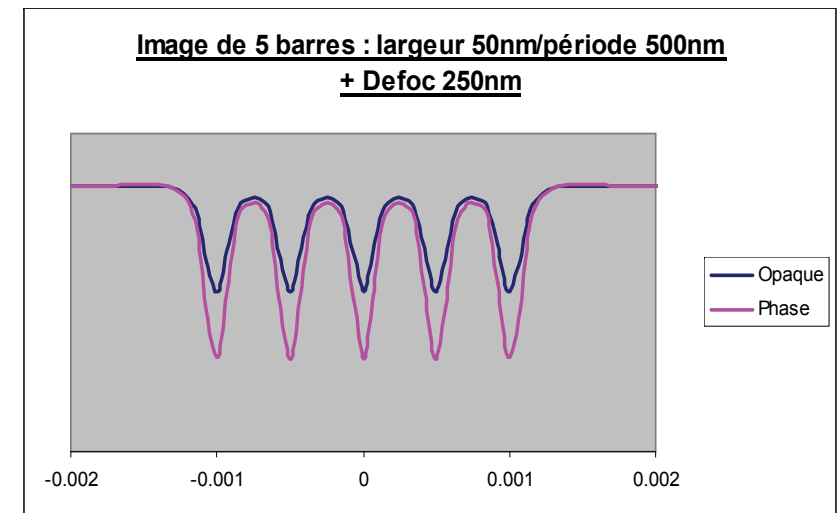
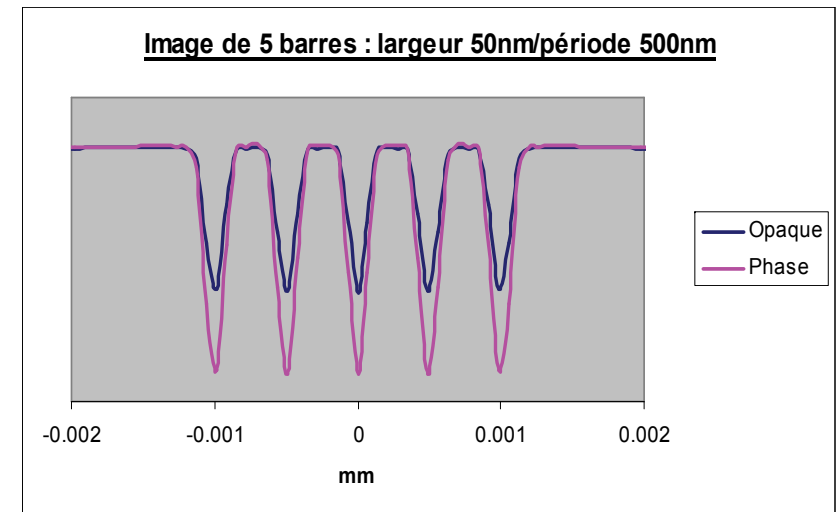
- **Avantage** : les masques de phase ont une DOF très supérieure à celle des masques « binaires »
- Ce procédé est utilisé dans des « trim masks » (via une double exposition), par exemple pour renforcer le contraste des contours de cellules



Phase Mask

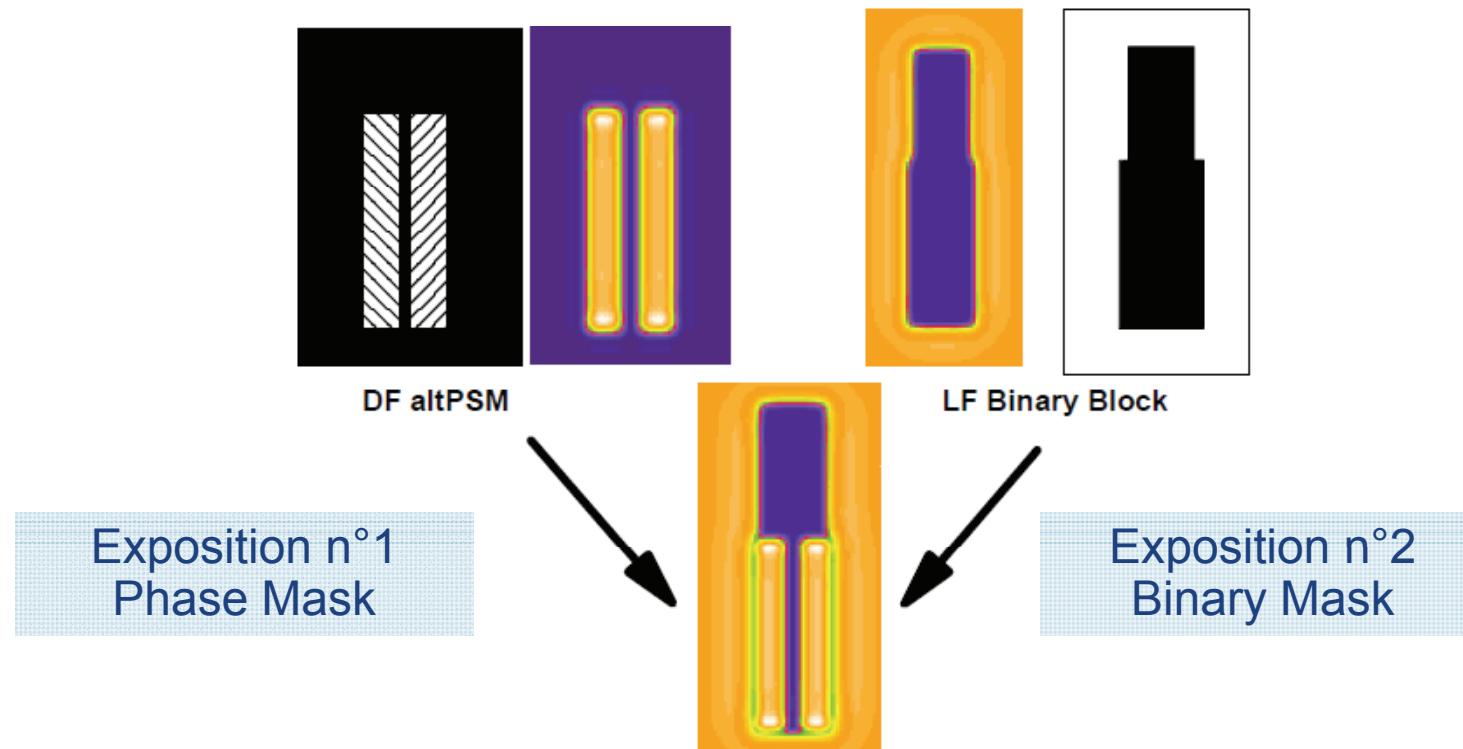


Print



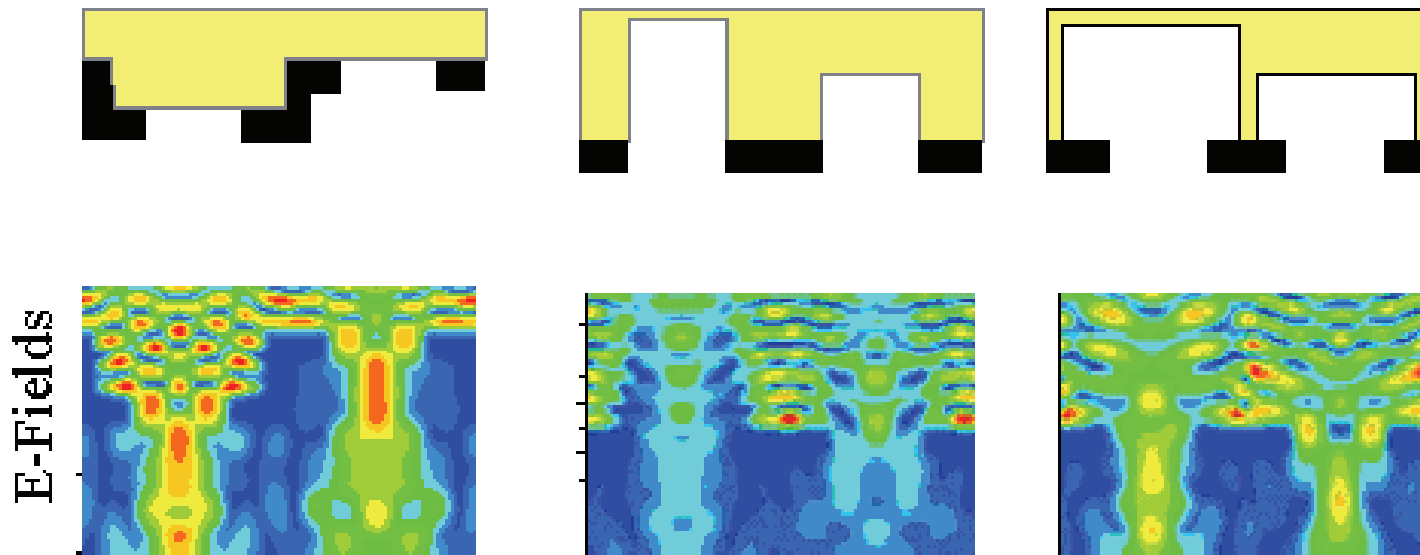
RET : Phase Shift Masks (PSM)

→ En conjuguant 2 expositions avec un masque de phase, il est possible d'imprimer des petits CD avec une « Process Window » satisfaisante



RET : Phase Shift Masks (PSM)

- Avec les résolutions actuelles (CD ~ 32nm), la profondeur des gravures $(n-1)*\lambda \sim 95\text{nm}$ se rapproche de la période des motifs ($32\text{nm}*4 \sim 128\text{nm}$)
- La définition précise des masques de phase doit prendre en compte les aspects de volume : effets d'ombre (parois), de l'ouverture numérique et de la polarisation (pour les gravures métalliques)



/07/

PRISE EN COMPTE DE LA POLARISATION

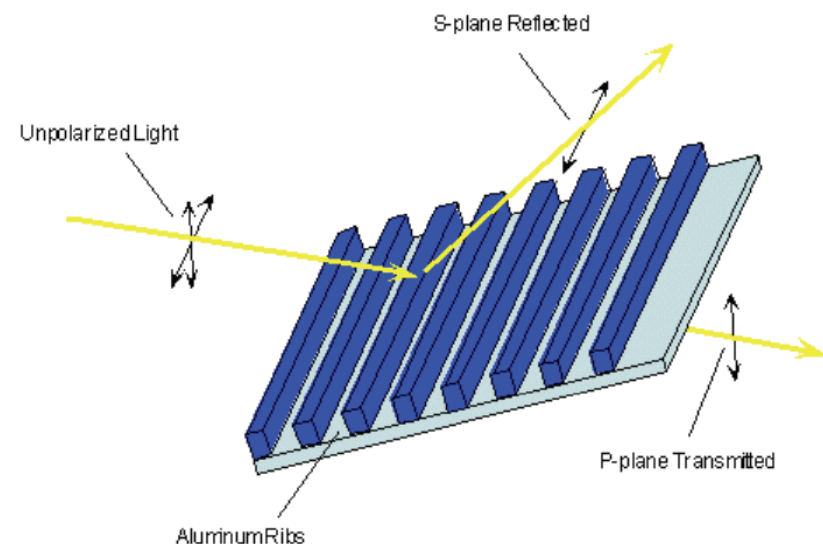
PRISE EN COMPTE DE LA POLARISATION (1/3)

En Optique, on fait presque toujours abstraction de la nature *vectorielle* de la lumière. Ce n'est plus possible aux NA actuels (>0.75). Les effets liés à la *polarisation* ne peuvent plus être ignorés. Ils sont de 2 ordres

→ Perturbation de la transmission du masque

- Quand la période de gravure d'un masque chrome se rapproche de la longueur d'onde d'exposition, la transmission du masque dépend de l'orientation de la polarisation par rapport aux traits
- C'est le cas pour $\lambda = 193\text{nm}$ au CD de 45nm

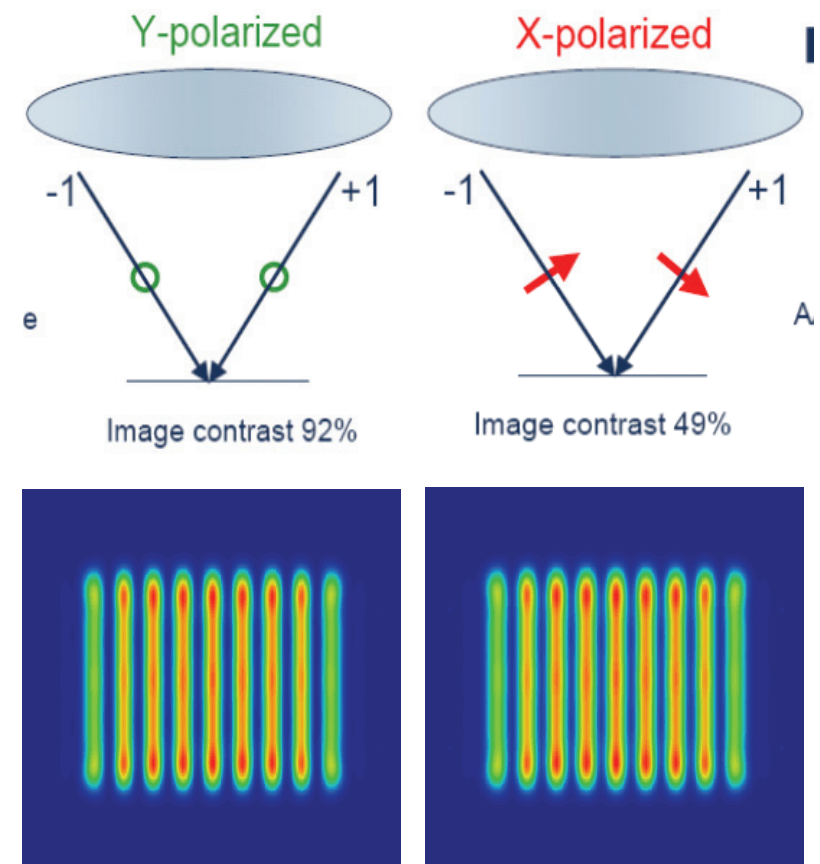
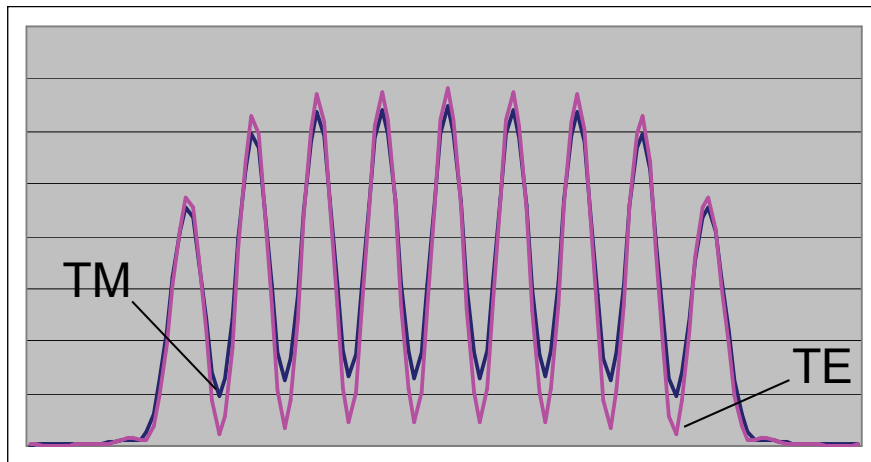
→ Ce phénomène est par ailleurs exploité à dessein dans les « Wire Grid Polarizer »



PRISE EN COMPTE DE LA POLARISATION (2/3)

→ A grande ouverture, la résolution est affectée par le caractère vecteuriel du champ électrique

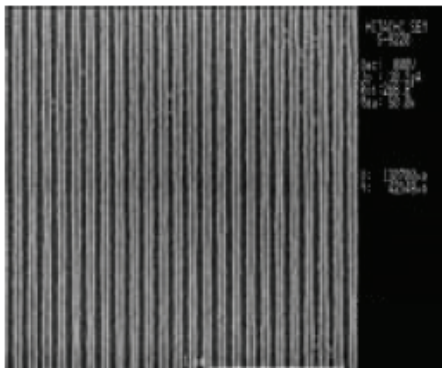
- Les composantes TE s'ajoutent algébriquement (idem scénario « scalaire »)
- En polarisation TM, l'amplitude totale est inférieure à la somme des amplitudes élémentaires, ce qui se traduit par une perte de contraste (ci-dessous, 100nm @ 0.75NA)



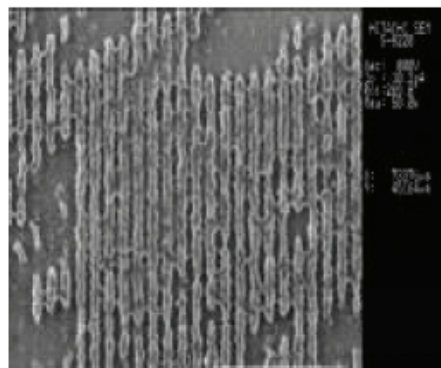
PRISE EN COMPTE DE LA POLARISATION (3/3)

→ La différence de résolution selon l'orientation de la polarisation se traduit clairement dans la résine

TE-polarization
(s-polarization)

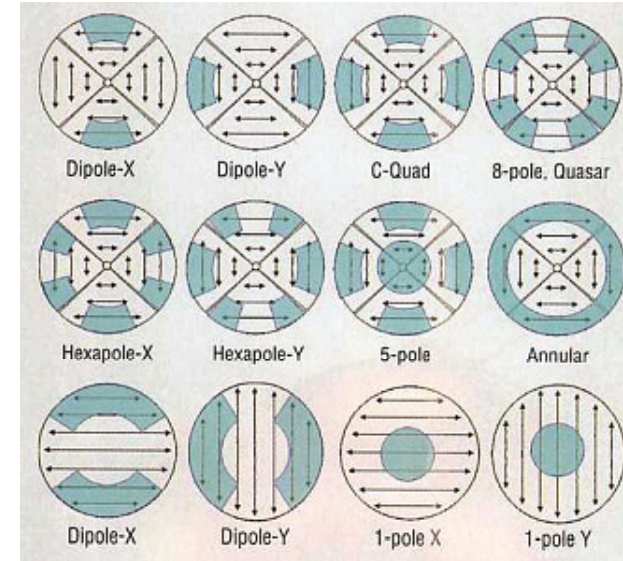


TM-polarization
(p-polarization)



→ Il est favorable de travailler en TE dans toute la pupille

- La distribution de la polarisation doit être adaptée à chaque profil d'illumination
- Cette fonction est implémentée dans tous les illuminateurs récents



CONCLUSION

- **La formation d'image dans une optique de projection doit être considérée comme une propagation d'ondes en régime de cohérence spatiale partielle**
 - Dans ce formalisme, la FTM peut être assimilée à une mesure du taux de cohérence dans la pupille
 - Dans l'industrie des semi-conducteurs, la diminution de la résolution (« Loi de Moore ») impose une approche physique de la formation de l'image aérienne au niveau du wafer, à tous les niveaux : diffraction 3D dans le masque, propagation dans le PO, interférences et diffusion dans la résine, etc., avec diverses passerelles entre codes de simulation (ex : CODE V, Prolith, Solid-C, etc.)
- **La problématique de la Lithographie (process éminemment non linéaire) peut être utilement interprétée par les outils de l'Optique (la formation d'image considérée comme process linéaire, voir les concepts de FTM, Cohérence Spatiale, etc.)**