

Marquage de surface par les principales méthodes de lithographie

Réunion GN MEBA « la préparation des échantillons »

Amanda MARTINEZ-GIL

IUT de Villetaneuse
Laboratoire de Physique des Lasers (LPL)
Université Paris 13

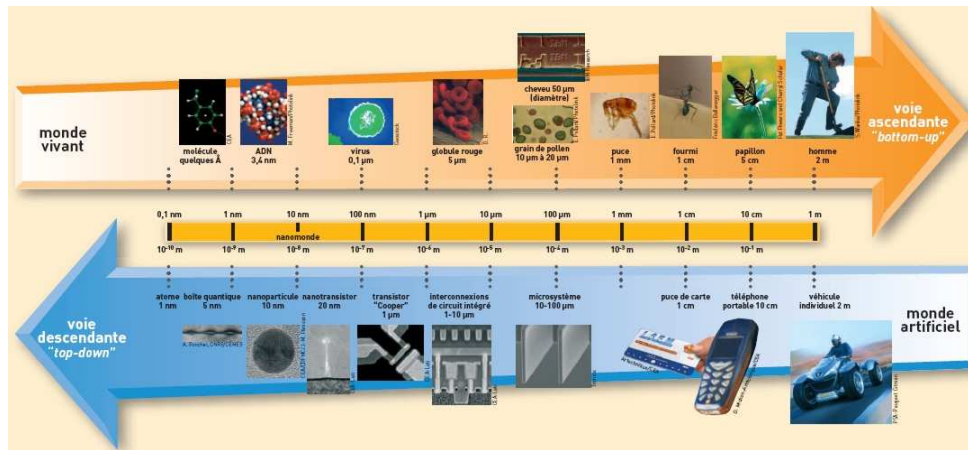
martinezgil@iutv.univ-paris13.fr

Plan

- 1 Introduction
- 2 Principe de la lithographie et du transfert
- 3 Principales méthodes de lithographie 1
- 4 Principales méthodes de lithographie 2
- 5 Bilan

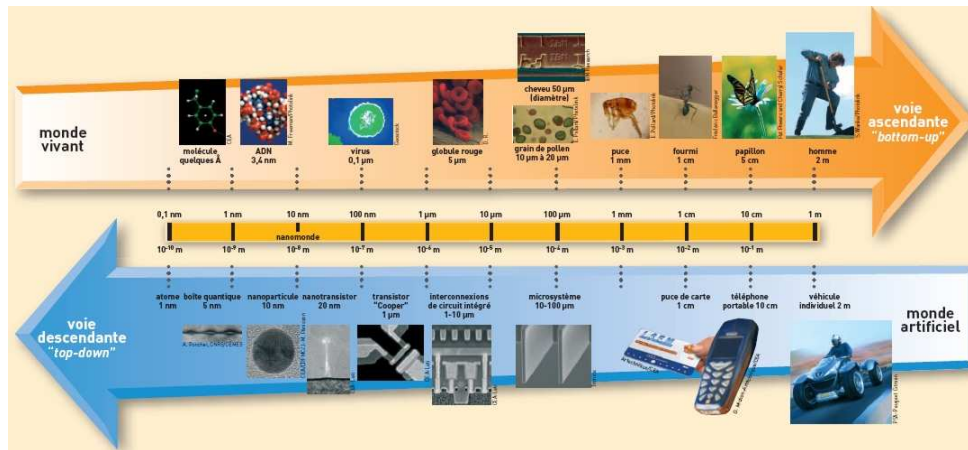
Plan

- 1 Introduction
- 2 Principe de la lithographie et du transfert
- 3 Principales méthodes de lithographie 1
- 4 Principales méthodes de lithographie 2
- 5 Bilan



2 manières pour construire des objets

- Voie ascendante « BOTTOM UP » : monde vivant, assemblage naturel des briques (auto-assemblage) de la matière pour réaliser et faire fonctionner le "vivant"
 - Voie descendante « TOP DOWN » : monde artificiel, fabriquer des dispositifs dans la matière inerte pour qu'ils remplissent des fonctions (*voie utilisée par la microélectronique*)
- ⇒ 2 approches pour miniaturiser



Tendance à la miniaturisation des systèmes : intérêts

- Intégration des systèmes
 - ⇒ *suivi des exigences de la loi de MOORE (microélectronique)*
 - ▶ Détails
- Economie d'énergie
- Economie de matière
- Biomimétisme
- Nanotechnologies et nanosciences pour la découverte de nouvelles propriétés physiques (effets de surface exacerbés. . .) et le développement de nouvelles applications

Marquage de surface

Il permet

- Miniaturisation des systèmes : micro- et nanosystèmes
- Repérage de zones de surface pour leur modification ou leur étude
- Traçabilité, identification (application industrielle)

⇒ **Miniaturisation de motifs reproduits en surface**



RÔLE DE LA LITHOGRAPHIE (approche « TOP DOWN »)

Plan

- 1 Introduction
- 2 Principe de la lithographie et du transfert**
- 3 Principales méthodes de lithographie 1
- 4 Principales méthodes de lithographie 2
- 5 Bilan

Définition

Le terme lithographie (du grec «litho» et «graphie» qui signifient respectivement «pierre» et «écrire») désigne, d'une façon générale, toutes les techniques d'impression utilisées pour la reproduction d'un motif, dessin ou texte sur un support.

En microélectronique

La lithographie représente une étape spécifique du procédé de fabrication des circuits intégrés. Ceux-ci sont obtenus par une série d'étapes, alternant :

- la lithographie, qui délimite les zones à traiter sur la plaquette
- l'élaboration de la structure désirée par transfert (dépôt, gravure, oxydation ou implantation. . .)

⇒ La fabrication d'un micro- ou nano-système nécessite généralement une dizaine d'étapes de lithographie.

Fabrication d'un circuit intégré

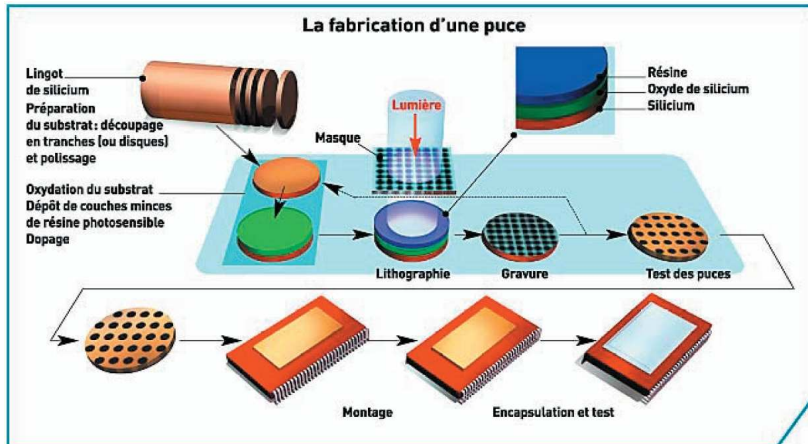


Fig.4 : Détails des étapes de réalisation des circuits intégrés, procédés Front-end et Back-end. Source CEA

Importance de la lithographie

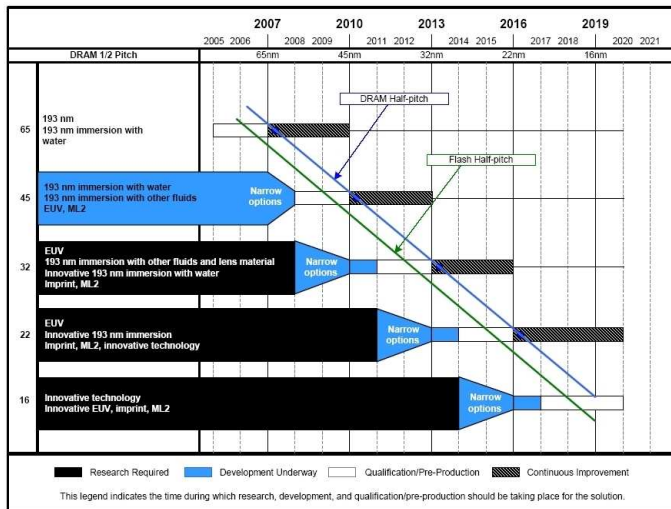
La lithographie consiste à reproduire un motif en surface d'un substrat.

C'est une étape

- ⇒ cruciale qui fixe la taille et la forme des motifs
- ⇒ déterminante pour la résolution, la plus petite taille de motif accessible de manière reproductible
- ⇒ *qui doit être réalisée en salle blanche par soucis de reproductibilité*

La concrétisation de loi de MOORE dépend de l'amélioration des techniques lithographiques

Evolution de la lithographie : la « roadmap » de l'ITRS (2006)



Notes: RET and lithography friendly design rules will be used with all optical lithography solutions, including with immersion; therefore, they are not explicitly noted.

Figure 67 Lithography Exposure Tool Potential Solutions

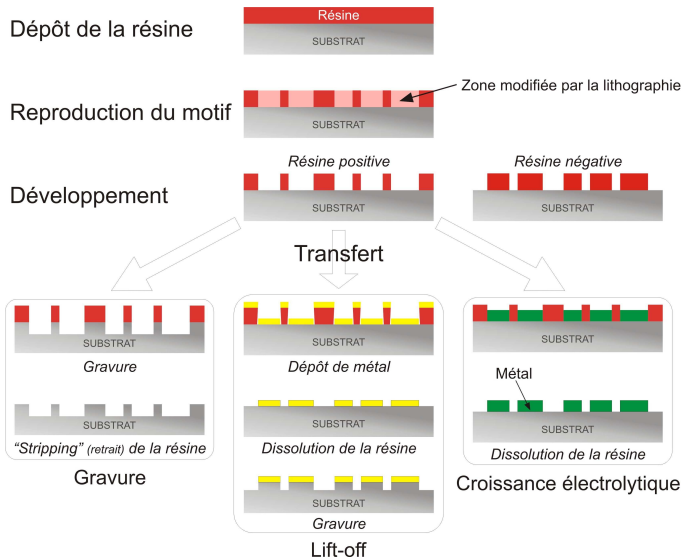
Principe de la lithographie I

La lithographie se décompose essentiellement en trois étapes :

- le dépôt de la résine sur une surface propre
- la reproduction du motif dans cette dernière, par irradiation le plus souvent
- le développement, qui révèle le motif enregistré dans l'épaisseur de la couche de résine.

Elle est généralement associée à une étape de transfert pour dupliquer fidèlement le motif dans la surface.

Etapes du procédé lithographique et différentes méthodes de transfert I



Plan

2 - Principe de la lithographie et du transfert

- ② Principe de la lithographie et du transfert
 - La résine et son dépôt
 - La reproduction du motif
 - Le développement
 - Le transfert du motif

Fonction de la résine

La résine, matériau déposé en couche mince sur le substrat, a plusieurs fonctions :

- enregistrer le motif défini par le faisceau d'électrons : être sensible au faisceau auquel elle est exposée, être capable de résoudre de fines structures. . .
- permettre sa fidèle restitution en relief lors du développement
- et permettre son éventuel transfert (duplication) dans un autre matériau.

La résine étant le «support» de la lithographie, elle introduit des limitations dans le procédé qu'il est important de comprendre pour choisir la résine et les conditions de développement en adéquation avec nos exigences.

Principe de la lithographie II

Première étape : dépôt de la résine

Le substrat est uniformément revêtu d'une mince couche de résine adaptée à la méthode de lithographie choisie.

L'épaisseur de cette couche pouvant avoir une incidence sur la suite du procédé (étape de transfert. . .), elle doit être reproductible et judicieusement choisie.

La résine peut être :

organique (*simplicité d'utilisation mais médiocre résistance mécanique*)

Une tournette permet d'étaler uniformément la résine par centrifugation (enduction) tout en maintenant la plaquette en place par un système d'aspiration.

La vitesse de rotation, l'accélération et le temps sont réglés pour obtenir une couche fine et d'épaisseur constante sur toute la surface.

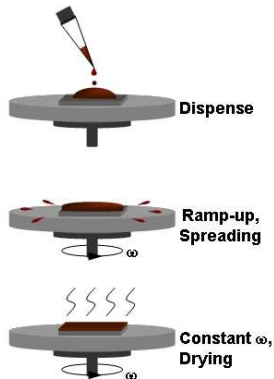
inorganique

Ces résines sont déposées par les techniques de dépôts conventionnelles (dépôt par évaporation, pulvérisation, ablation laser. . .)

Dans d'autres cas, la lithographie peut s'effectuer sans résine.

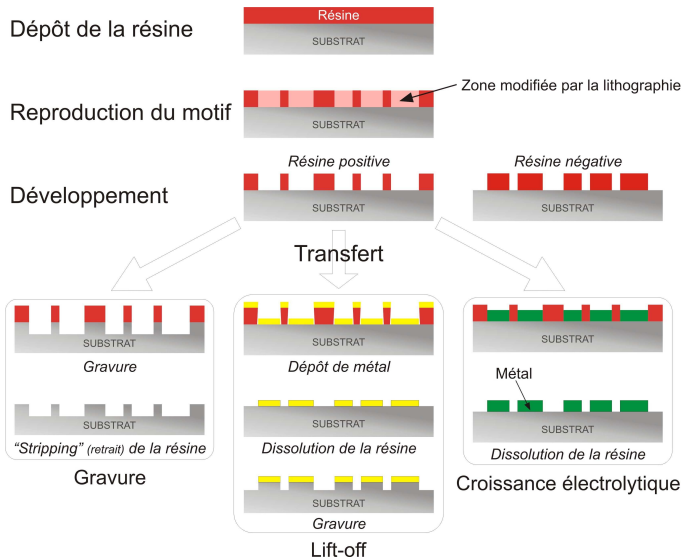
Etapes d'un procédé lithographique avec résines organiques

Le dépôt de la résine : spin-coating



Le dépôt de résine par centrifugation induit des effets de bords : la résine sur les bords du substrat n'est pas uniforme et forme généralement une sur-épaisseur.

Etapes du procédé lithographique et différentes méthodes de transfert



Plan

2 - Principe de la lithographie et du transfert

- 2 Principe de la lithographie et du transfert
 - La résine et son dépôt
 - La reproduction du motif
 - Le développement
 - Le transfert du motif

Principe de la lithographie III

Deuxième étape : reproduction du motif dans la résine

Cette étape clé de la lithographie consiste à dupliquer le motif dans la couche de résine en la modifiant chimiquement ou physiquement.

Ces transformations sont le plus souvent induites par l'absorption d'une dose d'« énergie ».

Simultanément au fait de reproduire le motif, il est parfois impératif de contrôler sa position sur le substrat par :

- **une étape d'alignement sur les niveaux de lithographies antérieures.**
L'alignement doit être rapide et précis (avec, si possible, une précision équivalente à la résolution de la technique). En effet, la réalisation d'un dispositif nécessite souvent plusieurs étapes de lithographie. Ces niveaux successifs doivent être correctement superposés, alignés les uns par rapport autres.
- **un procédé de raccord de champs** (exposition de champs adjacents).
Suivant la technique utilisée, la lithographie d'une grande surface s'effectue en juxtaposant plusieurs champs (de surface plus petites), larges de quelques dizaines de micromètres. Ces derniers doivent être alignés les uns par rapport aux autres, de telle sorte qu'une ligne qui traverse toute la surface ne soit pas interrompue.

Plan

2 - Principe de la lithographie et du transfert

- ② Principe de la lithographie et du transfert
 - La résine et son dépôt
 - La reproduction du motif
 - Le développement
 - Le transfert du motif

Principe de la lithographie IV

Troisième étape : le développement

Les régions de la résine dans lesquelles le motif a été enregistré ont subi des transformations chimiques ou physiques.

Le but du développement est de révéler sélectivement ces zones modifiées dans l'épaisseur de la couche afin de former une structure de résine en 3 dimensions.

Ceci peut s'effectuer par

- voie humide (immersion dans un solvant adéquat ou pulvérisation de ce dernier uniformément avec contrôle en température)
- voie sèche (plasma adapté)

2 types de résine

Résine positive : les régions exposées deviennent solubles

Résine négative : les régions exposées deviennent insolubles

Etapes d'un procédé lithographique avec résine

Propriétés caractérisant le procédé lithographique

Les propriétés permettant d'évaluer les qualités et les performances d'un procédé de lithographie sont

- 1 la sensibilité de la résine
- 2 le contraste du couple résine-développeur
- 3 la résolution
- 4 la résistance aux dégradations induites par la méthode de transfert

Etapes d'un procédé lithographique avec résine

Propriétés caractérisant le procédé lithographique

- La sensibilité** correspond à la facilité avec laquelle la résine se modifie sous l'effet du faisceau d'électrons
⇒ *vitesse d'écriture*
- Le contraste** du couple résine-développeur caractérise la variation de la vitesse de dissolution de la résine dans la solution de développement en fonction de la dose d'exposition
⇒ *résolution*
- La résolution** correspond à la dimension de la plus petite structure de résine réalisable. Elle dépend de nombreux paramètres. Un fort contraste de procédé permet d'améliorer la résolution accessible.

Courbe de contraste

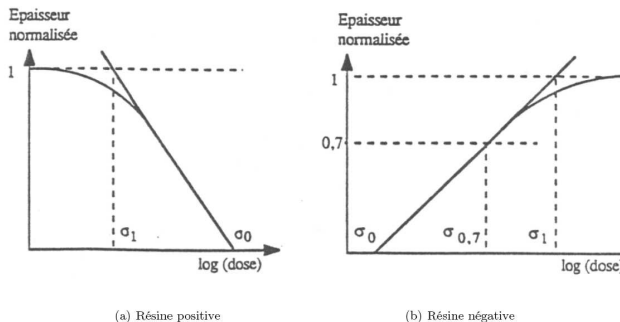


FIG. 2.28 – Courbes de contraste d'une résine positive et d'une résine négative. Ces courbes sont obtenues expérimentalement pour un procédé complet de lithographie qui inclut la nature de la résine, les conditions d'exposition, la solution et la température de développement. Elles montrent les variations de l'épaisseur normalisée de la résine après développement (rapport entre l'épaisseur de la résine après le développement e_f et son épaisseur initiale e_i) en fonction de la dose surfacique (échelle logarithmique). Il est alors possible de dégager deux critères caractérisant le couple résine-développeur dans les conditions expérimentales utilisées : la sensibilité σ (dose pour laquelle $e_f/e_i=0,7$) et le contraste γ (pente). D_0 définit la dose à partir de laquelle l'épaisseur du film de résine devient non mesurable et D_1 définit la dose à partir de laquelle l'épaisseur finale de résine est proche de l'épaisseur initialement déposée.

Etapes d'un procédé lithographique avec résine

Propriétés caractérisant le procédé lithographique

La résistance aux dégradations induites par la méthode de transfert. Il est important de tenir compte du transfert au moment de la réalisation de la lithographie : choix de la résine, de son épaisseur, prévision d'un élargissement des motifs... Il est aussi possible d'appliquer des conditions de transfert qui respecteront le masque de résine.

Autres qualités : la facilité et la faculté d'être déposée en film (mince) adhérent sur le substrat, les propriétés mécaniques telles qu'un faible taux de contraintes, la résistance aux agents chimiques (acides, bains d'attaque, plasmas, implantation), la résistance thermique (fluage dès que la température s'élève)...

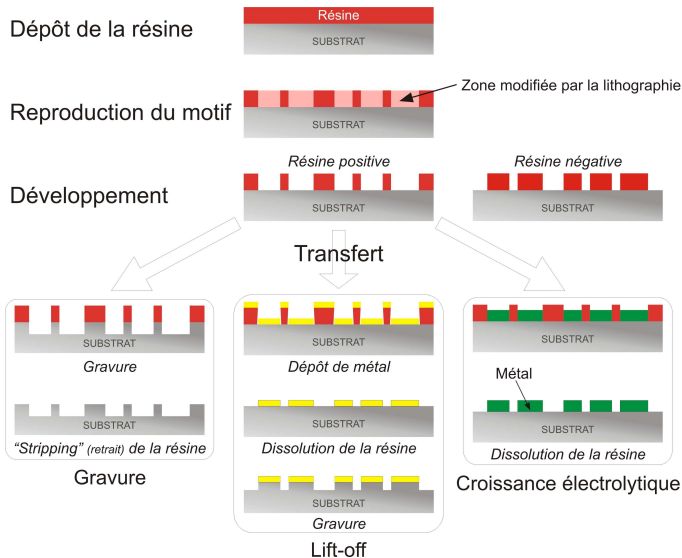
L'étape de développement conclut l'opération de lithographie, capitale en nanofabrication.

Néanmoins, la résine n'est généralement pas le matériau dans lequel on souhaite élaborer le dispositif. Elle constitue simplement une couche sensible intermédiaire.

⇒ **Il devient alors nécessaire de dupliquer le motif de résine dans un matériau adapté.**

Le film de résine n'est plus continu : il définit un motif en relief. Il constitue alors un «masque» pour l'étape de transfert en protégeant certaines parties du substrat avec de la résine et d'autres non.

Etapes du procédé lithographique et différentes méthodes de transfert



Plan

2 - Principe de la lithographie et du transfert

- ② Principe de la lithographie et du transfert
 - La résine et son dépôt
 - La reproduction du motif
 - Le développement
 - Le transfert du motif

Le transfert du motif I

A l'issue du développement, certaines zones du substrat sont protégées par la résine tandis que d'autres ne le sont plus. La résine forme ainsi un masque qui va permettre de reproduire, de transférer le motif soit dans le substrat, soit dans un autre matériau afin de former la structure voulue.

⇒ **C'est l'étape de transfert.**

Tout aussi cruciale que l'étape de lithographie, elle exige de reproduire avec fidélité les motifs de résine : conservation de leur taille et de leur forme initiales.

Cette étape utilise des procédés de microfabrication tels que le dopage (implantation ionique, ...), l'oxydation, le dépôt de couches minces (pour lift-off, par exemple) et la gravure. On distingue deux catégories de transfert.

Le transfert du motif II

<i>Transfert</i>	<i>Principe</i>	<i>Procédés de microfabrication concernés</i>
SOUSTRACTIF	transfert du motif dans le substrat ou dans une couche sous-jacente via les ouvertures dans la résine	gravure, oxydation, dopage...
ADDITIF	apport d'un nouveau matériau à la surface de l'échantillon via les ouvertures dans la résine	lift-off, croissance électrolytique, ...

TAB.: Récapitulatif des 2 catégories de transfert.

Le transfert du motif III I par lift-off

Le procédé de lift-off est considéré comme la meilleure méthode de transfert de motifs pour accéder à une très haute résolution et à un facteur de forme raisonnable.

Il consiste à déposer sur l'échantillon une couche mince métallique par évaporation sous vide (méthode de dépôt directionnelle) dans des conditions tolérables pour la résine.

La couche de matériau se dépose tant sur la résine restant après le développement que sur la surface du substrat (ouverture dans la résine).

Par contre, à l'issue de la dissolution de la résine dans un solvant approprié, seul les parties métalliques directement en contact avec le substrat subsistent et forment les structures : *obtention d'un négatif du masque de résine métallique*, pouvant être utilisé comme masque de gravure.

Le transfert du motif III II

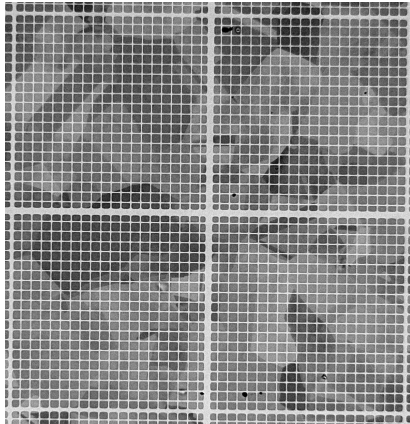
par lift-off

Pour une réalisation correcte du lift-off, il faut que :

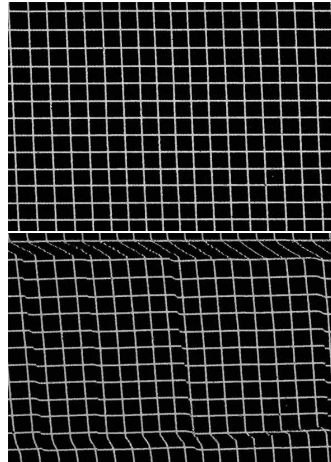
- les flancs de résine soient inclinés de telle sorte que le métal ne s'y dépose pas. Pour cela, les flancs doivent former un angle supérieur ou égal à 90° avec le substrat, en passant dans la résine : profil vertical ou *undercut*.
- l'épaisseur de métal déposé doit être inférieure à un tiers de la hauteur de résine ou inférieure à la largeur des motifs pour les nano-motifs.

Microgrille obtenue par EBL + Lift-off pour l'étude des déformations

Résultats de Rémi Chiron du LPMTM



Microgrille d'Au



Etude du cisaillement
(2 états de déformation)

Le transfert du motif IV I par gravure

La gravure qui consiste à retirer la matière des zones non recouvertes de résine est généralement plus contraignante et plus délicate à optimiser : plus agressive envers le masque que le lift-off, gravure pas toujours directionnelle. . .

De ce fait, la détérioration de résolution pendant le transfert des motifs est plus fréquente.

De plus, ce type de transfert nécessite assez souvent une épaisseur de résine initiale plus importante pour compenser sa consommation au cours du procédé et permettre une gravure suffisamment profonde. Ceci peut limiter la résolution de certaines techniques de lithographie.

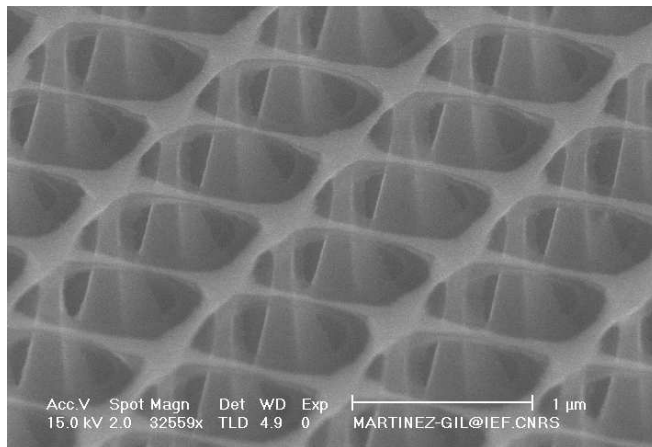
Le transfert du motif IV II par gravure

La plupart des résines sont conçues pour résister aux rudes conditions auxquelles elles sont exposées pendant l'étape de transfert (plasma, milieu chimique, ...).

Toutes ne présentant pas les mêmes caractéristiques, le choix de la résine est en partie conditionné par la méthode de transfert envisagée.

De manière générale, l'étape de transfert conditionne l'étape de lithographie. Elles sont indissociables.

Transfert par gravure



Bilan étape de lithographie et de transfert

Lors d'une étape de lithographie, on cherche donc à maîtriser les dimensions du motif reproduit et à contrôler la position des niveaux et des champs les uns par rapport aux autres, tout cela en utilisant des résines adaptées au transfert.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Principe de la lithographie et du transfert
- 3 Principales méthodes de lithographie 1**
- 4 Principales méthodes de lithographie 2
- 5 Bilan

Familles des techniques de lithographie

L'étape clé de la lithographie consiste à dupliquer un motif dans une couche de résine.

Il existe plusieurs façons de reproduire le motif dans la résine ou dans le substrat (suivant le type de lithographie).

Ceci peut s'accomplir principalement par

- exposition de la résine à un rayonnement
- exposition de la résine à un faisceau de particules chargées
- impression
- champ proche

Comment choisir une méthode de lithographie ?

Critères de choix d'une méthode de lithographie par ordre d'importance :

La résolution : plus petite taille de motif réalisable de manière reproductible

La vitesse d'écriture : reproduction parallèle (avec masque ou moule) ou séquentielle (avec faisceau)

La facilité et la résolution de l'alignement sur les niveaux antérieurs

La souplesse dans la forme des motifs : masque physique (quelle résolution ? : *échelle de reproduction*) ou logiciel, réseaux. . .

Le besoin de résine ou pas : l'écriture directe limite le nombre d'étapes et le risque de perte en résolution associée

Les matériaux possibles , dans le cas de l'écriture directe

Plan

3 - Principales méthodes de lithographie 1

- 3 Principales méthodes de lithographie 1
 - Méthode d'exposition par transmission
 - Lithographie optique (UV, DUV)
 - Lithographie par rayons X (XRL)
 - Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL)
 - Méthode d'exposition par faisceau focalisé
 - Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)
 - Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)
 - Laser
 - Méthode d'exposition par interférométrie

Méthode d'exposition par transmission

Principe

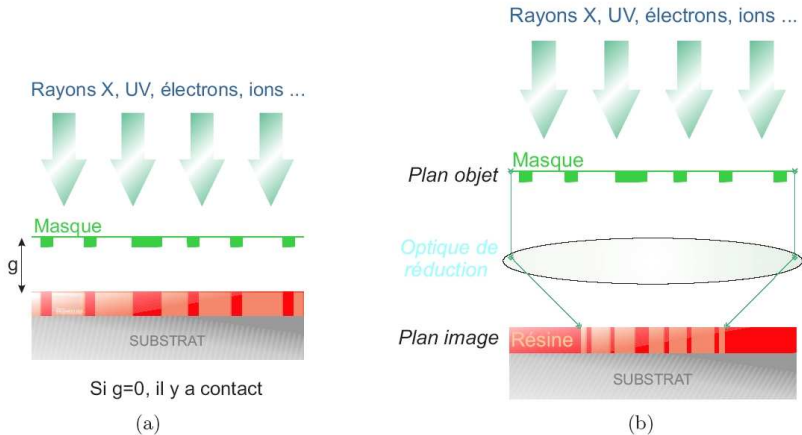
La résine est simultanément exposée à un rayonnement (UV, X, . . .) ou à un faisceau de particules chargées (électrons, ions) à travers un masque, composé d'un support transparent recouvert de motifs absorbants :

- soit le rayonnement incident est absorbé par le motif du masque
- soit il insole la résine aux endroits que le motif ne recouvre pas

Ce type de lithographie peut s'opérer de 3 façons différentes :

- **Par contact ou proximité.** Le masque est respectivement en contact ou très proche de la couche de résine. On obtient une reproduction du motif sur la résine à l'échelle 1 : 1.
- **Par projection.** Le masque et l'échantillon sont séparés par un ensemble d'optiques de réduction qui permettent de varier l'échelle de reproduction du motif sur la résine. La plage de rapport de réduction applicable s'étend de 5 à 20.

Méthode d'exposition par transmission



*Lithographie par transmission d'un rayonnement à travers un masque
(a) par contact ou proximité, (b) par projection.*

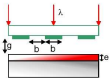
Méthode d'exposition par transmission : LIMITATIONS

La **résolution** obtenue par ce type de lithographie

- dépend de celle du masque et
- est surtout limitée par la longueur d'onde du rayonnement utilisé et des phénomènes de diffraction qui en résultent (prédominants dans la technique par projection d'où le critère de Rayleigh).

La **modification des motifs du masque** n'est pas possible, ce qui peut être handicapant pour des applications de recherche.

Méthode d'exposition par transmission : RÉOLUTION

	LITHOGRAPHIE PAR TRANSMISSION PAR		
	CONTACT	PROXIMITÉ	PROJECTION (lentille)
Résolution R,			
la plus petite taille de motif reproductible, b_{min}			
	Diffraction de Fresnel		Diffraction de Fraunhofer (Critère de Rayleigh)
	$2b_{min} \simeq 3\sqrt{\lambda[g + (e/2)]}$ (1)	$2b_{min} \approx 3\sqrt{\lambda g}$ (2)	$2b_{min} = \frac{k_1 \lambda}{NA}$ (3)
Amélioration en	$\searrow \lambda, \searrow g, \searrow e$	$\searrow \lambda, \searrow g$	$\searrow \lambda, \searrow k_1, \nearrow NA$
	<p>La résolution d'un système optique est proportionnelle à la longueur d'onde du rayonnement utilisé. Plus la longueur d'onde est petite, plus fins sont les motifs reproduits et meilleure est leur résolution. Un système permettant d'atteindre de très petites dimensions est qualifié abusivement comme présentant une grande, haute ou bonne résolution.</p>		
	<ul style="list-style-type: none"> b_{min} → espacement ou largeur minimum des lignes du réseau du masque transférable $2b_{min}$ → période minimum transférable du réseau de lignes du masque λ → longueur d'onde du rayonnement utilisé g → gap, distance entre le masque et la résine 	<ul style="list-style-type: none"> e → épaisseur de la résine NA (Numerical Aperture) → l'ouverture numérique, aptitude du système optique à collecter la lumière diffractée k_1 → paramètre expérimental qui dépend de la résine et du procédé K_2 → paramètre expérimental qui dépend du procédé 	

Méthode d'exposition par transmission : AVANTAGES

Transfert du motif parallèle

L'insolation par transmission à travers un masque est une **méthode rapide** : insolation du motif dans la résine en une seule fois et temps d'exposition court.

⇒ Méthode de prédilection utilisée dans l'industrie pour la production de masse de circuits intégrés.

Les systèmes de production utilisés, photo-répéteurs, *steppers* ou *scanners*, possèdent un facteur de réduction de 5 à 6 obtenu par l'intermédiaire de lentilles en verre ou en silice traitée anti-reflet.

Méthode d'exposition par transmission : RAYONNEMENTS

Cette méthode peut utiliser :

- les rayonnements ultraviolets (UV) et ultraviolets profonds (DUV) : lithographie optique ou photolithographie
- les rayons X (XRL, *X-Ray Lithography*)
- des faisceaux (non focalisés) d'électrons (EPL, *Electron Projection Lithography*) ou d'ions (IPL, *Ion Projection Lithography*)

Plus le rayonnement utilisé a une faible longueur d'onde, plus la résolution est améliorée

C'est pour cette raison que la longueur d'onde du rayonnement utilisé dans les photo-répéteurs est régulièrement diminuée, et que les rayons X (durs et mous), les électrons et les ions s'avèrent être intéressants.

Méthode d'exposition par transmission

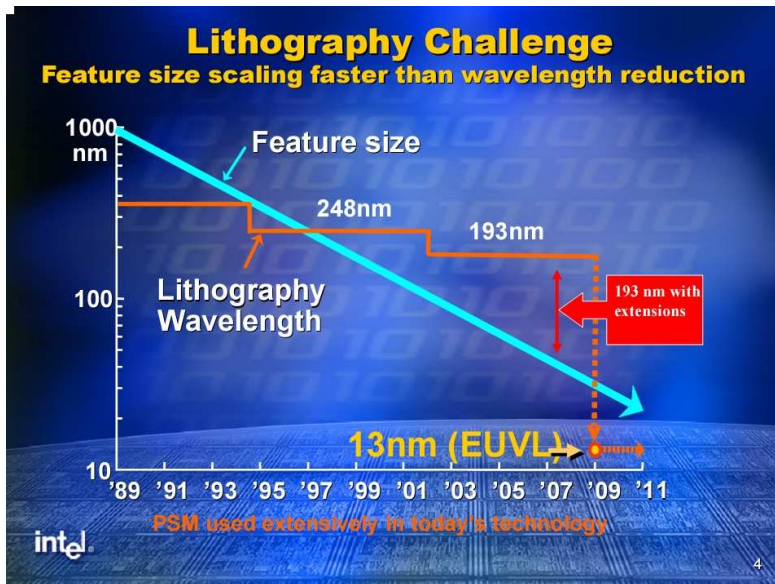
Lithographie optique (UV, DUV) : Résolution

Alors qu'il y a encore une dizaine d'années, il apparaissait difficile de réaliser des motifs à des dimensions sub-micrométriques par des techniques de lithographie optique en projection :

Il est communément admis aujourd'hui qu'une source lumineuse est capable de définir des motifs ayant une **résolution proportionnelle à un tiers de sa longueur d'onde**

D'où l'intérêt de diminuer la longueur d'onde du rayonnement utilisé (ceci est confirmé par l'équation 3).

Ainsi, pour une longueur d'onde d'émission de 193 nm, il devrait être possible d'aborder la prochaine génération à 65 nm prévue avec le même type de source.



Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par rayons X (XRL)

Depuis les années 1970, la lithographie par rayons X constitue une alternative intéressante à la lithographie optique.

La courte longueur d'onde des rayons X (~ 1 nm), générés par une source synchrotron ou par une source plasma induit par laser, améliore la résolution (entre 30 et 100 nm).

Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par rayons X (XRL) : les rayons X

- Le synchrotron, source à rayonnement parallèle, permet la formation de structures de résine avec de grands facteurs de forme (exposition de grandes épaisseurs de résine), contrairement aux autres sources (divergentes).
- La trajectoire des rayons X étant rectiligne jusqu'à leur absorption,
 - ❶ la présence de particules de poussières ne gêne pas la reproduction du motif
 - ❷ l'exposition de la résine ne dépend donc pas de son épaisseur, de la topologie du substrat et de la proximité des motifs, ce qui laisse **une grande latitude de procédé.**

Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par rayons X (XRL) : en proximité

Dû à l'absence d'optiques appropriées aux rayons X (sauf lentilles de Fresnel), cette lithographie par transmission s'effectue exclusivement en proximité (gap, distance entre le masque et le substrat, de 5 à 40 μm).

Avantage

- minimise les phénomènes de diffraction

Inconvénients

- comme le facteur de reproduction est de 1, le masque, élément crucial de cette méthode, doit posséder une très bonne résolution et une parfaite définition des motifs.

Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par rayons X (XRL) : Résolution

La résolution de la lithographie par rayons X étant limitée par la *diffraction de Fresnel* et la *diffusion des photoélectrons dans la résine* (quelques nanomètres dans le PMMA), la largeur minimale d'un motif est définie par

$$W_D = k_x \sqrt{\lambda g} \quad (4)$$

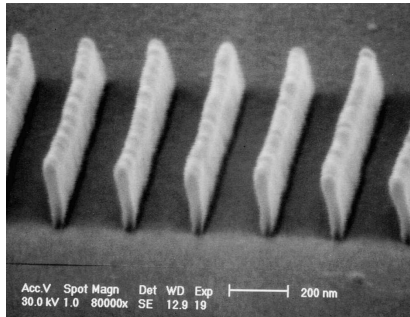
g étant la distance entre le masque et le substrat (gap), et k_x , une constante dépendant des conditions expérimentales, estimée à 0,6 dans le PMMA.

Réalisations

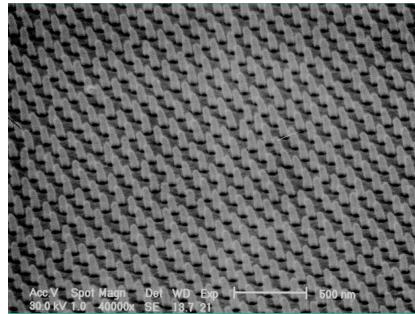
- des lignes de largeur 50 nm ont été reproduites avec un gap de 5 μm
- des structures inférieures à 30 nm ont été obtenues à des gaps plus petits : traits larges de 15 nm dans le PMMA

Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par rayons X (XRL) : Réalisations



30 nm lines on PMMA



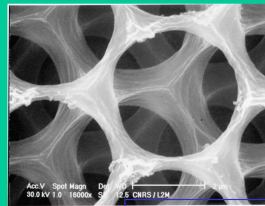
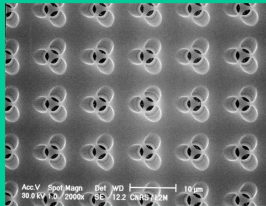
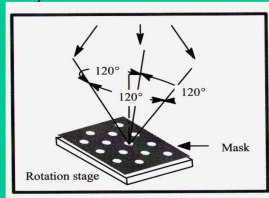
20 nm dots on PMMA

Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par rayons X (XRL) : Réalisations

3D X-ray lithography

Multiple exposures with 3 different angles



Photonic crystal

(ex L2M): LPN

Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL)

La lithographie par rayons X mous est aussi appelée abusivement lithographie par ultraviolets extrêmes, **EUVL** (« *Extreme UltraViolet Lithography* »), pour renforcer l'idée qu'elle succède naturellement à la lithographie optique (**DUV**).

Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL) : Avantages et Inconvénients

- + sa courte longueur d'onde (rayons X mous, ~ 13 nm) améliore la résolution
- + sa faible ouverture numérique augmente la profondeur de champ
- + son principe de réduction par projection permet de reproduire des motifs de taille 4 à 10 fois inférieure à ceux du masque avec un bon contraste
- le rayonnement des rayons X mous étant très fortement absorbé par la quasi-totalité des matériaux et même par les gaz, cette lithographie :
 - ▶ est réalisée sous vide
 - ▶ utilise exclusivement un masque et des composants optiques réfléchissants

Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL) : Masque

Constitués d'un empilement multi-couches de Mo et Si ou Be (miroir de Bragg) et sensibles aux défauts d'interfaces, ils sont très compliqués à réaliser ou à réparer :

- couches sans contrainte
- contrôle de la rugosité d'interface (inférieure à 0,25 nm)
- empilement résistant aux effets thermiques

Méthode d'exposition par transmission

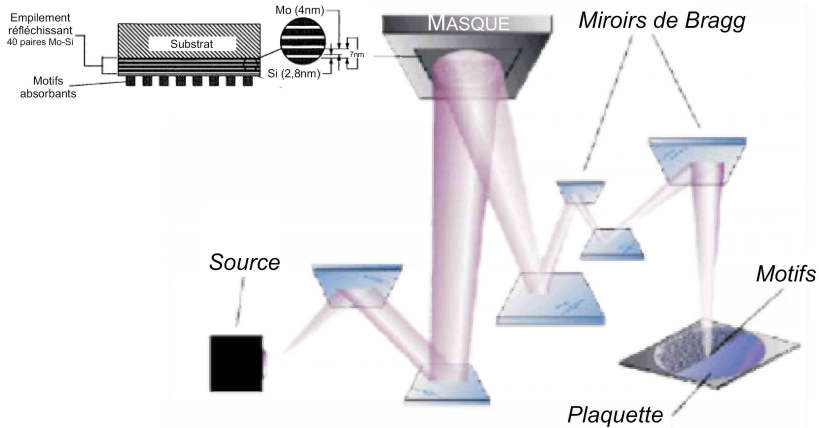
Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL) : Principe

- 1 Une source de forte puissance (synchrotron ou source plasma induit par laser) éclaire, de manière oblique, un masque réfléchissant pour les rayonnements EUV.
- 2 Ceux-ci sont filtrés par le motif absorbant (empilement de tantale, silice et chrome) à la surface du masque, avant d'être réfléchis par l'empilement multi-couches.
- 3 L'image réfléchie est soumise à des réflexions successives à travers un système optique réducteur, constitué de plusieurs miroirs de Bragg, puis atteint la plaque enduite de résine.

Le contrôle des procédés doit donc être extrêmement précis pour avoir une efficacité maximale et éviter toute contamination.

Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL) : Principe



Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL) : Réalisations

La EUVL permet d'atteindre des résolutions de l'ordre de 70 nm et promet de descendre sous la barre des 40 nm une fois tous les problèmes technologiques surmontés (optique, source...).

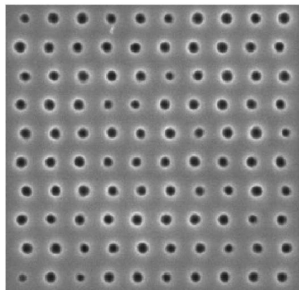


FIG. A.4 – Réseau de trous (diamètre de 70 nm) réalisé avec un prototype d'instrument d'exposition EUVL (0,1 NA) dans de la résine [23]

Méthode d'exposition par transmission

Ces techniques de lithographie représentent d'énormes investissements pour financer leur développement et rencontrent des verrous technologiques souvent liés à la source, au masque, à l'optique, aux résines et à leur savoir-faire...

Plan

3 - Principales méthodes de lithographie 1

- 3 Principales méthodes de lithographie 1
 - Méthode d'exposition par transmission
 - Lithographie optique (UV, DUV)
 - Lithographie par rayons X (XRL)
 - Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL)
 - Méthode d'exposition par faisceau focalisé
 - Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)
 - Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)
 - Laser
 - Méthode d'exposition par interférométrie

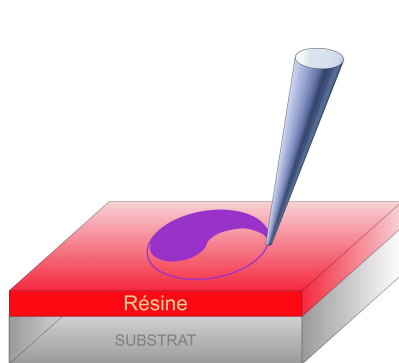
Méthode d'exposition par faisceau focalisé

- Cette **méthode** est dite **directe** parce qu'elle ne nécessite pas de masque intermédiaire.
- Le faisceau étant focalisé (électrons, ions, RX, laser), il atteint la résine avec un **diamètre de sonde fin**.
- Il devient alors possible d'écrire avec le faisceau sur la résine comme on le fait couramment avec un crayon sur du papier, d'où le terme d'écriture directe.
- Le faisceau focalisé qui est piloté par un ordinateur inscrite alors le motif programmé sur la résine.

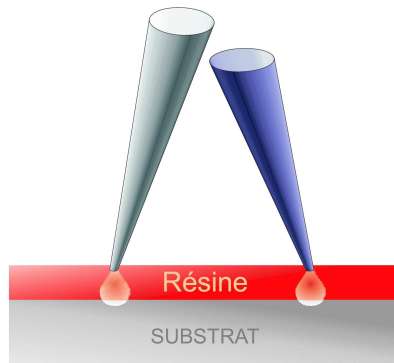
Raccord de champs

Pour conserver une sonde fine et circulaire, le champ d'exposition est limité. L'exposition d'un grand motif est décomposé en l'exposition de plusieurs champs qui doivent être correctement raccordés.

Méthode d'exposition par faisceau focalisé



(a) Versatilité



(b) Insolation par points d'« impact » successifs

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Cette lithographie

- + permet d'atteindre une résolution très élevée, limitée entre autres par la taille de sonde,
- + offre une facilité de contrôle et de modification de la géométrie des motifs réalisés
- est très lente comparée à la technique de transmission au travers un masque : le transfert des motifs étant séquentiel (en série)
- nécessite un raccord entre champs pour l'exposition de grands motifs
- doit impérativement s'effectuer sous vide

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)

Modification de surface par faisceau d'ions focalisé

Les ions sont utilisés pour une grande variété de modification de surface :

- la nanolithographie (via une résine),
- la nanofabrication par gravure localisée (pas besoin de résine) avec ou sans gaz réactif (sélective, accélérée ou non),
- l'implantation ionique localisée,
- le dépôt localisé par décomposition induite par le faisceau

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)

Principe

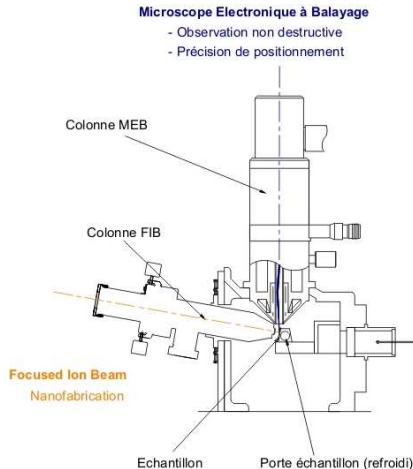
- 1 Le faisceau, généré par une source d'ions (métal liquide (Ga, Ge, In, Au) ou gaz inerte ionisé, sources pas toujours très stables), est focalisé sur la surface de l'échantillon par un système optique composé de lentilles électrostatiques (propriétés focalisatrices indépendantes du rapport entre la charge et la masse de la particule).
- 2 L'observation de l'échantillon par imagerie ionique permet une mise au point et un positionnement précis de la sonde, dont le meilleur diamètre est de l'ordre de 7-8 nm avec un courant de quelques picoampères pour une source à métal liquide de Ga.

La taille de sonde est principalement limitée par les aberrations (chromatiques et sphériques) introduites par le système optique à cause de la large dispersion énergétique de la source à métal liquide (LMIS, *liquid metal ionic source*).

L'effet de ces aberrations est d'autant plus prononcé qu'on augmente le courant du faisceau.

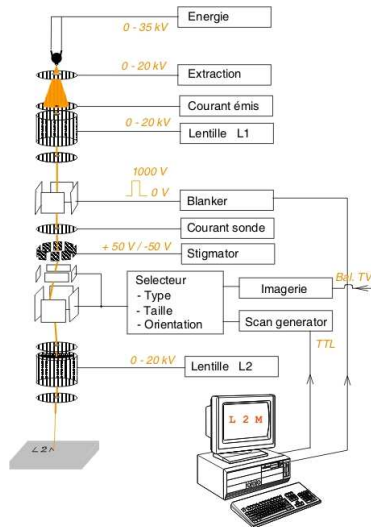
Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)



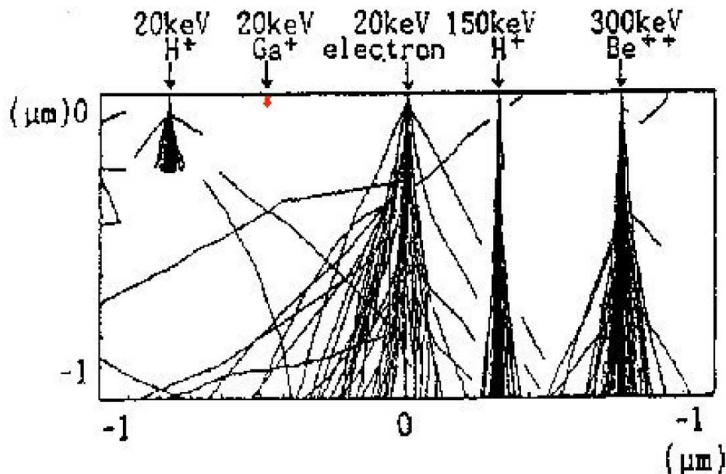
Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)



Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)



Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)

Lithographie

Masse effective_{ions} » Masse effective_{électrons}

- les ions du faisceau diffusent peu et pénètrent moins dans la matière avec laquelle ils interagissent (peu de rétrodiffusion)
- ⇒ **la zone d'interaction obtenue est mieux délimitée, définie**

- la résolution accessible avec la lithographie par faisceau d'ions est normalement meilleure que celle obtenue avec des électrons (pour une même taille de sonde)
- une même résine aura généralement une sensibilité plus élevée au faisceau d'ions qu'au faisceau d'électrons, du fait de cette très grande efficacité du transfert d'énergie entre les ions et la résine

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)

Lithographie

Voici les meilleurs résultats en terme de résolution, obtenus en lithographie ionique :

- des traits d'Al larges de 10 nm à partir d' AlF_3 , résine inorganique, de 50 nm d'épaisseur (décomposition de AlF_3 sous le faisceau par sublimation du F)
- des réseaux de plots avec des diamètres variant de 10 à 20 nm dans une couche de PMMA (poly(méthyl methacrylate)) de 60 nm d'épaisseur
- des lignes à base d'Au de faibles dimensions latérales (30 nm) et verticales (<10 nm) avec un facteur de forme ajustable avec la dose

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)

Gravure localisée

Lorsque le faisceau est suffisamment intense et énergétique, la collision des ions provoque la pulvérisation des atomes de la surface et une gravure localisée s'opère.

⇒ permet d'effectuer la lithographie et la gravure simultanément sans besoin d'un masque de résine intermédiaire : nanolitho-gravure

- Diminution du nombre d'étapes
- Cette gravure peut être rendue sélective ou être accélérée par l'addition d'un gaz réactif dans l'enceinte.
- Ce procédé de gravure (sélectif ou non) est utilisé pour réparer les masques ou les circuits défectueux (avec dépôt localisé possible), fabriquer des membranes, préparer des échantillons pour une analyse au microscope électronique à transmission

Des lignes larges de 8 nm ont été obtenues dans une couche de GaAs

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)

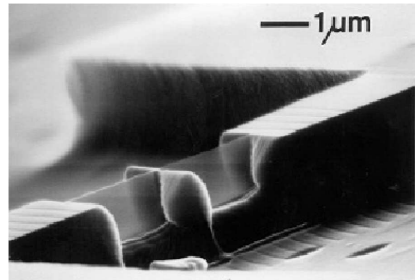
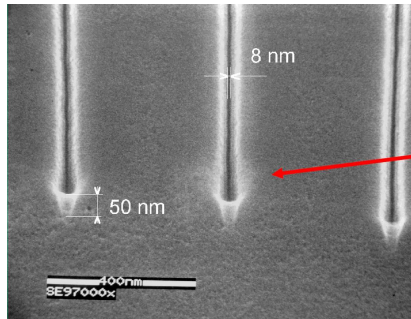
Lithographie et usinage par faisceau d'ions focalisé

- sont lents
- + sont versatiles, flexibles
- + permettent une intervention localisée directe à l'échelle nanométrique
- les ions étant des particules lourdes, ils induisent toutefois des dommages en surface :
 - ▶ amorphisation (possibilité de réduire cet effet en maintenant l'échantillon à 22K pendant l'irradiation)
 - ▶ implantation non contrôlée d'ions issus de la source (Ga...)
 - ▶ re-dépôt d'atomes éjectés lors du bombardement ionique (possibilité de réduire cet effet soit en procédant à plusieurs passages, soit en introduisant un gaz réactif dans l'enceinte pour former des éléments volatils évacués par le pompage)

Il en résulte une perte de cristallinité et une contamination de la surface.

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)



Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

Principe

La lithographie par faisceau d'électrons (Electron Beam Lithography) consiste à balayer un faisceau d'électrons d'énergie variable sur une résine électro-sensible (sensible aux électrons) pour y dessiner un motif.

La résine peut être soit

- **organique** : PMMA,...
- **inorganique** : procédé SiDWEL (Silicide Direct Write Electron Beam Lithography), NaCl, AgF₂, Al₂O₃, AlF₃,...

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

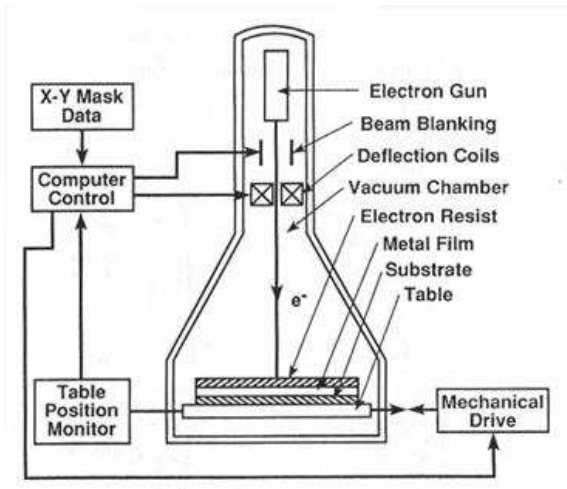
Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

Les appareils de lithographie sont

- soit des masqueurs, générateurs de faisceau gaussien,
- soit des microscopes électroniques à balayage ou à transmission (plus grande énergie de faisceau, 100-200 keV) munis d'un système de pilotage du faisceau.

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)



Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

La résolution de cette technique dépend essentiellement de quatre facteurs :

- les réglages de la colonne (mise au point, énergie des électrons...)
- le diamètre de la sonde (peut être inférieure à 1 nm dans le meilleur des cas)
- les interactions électrons-matière
- la résine utilisée

Permet de réaliser des motifs de dimensions descendant jusqu'à 5 nm.

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

Comme la longueur d'onde associée aux électrons accélérés est inférieure à l'angström, la diffraction affecte peu la **résolution** de la lithographie électronique (cf. équation 3). Celle-ci se trouve surtout **limitée par** les phénomènes liés aux **interactions entre l'électron et la matière**.

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

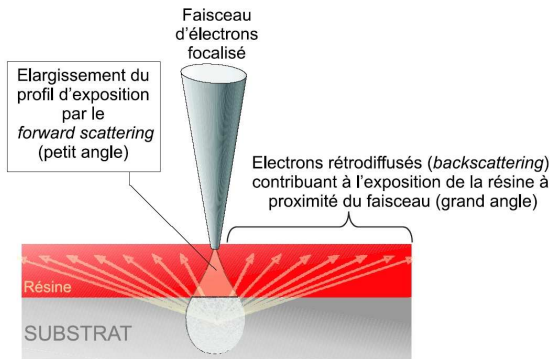


FIG. 2.11 – Exposition de la résine lors d'une lithographie électronique. Les électrons se dispersent lorsqu'ils pénètrent dans la résine : *forward scattering*. Les électrons rétrodiffusés par le substrat reviennent dans la résine : *backscattering*. Ces 2 phénomènes contribuent à exposer la résine en y engendrant des électrons secondaires.

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

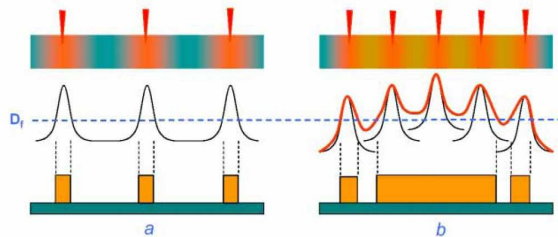


FIG. 2.20 – Illustration des effets de proximité. [46]

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

La lithographie électronique est une technique d'une grande souplesse qui permet de réaliser des motifs de géométrie diverse avec une haute résolution.

L'alignement de différents niveaux de lithographie les uns par rapport aux autres rend possible l'élaboration de dispositifs complets.

En plus d'être une technique indispensable pour la fabrication des masques pour la lithographie optique ou X, la lithographie électronique est donc particulièrement adaptée aux besoins de la recherche et à la réalisation de prototype.

Inconvénient

Le balayage séquentiel (en série) pour insoler le motif entraîne une faible vitesse d'écriture qui limite son utilisation dans l'industrie.

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

Pour augmenter le rendement de cette lithographie en vue d'une production de masse, plusieurs approches sont proposées :

- **L'utilisation d'un faisceau formé** Le faisceau est préformé par un diaphragme et possède une forme carrée ou rectangulaire. Une seule insolation suffit alors pour définir un motif de forme égale à la section de la sonde dans la résine (gain de temps considérable par rapport à l'insolation d'un même motif par points successifs, mais résolution diminuée (~ 200 nm), problème de compatibilité de la géométrie des motifs avec la forme du faisceau. . .)
- **Réaliser la lithographie avec des faisceaux de faibles énergies.** Ceci en augmentant la sensibilité des résines, le temps nécessaire à l'exposition est réduit : le rendement peut ainsi augmenter.
- **La conception de résines plus sensibles**, comme les résines chimiquement amplifiées.
- **Une utilisation des électrons en projection via un masque (exposition parallèle).** Elle permet de s'approcher de rendements plus appropriés à l'industrie. Les capacités en terme de résolution ne sont toutefois pas encore bien définies.
- **L'usage d'une matrice de micro-colonnes électroniques pour l'écriture parallèle d'un grand nombre de pixels.** Mais cette option complique le système d'exposition. Elle exige notamment la mise au point de sources fonctionnant à basse énergie (< 300 eV), de haute cohérence, stables, fiables, identiques.
La limite de résolution des futurs systèmes à micro-colonnes électroniques, permettant un rendement industriel convenable, est estimée à 40-50 nm.

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

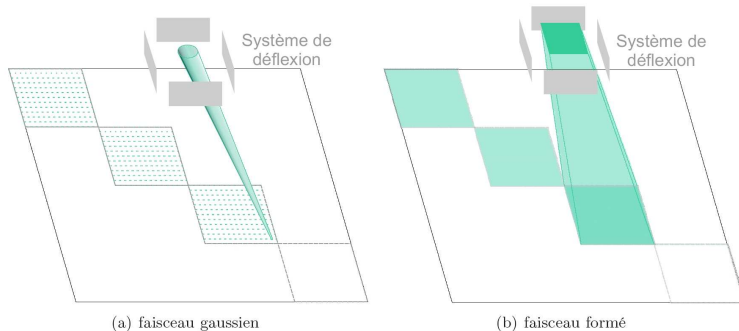
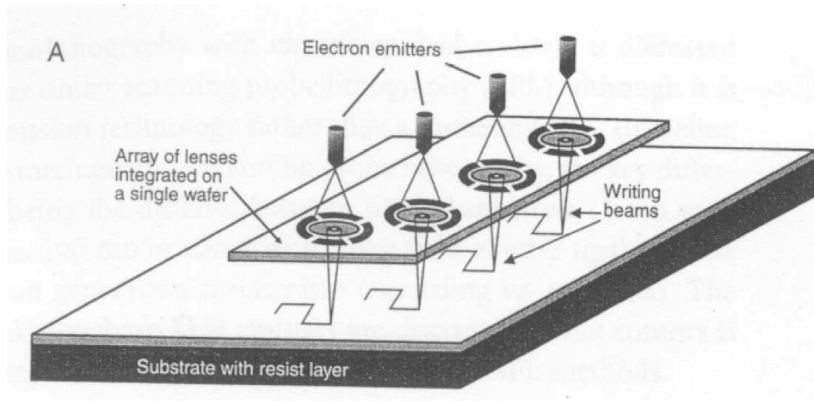


FIG. 2.5 – Deux types de faisceau d'électrons : (a) Exposition point par point avec le faisceau gaussien et (b) Exposition en juxtaposant les zones insolées par le faisceau formé.

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)



Notons que la lithographie électronique peut aussi être réalisée à l'aide d'une pointe de microscope à effet tunnel (STM).

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

Tout comme pour les ions, il est possible de reproduire un motif sur le substrat avec le faisceau d'électrons sans avoir besoin de résine.

Toutefois, cette technique ne s'applique pas à tous les matériaux.

- Ils doivent être suffisamment sensible au faisceau d'électrons pour induire un phénomène d'« auto-développement ». C'est le cas du FeF_2 et du CoF_2 pour lesquels le faisceau d'électrons provoque la sublimation des atomes F. Ainsi, seuls les atomes métalliques subsistent dans les régions exposées. (Résolution autour de 10 nm.)
- Le faisceau d'électrons permet de dissocier un précurseur organo-métallique introduit dans la chambre pour former des structures métalliques à des endroits précis de la surface. Cette technique, dite EBID pour *electron-beam-induced deposition* permet de réaliser des plots métalliques d'un diamètre inférieur à 5 nm avec un faisceau de 200 kV .

Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

Procédé	Motif de résine		Structure transférée		Sensibilité	Fabrication de dispositif
	Taille minimum	D_{CC} minimum	Taille minimum	D_{CC} minimum		
Résine organique (PMMA)	7-10 nm	30-50 nm	7 nm	40-50 nm	10^{-4} mC/cm ²	Oui
Résine «vapeur» (EBID)	5-8 nm	40-50 nm	5-8 nm	40-50 nm	10^{-1} mC/cm ²	Oui
Sublimation directe (NaCl, AlF ₃ ...)	0,5-2 nm	4 nm	10 nm	20-30 nm	0,01-10 mC/cm ²	Non
Exposition directe (SiO ₂)	3-10 nm	15 nm	5-10 nm	15 nm	2-5 mC/cm ²	Non

$D_{CC} \rightarrow$ distance centre-à-centre

TAB. A.2 – Résolution et sensibilité de différents procédés de lithographie électronique [10].

Méthode d'exposition par faisceau focalisé Laser

2 techniques

- exposition d'une résine (*réalisation masque*)
- ablation localisée

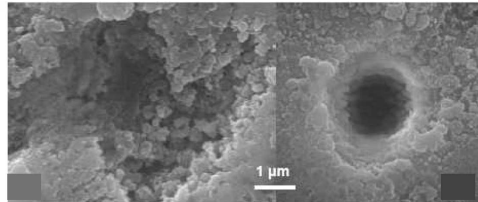
Paramètres

- longueur d'onde
- puissance
- impulsion (femtoseconde : zone thermiquement affectée très réduite)
- forme du faisceau

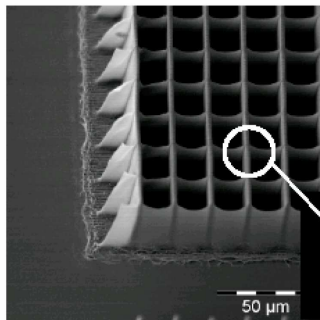
Risque de dommage important sur la surface : effet thermique. . .

Méthode d'exposition par faisceau focalisé Laser

Ablation sans correction
et avec correction du
front d'onde

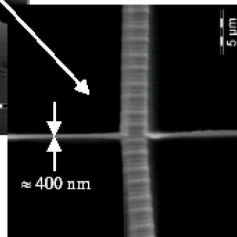


Méthode d'exposition par faisceau focalisé Laser



Nano marquage 3D

→ Création de chambres à cellules



Plan

3 - Principales méthodes de lithographie 1

- 3 Principales méthodes de lithographie 1
 - Méthode d'exposition par transmission
 - Lithographie optique (UV, DUV)
 - Lithographie par rayons X (XRL)
 - Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL)
 - Méthode d'exposition par faisceau focalisé
 - Lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIBL, Focused Ion Beam Lithography)
 - Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)
 - Laser
 - Méthode d'exposition par interférométrie

Méthode d'exposition par interférométrie

Principe

Le principe de la lithographie interférométrique (IL, *Interferometric Lithography*) est d'exposer la résine à une figure d'interférences, obtenue par la superposition d'ondes planes cohérentes.

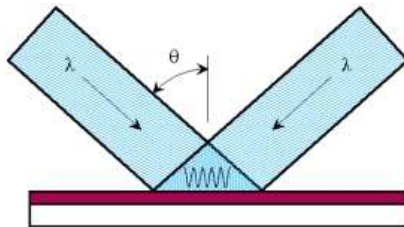
La période de la modulation sinusoïdale de l'intensité lumineuse dépend de

- la longueur d'onde λ du laser
- l'angle d'incidence θ
- l'indice n du milieu

$$\text{Periode} = \lambda / (2n \sin(\theta))$$

Motif=réseau périodique de franges

avec rotation de 90° et alignement
⇒réseau périodique de carrés ou rectangles



Méthode d'exposition par interférométrie

La taille des motifs dépend de la longueur d'onde utilisée, de la résine (épaisseur, sensibilité et contraste), du temps d'exposition et des conditions de développement.

- Cette technique se restreint donc à la réalisation de réseaux périodiques constitués de motifs à géométrie simple.
- + La période de ces derniers peut varier de moins de 50 nm à 2000 nm.
- + Cette technique permet d'obtenir des structures inférieures à 100 nm et d'exposer simultanément de grandes surfaces : des structures magnétiques de 30 nm ont été obtenues par lift-off.
- La résolution est limitée par la diffraction.

En utilisant des rayons X issus d'une source synchrotron, cette méthode a récemment permis la réalisation de réseaux avec une période inférieure à 50 nm et couvrant une surface de quelques mm² avec des expositions prenant moins d'une minute.

Méthode d'exposition par interférométrie

La résolution, la nature périodique des motifs et le fort rendement de production (en comparaison avec les techniques séquentielles) font de la lithographie interférométrique une technique adaptée pour la nanostructuration de substrat, réalisation de gabarit (*template*) pour des applications d'auto-organisation.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Principe de la lithographie et du transfert
- 3 Principales méthodes de lithographie 1
- 4 Principales méthodes de lithographie 2**
- 5 Bilan

Plan

4 - Principales méthodes de lithographie 2

- 4 Principales méthodes de lithographie 2
 - Méthode par impression : nano-impression, μ contact printing
 - Lithographie par nano-impression (NIL, Nano-Imprint Lithography)
 - Techniques dérivées de la nano-impression : Step and Flash Imprint Lithography (SFIL)
 - Techniques dérivées de la nano-impression : Micro-Contact Printing (MPC)
 - Méthode par champ proche avec AFM ou STM
 - Méthodes hybrides

Méthode par impression

Lithographie par nano-impression (NIL, Nano-Imprint Lithography)

Principe

La « Nano-Imprint Lithography (NIL) » ou la « nano-impression », est l'impression directe de structures nanométriques dans une couche de résine via un moule.

Elle consiste à déformer physiquement une couche de polymère thermoplastique par pression avec un moule (son motif a été préalablement défini par l'une des techniques de lithographie conventionnelles telle que la lithographie électronique).

Méthode par impression

Lithographie par nano-impression (NIL, Nano-Imprint Lithography)

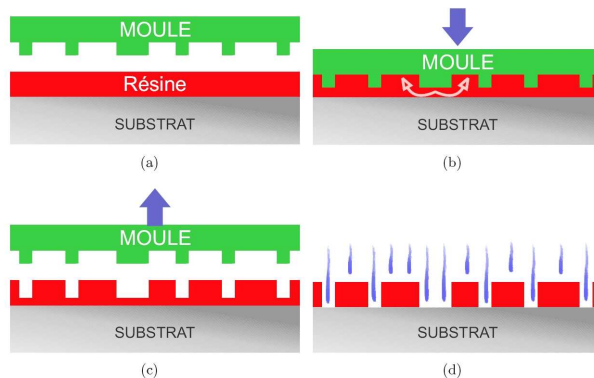


FIG. A.8 – Schéma de principe de la nano-impression. Les étapes illustrées sont : (a) Chauffage du moule et de l'échantillon ou seulement de l'échantillon à $T > T_g$ (b) Contact entre le moule et l'échantillon et application d'une pression uniforme (c) Refroidissement et séparation du moule et de l'échantillon à $T < T_g$ (d) Gravure ionique réactive pour retirer la couche de résine résiduelle suivie d'un éventuel lift-off pour obtenir un masque métallique.

Méthode par impression

Lithographie par nano-impression (NIL, Nano-Imprint Lithography)

Le pressage est effectué

- à haute pression
- à une température supérieure à la température de transition vitreuse T_g du polymère.

Comme elle utilise les propriétés thermoplastiques des polymères plutôt que leur interaction avec des rayonnements (UV, rayons X) ou des faisceaux de particules chargées (électrons, ions), la NIL permet d'atteindre **une très haute résolution** (absence de limite de diffraction ou de diffusion électronique dans la résine) qui dépend essentiellement de celle du moule (facteur de reproduction 1).

Applications

On peut ainsi réaliser des structures de quelques nanomètres à plusieurs microns dans le polymère.

Méthode par impression

Lithographie par nano-impression (NIL, Nano-Imprint Lithography)

Avantages

- grande efficacité (procédé parallèle)
- très faible coût d'équipement
- peut être appliquée sur des substrats de 200 mm de diamètre
- homogénéité des structures
- précision de positionnement relative inférieure à 30 nm pour une surface de 30x30 mm²

Méthode par impression

Lithographie par nano-impression (NIL, Nano-Imprint Lithography)

Inconvénients

- la fabrication des moules avec des motifs de très haute résolution et de haute densité sur de grandes surfaces
- l'impression de grands et petits motifs simultanément (il est difficile de déplacer de larges quantités de polymère sur une grande distance)
- l'alignement entre plusieurs niveaux de lithographie
- Le rendement de production pour l'industrie n'est pas encore concurrentiel avec celui de la lithographie optique en raison des temps d'impression (chauffage et refroidissement), d'alignement, de nettoyage du moule, d'enduction du moule par une couche anti-adhérente.

Méthode par impression

Lithographie par nano-impression (NIL, Nano-Imprint Lithography)

Ce type de lithographie a donné naissance à un grand nombre de techniques dérivées que l'on peut regrouper sous le terme de méthodes de lithographie douces (en anglais, *soft lithography*) ou alternatives dont le dénominateur commun est : faible coût, grande vitesse, résolution extrême.

Méthode par impression

Techniques dérivées de la nano-impression : Step and Flash Imprint Lithography (SFIL)

Le SFIL constitue aussi une solution d'amélioration du rendement.

Principe

Un moule rigide et transparent met en forme une solution de faible viscosité qui, une fois exposée au rayonnement adéquat (UV) (à travers le moule), se polymérise et conserve la forme des motifs.

La transparence du moule permet ainsi :

- un alignement plus rapide (mais pas beaucoup plus précis)
- la photopolymérisation de la solution à température ambiante, évitant ainsi les montées et descentes en température.

Ce procédé améliore donc le rendement pour des résolutions de l'ordre 10-50 nm.

De plus, la possibilité de le réaliser dans des instruments de lithographie optique (masqueur) constitue un réel avantage.

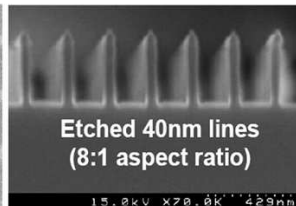
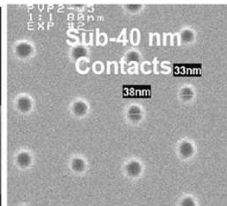
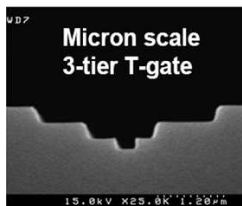
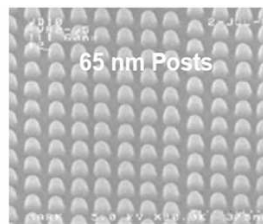
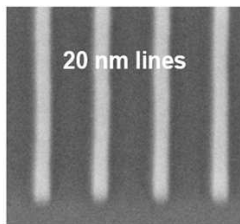
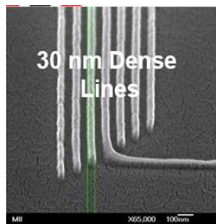
Méthode par impression

Techniques dérivées de la nano-impression : Step and Flash Imprint Lithography (SFIL)

Application	Key Characteristics of Application	S-FIL Advantage(s)
Compound Semiconductors	<ul style="list-style-type: none"> ■ Uses fragile substrates ■ Fine layer-to-layer alignment ■ Depends on sub 100 nm features 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Low pressure, room temperature process prevents damaging fragile substrate ■ High alignment accuracy
Molecular Electronics	<ul style="list-style-type: none"> ■ High resolution ■ Fine alignment 	<ul style="list-style-type: none"> ■ High alignment accuracy ■ Sub 50 nm features
Photonics & Optics	<ul style="list-style-type: none"> ■ Moderate align ■ Functional materials with specific optical properties ■ Feature sizes < 500 nm ■ Need for low line edge roughness (LER) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ High resolution replication capability ■ Functional lithography ■ Fewer litho steps (3-D imprinting) ■ Exactly copies template with extremely low LER
Displays	<ul style="list-style-type: none"> ■ Thick structures ■ Fine features required for arrangement of liquid crystals 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3-D imprinting (fewer lithography steps) ■ High resolution
MEMS/NEMS	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3-D Structures with moderate feature resolution ■ Thick structures ■ Moderate layer-to-layer alignment 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fewer litho steps (3-D imprinting and new shapes) ■ Imprinting on functional materials eliminates etch step
Advanced Packaging	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3-D Structures (3D stacks) with moderate resolution ■ Functional materials 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fewer litho steps (3-D imprinting) ■ Imprinting on functional materials eliminates etch step
Bio-devices & Micro-fluidics	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sensitive to high temperatures and pressures ■ Organic materials ■ 3-D/complex structures requiring layer-to-layer alignment ■ Micro/Nano-sized channels 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Low pressure, room temperature process <ul style="list-style-type: none"> - Bio materials compatible process ■ 3-D imprinting using functional materials ■ Low distortion, high resolution alignment
Data Storage (Patterned Media)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nano sized features ■ Configuration sensitive to "swelling"/relaxation 	<ul style="list-style-type: none"> ■ High resolution ■ Low temperature and pressure process

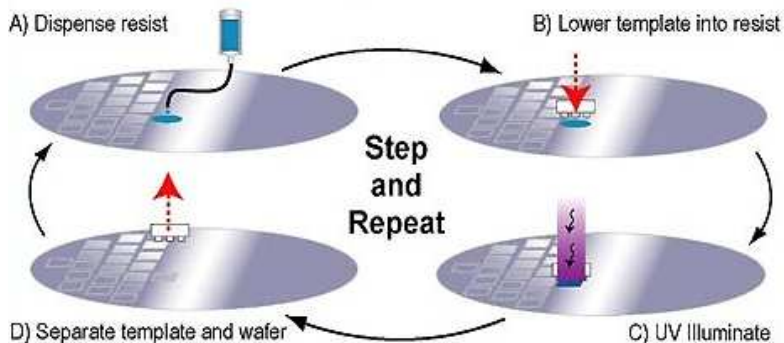
Méthode par impression

Techniques dérivées de la nano-impression : Step and Flash Imprint Lithography (SFIL)



Méthode par impression

Techniques dérivées de la nano-impression : Step and Flash Imprint Lithography (SFIL)



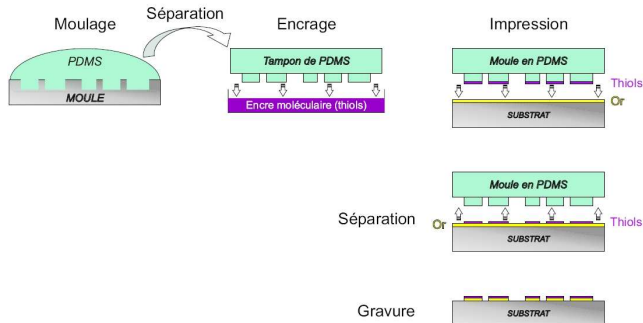
Méthode par impression

Techniques dérivées de la nano-impression : Micro-Contact Printing (MPC)

Principe

Un tampon en élastomère (réalisé par moulage d'un tampon « dur », le maître) est d'abord enduit d'une encre « moléculaire » à base de molécules s'organisant en mono-couche.

Il est ensuite posé sur l'échantillon : les molécules se greffent à la surface appropriée puis se détachent du tampon pour former une couche auto-assemblée, copie conforme des motifs du tampon.



Plan

4 - Principales méthodes de lithographie 2

- 4 Principales méthodes de lithographie 2
 - Méthode par impression : nano-impression, μ contact printing
 - Lithographie par nano-impression (NIL, Nano-Imprint Lithography)
 - Techniques dérivées de la nano-impression : Step and Flash Imprint Lithography (SFIL)
 - Techniques dérivées de la nano-impression : Micro-Contact Printing (MPC)
 - Méthode par champ proche avec AFM ou STM
 - Méthodes hybrides

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

La lithographie basée sur la microscopie par champ proche (SPM pour *Scanning Probe Microscopy*) a récemment permis de fabriquer des structures avec des dimensions s'échelonnant de l'échelle atomique jusqu'à ~ 100 nm.

Elle utilise soit le microscope à effet tunnel (STM, pour *Scanning Tunneling Microscope*), soit le microscope à force atomique (AFM, pour *Atomic Force Microscope*), soit leurs techniques dérivées.

Dans les deux cas, une pointe est approchée de la surface étudiée et la distance pointe-surface au cours du balayage est contrôlée par une boucle de régulation.

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

- Dans le cas du STM, la pointe et la surface sont tellement proches que leurs nuages électroniques se recouvrent. L'application d'une tension suffit alors à générer un faible courant tunnel (typiquement de 10 à 1000 pA) entre la pointe et la surface.
- Pour l'AFM, les forces d'interaction entre la pointe et la surface provoquent une modification détectable (déformation, décalage de la fréquence de résonance...) du micro-cantilever flexible sur lequel la pointe est montée. En résumé, le STM utilise le courant tunnel circulant entre la pointe et l'échantillon conducteur tandis que l'AFM est basé sur la force d'interaction entre la pointe et l'échantillon.

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

Principe

La lithographie par champ proche utilise l'interaction pointe-échantillon pour graver, déposer, déplacer des atomes, contrôler des réactions chimiques. . .

Permet de fabriquer des structures avec des dimensions s'échelonnant de l'échelle atomique jusqu'à ~ 100 nm.

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

Cela peut se faire entre autres par

- **Manipulation d'atomes et de molécules adsorbés sur des surfaces métalliques** (Utilise les forces existantes entre la pointe STM et un atome adsorbé en surface pour le déplacer vers une nouvelle position sur la surface soit en le tirant ou en le poussant avec la pointe, soit en le transportant d'un endroit à un autre avec la pointe)
- **Evaporation sous champ** (La présence d'un fort champ électrique entre la pointe et la surface ionise et extrait les atomes de la pointe qui se déposent sur la surface ou inversement : une impulsion ou une rampe de tension provoque ainsi la formation de trou ou de plot à la surface)
- **Oxydation anodique** (utilise une pointe STM ou AFM conductrice polarisée négativement (cathode) pour oxyder localement la surface de Si ou de métal (anode) dans un environnement humide)

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

Cela peut se faire entre autres par

- **Indentation ou thermo-indentation** (Perforation de la couche de résine par simple pression d'une pointe AFM appliquant des forces de l'ordre du μ Newton)
- **Lithographie électronique**
- **Dip-Pen-Nanolithography (DPN)**
- **Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)**
- **Desorption d'atomes d'H greffés en surfaces**
- **Décomposition thermique d'un oxyde en surface**

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

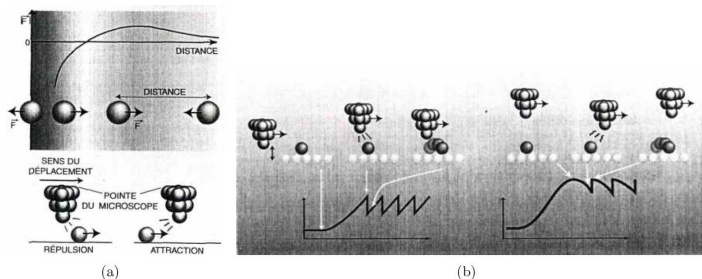


FIG. A.11 – (a) La force entre atomes et/ou molécules est attractive à longue distance (type Van der Waals) et répulsive à courte distance (répulsion électrostatique de la pointe et de l'atome). On utilise la répulsion pour pousser un atome sur une surface et l'attraction pour le tirer (b) Variation de la hauteur de la pointe quand elle pousse ou tire l'atome dans le mode à courant constant. La courbe, approximativement en dents de scie, reflète la périodicité de la surface [75].

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

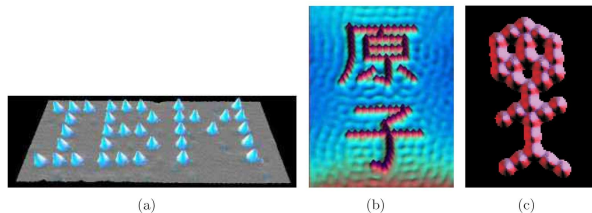


FIG. A.12 – Quelques réalisations de manipulations atomiques ou moléculaires : (a) Sigle IBM en Xe sur Ni(111) [76] (b) Caractère Kanji signifiant « atome » obtenu par manipulation d'atomes de Fe sur une surface de Cu [77] (c) CO-man, molécules de CO sur Pt(111) [78–80].

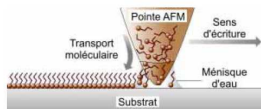
Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

Contact pointe-surface

Dip-Pen-Nanolithography (DPN)

Elle utilise la pointe comme une plume. La surface d'or fait office de papier et les molécules de thiol, se liant à l'Au, constituent l'encre. Après avoir trempé la pointe dans une solution de thiols, le contact pointe-échantillon d'Au permet le transfert des molécules à travers le ménisque d'eau. Les thiols, non solubles dans l'eau, se fixent alors très localement sur la surface en couche auto-assemblée.

- motifs larges de 1-2 μm [136]
- motifs plus compliqués en utilisant plusieurs encres
- instrument avec 8 leviers AFM, capables de DPN en parallèle, présente une résolution de 50 nm [137].



Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

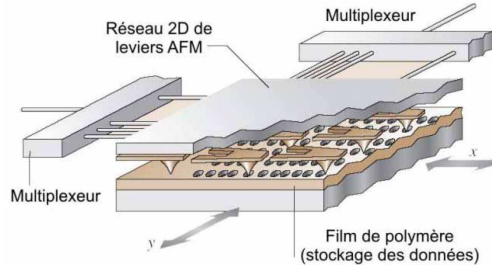


FIG. A.13 – Schéma de principe du «millipède», système de stockage de données basé sur la thermo-indentation par AFM, développé par IBM [142, 151]. Plusieurs leviers AFM sont intégrés sur un même support. Chaque levier porte une pointe AFM et un couple d'électrodes permettant un positionnement précis sur le substrat et une modification locale de la morphologie d'une couche polymère par chauffage.

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

Pour l'instant, la lithographie par champ proche, technique de lithographie à l'échelle nanométrique, est encore cantonnée aux laboratoires pour l'étude des surfaces et la nanofabrication. Elle offre la possibilité de déplacer un seul ou un groupe d'atomes ainsi que de modifier certaines surfaces à l'échelle nanométrique. De paire avec sa résolution sans équivalent, ses plus grands désavantages sont sa vitesse d'écriture et sa mise en œuvre.

Heureusement, la compacité des microscopes par champ proche facilite la conception de réseau de pointes. Ainsi, afin d'augmenter cette vitesse d'écriture, des systèmes à multi-pointes pour une écriture parallèle sont en développement, comme le «millipède» de chez IBM basé sur la thermo-indentation.

Plan

4 - Principales méthodes de lithographie 2

- 4 Principales méthodes de lithographie 2
 - Méthode par impression : nano-impression, μ contact printing
 - Lithographie par nano-impression (NIL, Nano-Imprint Lithography)
 - Techniques dérivées de la nano-impression : Step and Flash Imprint Lithography (SFIL)
 - Techniques dérivées de la nano-impression : Micro-Contact Printing (MPC)
 - Méthode par champ proche avec AFM ou STM
 - Méthodes hybrides

Méthodes hybrides

Parmi toutes ces techniques de lithographie, certaines peuvent être complémentaires : lithographie optique (motif micrométrique et grande surface) et lithographie électronique (versatilité et haute résolution), lithographie électronique et lithographie champ proche (très haute résolution et surface réduite), nano-impression et lithographie optique. . . Leur association afin de connecter des structures d'échelles différentes et d'obtenir le dispositif voulu est appelée « hybridation » des techniques de lithographie.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Principe de la lithographie et du transfert
- 3 Principales méthodes de lithographie 1
- 4 Principales méthodes de lithographie 2
- 5 Bilan**

Bilan sur les différentes méthodes de lithographie : comparatif

LITHOGRAPHIE	MÉTHODE	UTILISATION			RÉSOLUTION (Critical Dimension (CD))			VITESSE D'INSOLATION CHAMP possible
		L	R	I	(a) pratique	(b) ultime	Principale limite	
Optique UV (350-450 nm) DUV (220-310 nm) 157 nm 157 nm	avec masque .par contact .par contact .par contact .en proximité	X			0,7 μm [65] 0,3 μm [65] 150 nm [65] 1-2 μm [65]		Diffraction : o de Fresnel (relation A.1) (relation A.2)	$\geq \text{cm}^2/\text{s}$
— 193 nm 193 nm 157 nm	— .par projection .par projection (<i>immersion</i>) .par projection			X	73 nm [7] 60 nm [7]	65 nm [7] 45 nm [7] 45 nm [7]	o de Fraunhofer (relation A.3)	
par rayons X (XRL)	avec masque .en proximité (1 : 1)	X	X		< 30 nm [16]	15 nm [16]	Diffraction de Fresnel (relation A.5)	$\sim \text{cm}^2/\text{s}$ 5x5 mm ² [17]
par extrêmes UV (EUVL)	avec masque .par projection (1/4)		X		38 nm [7]	32 nm [7]	Diffraction de Fraunhofer	$\sim \text{cm}^2/\text{s}$
électronique en projection (EPL)	avec masque .par projection (1/4)		X		80 nm [10]	35 nm [10]	Répulsion particule-particule	$\sim 0,5 \text{ cm}^2/\text{s}$ [10]
ionique en projection (IPL)	avec masque (stencil) .par projection (double exposition)		X		50 nm [26]	< 50 nm [10]	Répulsion particule-particule et double exposition	$\sim 0,5 \text{ cm}^2/\text{s}$
par faisceau d'électrons focalisé (EBL)	par balayage	X	X	X	5-7 nm [42]	3-5 nm [43]	Interaction électrons-résine	$\sim 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 10x10 mm ² [155]
par faisceau d'ions focalisé (FIBL)	par balayage . dans résine . dans substrat (nano-usinage)	X	X	X	10-20 nm [32] 8 nm [32]		Taille de sonde	$\sim 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$
par interférences (IL)	par figure d'interférences	X			30 nm [58]		Longueur d'onde et sensibilité de résine	qq mm ² /min [57] 200x200 mm ² [156]
par nano-impression (NIL)	avec moule	X			7-10 nm [66]		Résolution du moule Rayon de giration du polymère	$\sim 0,2 \text{ cm}^2/\text{s}$ [71]
par μContact Printing (μ CP)	avec tampon et SAM	X			60 nm [73]		Résolution du tampon et SAM (diffusion, rayon de giration...)	$\sim 5 \text{ cm}^2/\text{s}$ [73]
par champ proche (SPM)	par balayage Manipulation atomique Modification de surfaces	X	X		atome ou molécule 3 nm [99, 115]		Qualité de pointe	< 10 ⁻⁴ cm ² /s [10] 0,1x0,1 mm ² [157]

Les caractéristiques en gras signifient que la méthode correspondante est compatible avec notre objectif. (X—accessibilité)

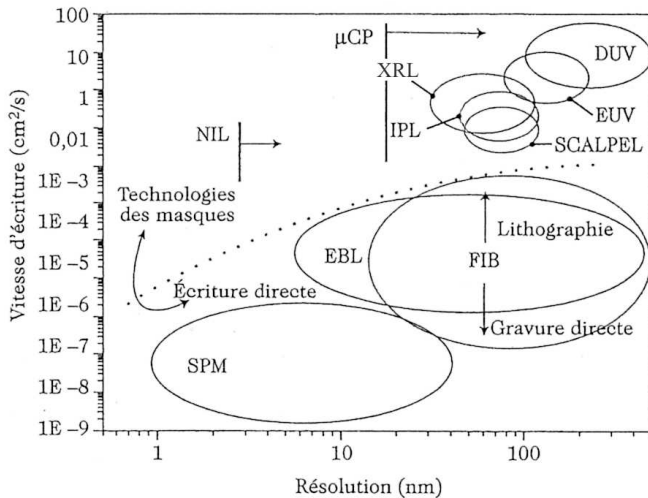
Les données en italique correspondent à des prévisions.

L—Laboratoires

R—Recherche et développement

I—Industrie

Bilan sur les différentes méthodes de lithographie : comparatif



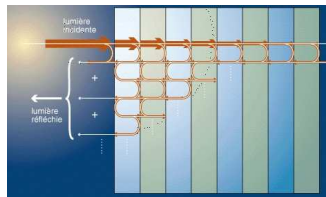
Méthode d'exposition par transmission

Lithographie par ultraviolets extrêmes (EUVL) : Miroir de Bragg

Ce dispositif est constitué d'une succession de couches de matériaux transparents dont les indices de réfraction sont tous différents. A chaque interface entre deux couches, la lumière est partiellement réfléchie et transmise.

Obtention en sortie d'interférences constructives

Le dispositif se comporte comme un miroir, qui est donc sélectif (seule la fraction de lumière de longueur d'onde convenable est réfléchie).



Méthode d'exposition par faisceau focalisé

Lithographie par faisceau d'électrons focalisé (EBL, Electron Beam Lithography)

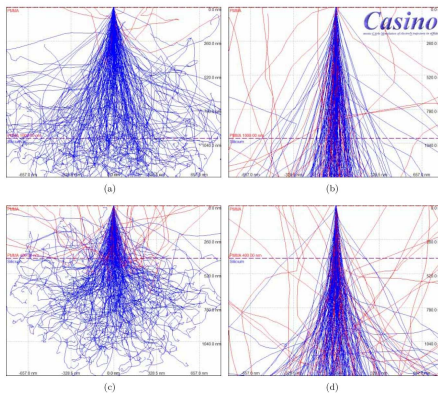


FIG. 2.12 – Simulation des trajectoires de 200 électrons primaires dans la résine avec le logiciel CASINO [43] (a) Simulation avec une énergie de 10 keV dans une épaisseur de PMMA de 1 μm . (b) Simulation avec une énergie de 30 keV dans une épaisseur de PMMA de 1 μm . (c) Simulation avec une énergie de 10 keV dans une épaisseur de PMMA de 400 nm. (d) Simulation avec une énergie de 30 keV dans une épaisseur de PMMA de 400 nm.

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

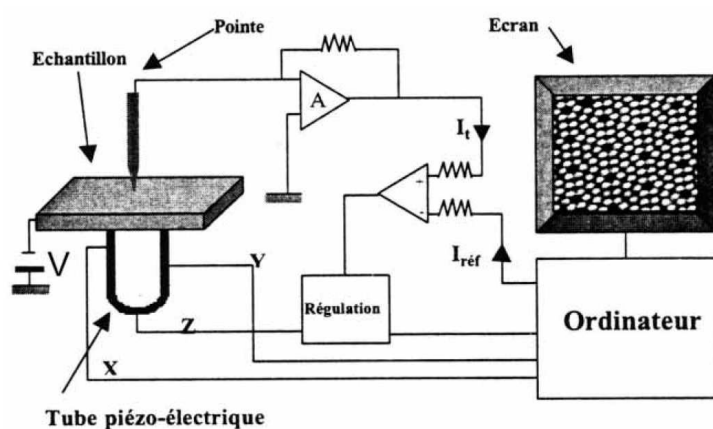


FIG. C.1 – Schéma du principe de fonctionnement du STM. [3]

Lithographie par champ proche (AFM ou STM)

