

0,1 μm en production de masse en lithographie optique ?

D. Henry, P. Schiavonne et O. Toublan

*France Telecom, Centre National d'Études des Télécommunications, BP. 98,
38243 Meylan cedex, France*

Résumé : Dans le contexte d'une production de masse à 0.1 μm , la lithographie optique reste la seule technologie capable de satisfaire les critères économiques et techniques à l'exclusion (de prime abord) de la résolution. Les progrès de l'ingénierie optique permettent à cette technique de surmonter cet handicap et de demeurer la technologie incontournable sinon exclusive.

1. LE CONTEXTE ECONOMIQUE

En une vingtaine d'années, l'industrie de la microélectronique silicium est devenue une "industrie lourde" réalisant en 1995 un chiffre d'affaires de 750 milliards de francs avec un taux de croissance ces dernières années de 30 à 40 %. Même si nous revenons à la pente historique (et plus raisonnable) d'une croissance annuelle de 15-20 %, ce marché représentera quelque 1.000 milliards (10^{12}) de francs dans dix ans.

Cette industrie impose un investissement d'un franc pour réaliser un franc de chiffre d'affaires, ce qui situe le niveau des investissements nécessaires ; ainsi, une unité de production, en construction en Chine par un groupe sino-japonais, va nécessiter un investissement de 10 milliards de francs pour des produits (mémoires ou microprocesseurs) qui seront vendus quelques dizaines de francs. Mi 96, le prix d'une mémoire 4 Mégabits (4 millions d'informations binaires stockées) est de 10 francs, une mémoire 16 Mégabits 50 francs, un microprocesseur "power-PC" 75 francs.

Les produits commercialisés se renouvellent au rythme d'une génération tous les trois ans, cette évolution se caractérise pour les mémoires par le quadruplement du nombre d'informations binaires que l'on peut stocker (cf. Tableau 1). Cette évolution a été programmée jusqu'en 2010 par l'association des industriels du semiconducteur (SIA). Ce plan de développement prévoit la fabrication en 2010 de puces permettant de stocker 64 milliards d'informations binaires ou de microprocesseurs d'un milliard de transistors fonctionnant à une fréquence d'un Gigahertz [1]. Ces puces de 10 à 15 cm^2 de surface seront fabriquées sur des galettes de silicium de 400 mm de diamètre ; la dimension la plus fine (qui caractérise une génération de produits) sera de 70 nm. On peut épiloguer sur le réalisme d'un tel plan de développement, dans les faits, on assiste à une accélération de l'évolution des produits par rapport aux prévisions : ainsi, IBM va démarrer en 1997 la production de mémoires 256 Mégabits (0.25 μm) avec un an d'avance par rapport aux prévisions [2].

2. LA PLACE DE LA LITHOGRAPHIE OPTIQUE

La technologie responsable de cette formidable évolution est la lithographie optique. Elle reste la technologie motrice de l'évolution de la microélectronique, et est essentiellement à l'origine de la reprise du leadership par l'industrie américaine (INTEL) au détriment de l'industrie japonaise (NEC) grâce à la fourniture par cette même industrie japonaise (NIKON) de photorépéteurs très performants.

Les progrès réalisés en lithographie optique auront permis un gain d'un facteur 100 sur la résolution en 50 ans (de 10 μm en 1957 à 0.1 μm en 2007) tout en fournissant les tailles de champ, précision d'alignement et capacité de production nécessaires.

Démarrage production	1998	2001	2004	2007	2010
Résolution (μm)	0.25	0.18	0.12	0.1	0.07
DRAM	256 M	1 G	4 G	16 G	64 G
Surface puce (cm^2)	3	5	7	10	14
Précision alignement (nm)	75	50	40	30	20
Taille tranche (ϕ ,mm)	300	300	300	400	400

Tableau 1 : plan de développement (SIA roadmap, 1995) [1]

En 1990, il était communément admis que la limite d'une application commerciale de la lithographie optique (production de masse) était de 0.35 μm ; en 1992 cette limite était repoussée à 0.15 μm .

En 1996, la technologie 0.25 μm va entrer en production en utilisant des équipements de lithographie optique (insolation à 248 nm par laser KrF). Les équipementiers préparent la génération suivante basée sur une insolation à 193 nm à partir d'un laser ArF ; cette génération devrait couvrir les besoins 0.18 - 0.13 μm .

Si l'on se réfère au plan de développement du SIA, dans 10-15 ans, les besoins en résolutions seront encore plus faibles : 0.1 μm puis 0.07 μm .

La question à laquelle nous tenterons de répondre est : la lithographie optique peut-elle fournir la résolution mythique de 0.1 μm ? De fait, le problème n'est pas un simple problème technique mais aussi un problème économique et le choix technologique retenu dépendra du niveau de risques que les industriels estimeront tolérables.

3. LES CRITERES DE CHOIX D'UN EQUIPEMENT

L'équipement doit d'abord satisfaire aux critères techniques imposés par le type de produits fabriqués. Ces critères sont :

- la résolution (cf. Tableau 1),
- la profondeur de champ,
- la taille du champ d'insolation (> 10 cm^2 dans 10 ans, cf. Tableau 1),
- la capacité d'alignement niveau à niveau qui doit être égale au tiers de la dimension critique pour obtenir un dispositif fonctionnel électriquement (les nouvelles générations de photorépéteurs fournissent des capacités d'alignement <50 nm).

- Un temps moyen de fonctionnement d'un minimum de 1000 heures sans interruption (pour maintenance ou réparation).

- Enfin, il faut tenir compte du fait que l'équipement choisi doit pouvoir être livré en plusieurs dizaines d'exemplaires (nombre de photorépéteurs par unité de production) dans un délai d'un an ce qui implique une capacité de fabrication correspondante de la part des équipementiers. En 1995, 1300 photorépéteurs ont été installés dans le monde dont plus de la moitié par un seul équipementier (NIKON). Le coût moyen d'un photorépéteur est de 5 M\$ (avec la piste d'étalement). Le marché du photorépéteur a représenté 17 milliards de francs en 1995 et devrait atteindre plus de 20 milliards en l'an 2000 [4].

A performances techniques égales, les industriels disposent d'une sorte de métrique aidant au choix de l'équipement. Cette métrique, appelée Cost Of Ownership (que nous traduirons par coût de production), inclut : le prix d'achat et d'installation, les coûts liés à l'environnement, la maintenance, la conduite de l'équipement, le prix des consommables (dont la résine photosensible en premier lieu), le temps moyen de bon fonctionnement et l'impact sur le rendement de production.

Finalement, la question posée n'est plus : la lithographie optique peut-elle fournir la résolution requise ? mais : la lithographie optique peut-elle satisfaire les critères techniques et économiques exposés ci-dessus ? La réponse est oui et ceci jusqu'à des dimensions de $0.1 \mu\text{m}$ à l'exclusion - a priori - de la résolution et de la profondeur de champ. Nous allons donc analyser quels sont les facteurs limitatifs de la résolution.

De l'objet à l'image développée, nous empruntons une chaîne commune à toute technique de transport d'informations. Cette chaîne comporte :

- une porteuse qui véhicule l'information,
- un modulateur qui introduit les données,
- un canal de transmission qui agit comme un filtre des fréquences spatiales,
- un détecteur qui convertit l'image aérienne de durée temporelle limitée (inférieure à la seconde) en une image 3D permanente.

4. LES TECHNOLOGIES CONCURRENTES

4.1 La lithographie par rayon X

La première technique concurrente de la lithographie optique est la lithographie par rayons X (10 \AA) à faisceau parallèle, dite encore de proximité. Cette technologie a bénéficié d'un effort de recherche important pendant ces 20 dernières années sans arriver à percer industriellement.

Les avantages techniques sont :

- la longueur d'onde d'insolation (10 \AA) qui permet d'obtenir des résolutions bien inférieures à $0.1 \mu\text{m}$
- la profondeur de champ pratiquement infinie puisque le faisceau d'insolation est parallèle.

Ces avantages techniques ont perdu de leurs attraits au fil des ans. En particulier la résolution n'est pas limitée par la porteuse mais par la réalisation du masque (pas de rapport de réduction, membrane). Les deux défauts majeurs de cette technique, l'alignement niveau à niveau et la non-granularité (une source d'insolation pour n photorépéteurs) deviennent de plus en plus pénalisants. Du fait que la formation de l'image se fait par un masque constitué d'une membrane susceptible de dilatations différentielles et que tout désalignement d'un motif sur le masque est intégralement

retranscrit dans la résine, le désalignement global ne pourra être inférieur à 70 - 100 nm soit deux fois supérieur à celui obtenu avec un équipement de lithographie optique.

4.2 La lithographie par faisceaux d'électrons ou d'ions

Les équipements de lithographie par faisceaux d'électrons ont été développés il y a vingt ans pour réaliser les masques. Ils fournissent des résolutions de quelques dizaines de nm sans difficulté (spot gaussien). Ils sont utilisés en écriture directe sur tranche pour la réalisation de circuits prototypes. Ces équipements possèdent en terme de résolution ou alignement des performances identiques ou meilleures à un équipement de lithographie optique ; en revanche le temps d'écriture pour des faisceaux gaussiens n'est en aucune mesure comparable (plusieurs dizaines d'heures par plaque pour de très gros circuits). Afin de contourner cette difficulté, les équipementiers ont étudié plusieurs approches.

Le premier équipement disponible commercialement permettant un accroissement de la capacité de production est un équipement à faisceau de dimension variable (ETEC, HITACHI). Des problèmes de maîtrise technologique de la colonne optique n'ont pas permis à ces équipements de percer commercialement dans le domaine des résolutions submicroniques.

Deux autres approches ont été étudiées : les multifaisceaux et la projection de cellules. La machine multifaisceaux la plus élaborée a été construite et testée en 1992 par Fujitsu. Elle consiste en 1024 faisceaux contrôlés individuellement. Chaque faisceau a une taille de $0.08 \mu\text{m}$ (résolution limite) ; la capacité de production est estimée à 20 plaques par heure. La limitation de cette approche est due au flot de données à transmettre à la colonne électronique (commande de 1024 faisceaux). La démonstration de l'approche "projection de cellule" a été faite en 1991 par la même équipe de Fujitsu. Un faisceau d'électrons est occulté par un masque "stencil" réalisé à partir d'une membrane de silicium. Cette technique permet de projeter des cellules de motifs qui sont assemblées pour former le niveau lithographique désiré. Cette technique permet des résolutions de $0.13 \mu\text{m}$ et une capacité de production de 10 tranches par heure. Il existe un projet équivalent aux USA dénommé "SCALPEL". Cet équipement doit fournir une résolution de 0.18 à $0.1 \mu\text{m}$ et une capacité de production de 30 plaques par heures.

Basé sur le même principe, une équipe autrichienne (IMS) a développé un équipement à partir d'un faisceau d'ions d'hydrogène ou d'hélium de 200 KeV. Un consortium américain (Advanced Lithography Group, Columbia) dans lequel figurent TI, Micron, Laurence Berkeley Lab... soutient ce projet. Cet équipement devrait couvrir les générations $0.18 - 0.1 \mu\text{m}$. Un premier prototype sera opérationnel fin 97 : résolution de $0.18 \mu\text{m}$, profondeur de champ de $100 \mu\text{m}$, champ de $20 \times 20 \text{ mm}^2$ et facteur de réduction de 3.

5. L'ETAT DE L'ART DE LA LITHOGRAPHIE OPTIQUE

5.1 La porteuse (la longueur d'onde)

Jusqu'au milieu des années 80, la maîtrise des matériaux constituant les systèmes optiques a limité l'utilisation du spectre électromagnétique à la longueur d'onde de 436 nm correspondant à l'émission de la raie g d'une décharge de vapeur de mercure; les progrès réalisés dans le domaine des matériaux ont permis d'utiliser la raie I émettant à

la longueur d'onde de 365 nm. Cette longueur d'onde permet d'assurer la production des circuits intégrés jusqu'à une dimension de 0.3 μm . En 1995, 90 % des photorépéteurs livrés étaient équipés d'un système d'insolation à 365 nm.

Nous assistons aujourd'hui à l'introduction en production de photorépéteurs utilisant une longueur d'onde de 248 nm fournie par le laser excimère KrF, cette longueur d'onde va assurer le démarrage de la production de produits "0.25 μm " (mémoires 256 Mégabits).

La prochaine longueur d'onde d'insolation sera 193 nm délivrée par le laser ArF. Les photorépéteurs 193 nm (disponible commercialement avant la fin de cette décennie) couvriront la gamme 0.18 μm - 0.13 μm (avec un recouvrement avec la raie 248 nm pour la dimension 0.18 μm). La société ISI (Integrated Solution Inc.) vient de livrer un équipement 193 nm possédant une ouverture numérique variable de 0.4 à 0.6 et une optique catadioptrique de réduction; cet équipement permet de réaliser des motifs de 0.16 μm avec une profondeur de champ de 0.6 μm .

Il y a une controverse sur l'après 193 nm : le laser F₂ à 157 nm est disponible commercialement, mais outre le fait que les matériaux permettant de réaliser les optiques n'ont pas encore la maturité industrielle souhaitée (CaF₂), cette solution n'offre qu'un gain de 20 % sur la résolution comparée à la raie 193 nm.

Une autre longueur d'onde potentielle est la radiation 126 nm fournie par le laser Ar₂. Cette technique nécessite obligatoirement l'utilisation d'optiques réfléchives (dépôts de AlMgF₂). Les problèmes à résoudre sont multiples et complexes : la colonne optique, la réalisation du masque, la mise au point d'une résine capable de détecter l'image malgré des fluences très faibles.

La dernière longueur d'onde (classifiée par ordre de longueur d'onde décroissante) proposée est 13 nm; cette longueur d'onde est dénommée EUV (Ultra Violet extrême) par similitudes aux longueurs d'ondes dénommées DUV (Deep UV ou ultraviolet profond couvrant la bande 250-100 nm). Dans la gamme 10-40 nm il est possible de construire des optiques réductrices catadioptriques (du type de Schwarzschild par exemple) donc de rester dans la même problématique que pour les photorépéteurs actuels (réduction, granularité). La radiation 13 nm est produite par l'impact d'un faisceau laser (KrF) sur une cible métallique à Z très élevé (W ou Re). Des motifs de 50 nm avec des profondeurs de champ supérieures au micron ont été réalisés par plusieurs équipes (NIKON, AT & T, Sandia Laboratory). Un photorépéteur prototype de réduction 4X a été construit par le Sandia Laboratory, il permet d'insoler des plaquettes de 400 mm de diamètre ; cet équipement a permis de réaliser des transistors fonctionnels de 0.13 μm .

λ (nm)	introduction sur le marché	besoin initial μm	résolution limite (μm)
436	1980	1.2	0.6
365	1985	0.7	0.3
248	1992	0.35	< 0.2
193	1999	0.18	0.12-0.1 ?

Tableau 2 : La porteuse [3]

5.2 Le modulateur (le masque)

Jusqu'à maintenant, le masque était un objet optique binaire jouant uniquement sur la transmission ou l'absorption de la lumière. Les masques conventionnels bénéficient d'améliorations continues dont l'introduction de la gravure plasma permettant une meilleure définition des motifs (comparé à la gravure liquide).

Deux innovations majeures sont en évaluation industrielle :

- la correction des effets de proximité,
- le masque à décalage de phase.

5.2.1 La correction des effets de proximités

Les effets de proximité sont mis en évidence par les variations dimensionnelles d'un motif induites par la proximité d'un autre motif. Cet effet est bien connu et maîtrisé en lithographie par faisceau d'électrons (dû aux électrons rétrodiffusés).

En lithographie optique les effets de proximité apparaissent quand on s'approche de la résolution limite d'un photorépéteur [4]. Par exemple pour une dimension nominale de $0.35\mu\text{m}$, un trait isolé cotera $0.4\mu\text{m}$, un trait d'un réseau de dimensions lignes/espaces égales cotera $0.3\mu\text{m}$. Cette différence de $0.1\mu\text{m}$ est due à la différence des images aériennes entre le trait et le réseau (la distance entre les motifs devient du même ordre de grandeur que la tache de diffraction). Cet effet est amplifié par le comportement non linéaire du détecteur (la résine photosensible).

Pour s'affranchir de ce phénomène, l'idée simple est de modifier la forme des motifs sur le masque pour obtenir les images aériennes désirées. Comme tout problème inverse la solution générale est complexe et la première approche est de recenser des classes de motifs donnant lieu à des phénomènes reproductibles et d'établir par une approche empirique des tables de correction. La résolution complète de ce problème consiste à simuler l'image aérienne, puis par des corrections itératives du dessin du masque de converger vers l'image aérienne désirée. Cette approche est rendue possible grâce à la mise sur le marché de simulateurs puissants et fiables. La correction se fait soit en modifiant les cotes du motif (distorsion du motif) soit en ajoutant des motifs sous-résolus supplémentaires.

5.2.2 Le masque à décalage de phase (MDP)

Comme mentionné plus haut le masque classique agit uniquement comme un modulateur spatial de l'intensité lumineuse. En 1982 Levenson [5] eut l'idée d'utiliser une information supplémentaire : la phase, pour améliorer le contraste et la résolution de l'image transmise. Constatant que le contraste est maximum si l'intensité lumineuse passe par zéro, Levenson réalise de part et d'autre du motif à transmettre deux déphaseurs en opposition de phase, soit une amplitude positive d'un côté du motif, une amplitude négative de l'autre, forçant l'amplitude à passer par zéro. Cette altération de la phase est obtenue par une modification du parcours optique : soit en ajoutant un matériau déphaseur, soit en gravant le substrat.

A partir de cette idée de base, un grand nombre de variantes ont été proposées; on peut les regrouper en deux familles : les techniques dites "fortes", les techniques dites "faibles".

La technique alternée et la technique à transition de phase sans absorbant (Chromeless) appartiennent à la famille "forte". Elles permettent un gain en résolution

d'un facteur 2 tout en augmentant la profondeur de champ. Ces techniques sont difficiles à mettre en oeuvre et sont applicables à des classes de figures limitées : traits isolés, réseau, en particulier elles ne sont pas applicables aux trous ou tranchées isolées.

Pour résoudre ce second problème, des techniques appelées RIM ou outrigger appartenant à la famille "faible" ont été développées. Elles consistent à rajouter des motifs déphasés autour du motif principal; ces motifs sont trop petits pour être déposés dans la résine mais leur présence contribue à l'amélioration de la définition de l'image : pré-accentuation de l'image transmise par le masque avant lissage par le filtre passe-bas que constitue la lentille. Le gain apporté par les MDP "faibles" se situe essentiellement au niveau de la latitude de procédé qui est améliorée d'environ 30 %.

Une autre technique de MDP "faible" dénommée masque atténué, permet de traiter tous les motifs. Le chrome est remplacé par un matériau absorbant qui déphase de 180° la lumière transmise. Cette technique est similaire à une technique de fabrication conventionnelle (pas de déphaseurs, pas de motifs additionnels à réaliser).

5.2.3 Avantages, inconvénients des améliorations proposées

L'utilisation de tels masques permet un gain de résolution de 30 à 100 %, un gain en latitude de procédé, un gain en profondeur de champ, d'où une meilleure homogénéité des motifs, donc une amélioration des performances électriques des dispositifs [6]. Ces techniques ne nécessitent aucune modification du photorépeur, il suffit de remplacer un masque conventionnel par un masque alterné pour doubler la résolution. En contrepartie, il existe des difficultés technologiques de réalisation, communes à ces deux améliorations (MDP, correction d'effets de proximité).

Il s'agit d'abord d'un problème de traitement informatique des motifs. Il faut, pour que ces procédés soient industriels, posséder des codes de calcul qui vont générer automatiquement soit les déphaseurs, soit les motifs auxiliaires, ou distordre les motifs. Ces codes deviennent complexes quand il faut maîtriser le dessin de très gros circuits (dix millions de transistors). Ce problème est en voie de résolution [7].

Le deuxième problème est lié à la fabrication de ces masques : la gravure sèche, les dépôts ou la réalisation de motifs submicroniques ne sont pas encore parfaitement maîtrisés. Les étapes d'inspection et de réparation constituent sans doute les problèmes les plus cruciaux : les motifs absorbants ou déphasants ajoutés intentionnellement, ne doivent pas être considérés comme des défauts par les équipements d'inspection. La détection et la réparation de défauts de phase n'ont pas encore trouvé de réelle solution.

Enfin, la complexité de la réalisation a un impact sur le coût : de 3 à 5 fois le prix d'un masque conventionnel. Ce facteur devrait décroître si un marché important se dessine.

5.3 Le canal de transmission (l'optique)

5.3.1 L'ouverture numérique

Une augmentation de l'ouverture numérique permet d'améliorer la résolution. Les ouvertures numériques des photorépeurs sont passées de valeurs maximum de 0.3 à des valeurs de 0.6, de plus, ces ouvertures sont variables.

Le premier inconvénient de l'augmentation de l'ouverture numérique est la diminution de la profondeur de champ. Cette dégradation de la profondeur de champ peut être partiellement compensée en jouant sur la cohérence ou en utilisant un masque

à décalage de phase. Le second inconvénient est l'impact sur l'équipement. L'augmentation du diamètre de la pupille d'entrée entraîne une augmentation du diamètre des lentilles situées derrière la pupille donc du poids de la colonne optique. Une colonne optique moderne comprend une vingtaine de lentilles d'un diamètre supérieur à 300 mm (pour un champ de 22 x 22 mm) soit une colonne d'un poids de 3 à 400 Kg. L'augmentation de l'ouverture numérique se trouve en pratique limitée à des valeurs inférieures à 0.7.

Parallèlement à l'augmentation de l'ouverture numérique pour améliorer la résolution, les équipementiers doivent proposer des photorépéteurs fournissant des champs d'insolation de plus en plus grand (puces de 10 à 15 cm² dans 10 ans). Partant des champs et des ouvertures numériques actuels, une extrapolation à une colonne réfractive permettant un champ de 26 x 26 mm aboutit à un poids de quartz de 1 tonne.

Optique	Réfractive + projection	Catadioptrique + balayage
champ (mm)	26 x 26	26 x 32
poids lentille	1 tonne	200 kg
prix lentille	13,5 MF	1,75 MF

Tableau 3: Optique réfractive vs catadioptrique [3].

Pour remédier à ce problème de gigantisme des colonnes optiques, des équipementiers ont proposé d'utiliser une optique catadioptrique. Cette approche permet de réduire notablement le poids des optiques tout en relâchant les contraintes sur la source d'insolation.

Optique	réfractive	catadioptrique
Fréquence	1 KHz	1 KHz
Puissance	10 W	20 W
Largeur de spectre	< 1pm	250 pm
Stabilité en I	± 0.1 pm	± 10 pm
Stabilité en énergie	< 7%	< 5%

Tableau 4 : Contraintes sur la porteuse (KrF, ArF) : [3]

5.3.2 L'éclairage en incidence oblique

En éclairage conventionnel, pour former l'image d'un réseau, la pupille doit collecter au minimum l'ordre zéro et les ordres +1 et -1. L'image est reconstituée par l'interférence entre ces trois faisceaux. De fait, il y a redondance puisque les ordres +1 et -1 véhiculent la même information. Si l'on profite de la totalité du diamètre de la pupille d'entrée pour ne collecter que l'ordre zéro et un ordre supérieur (+1 ou -1), on obtient une résolution double.

Nous obtiendrons cette situation en éclairant le masque en incidence oblique (adaptation d'une technique parfaitement connue par les astronomes et les microscopistes). Pratiquement le faisceau incident est obturé par un diaphragme en forme d'anneau (éclairage annulaire) ou constitué de 4 trous équi-répartis (éclairage quadripolaire). L'inconvénient de l'éclairage oblique est une réduction de l'énergie lumineuse déposée dans la résine donc une baisse de la capacité de production (à sensibilité égale).

On peut combiner un éclairage oblique avec un masque à décalage de phase; une simulation de l'image aérienne renseigne sur le gain en terme de résolution, profondeur de champ et latitude de procédé.

5.3.3 La cohérence

La lithographie optique est toujours en situation d'éclairage partiellement cohérent. Le degré de cohérence dépend du diamètre de la source, nous pourrions donc contrôler ce degré de cohérence en faisant varier par un diaphragme, le diamètre de la source vue par le masque.

Lors de la conception du système optique, les valeurs du degré de cohérence (σ) et de l'ouverture numérique (NA) sont optimisées pour obtenir la capacité d'imagerie optimale. Jusqu'à maintenant, nous avons cherché à améliorer la résolution tout en gardant la profondeur de champ, nous pouvons aussi chercher à avoir une fenêtre de procédé la plus large possible [8]. L'optimisation de ce problème est grandement simplifiée grâce à la disposition d'outils de simulation performants ; cette simulation permet d'optimiser les valeurs de NA et σ et de prendre en compte le comportement du détecteur.

Enfin on peut mentionner que comme au niveau du masque, nous pouvons utiliser les techniques du filtrage spatial pour modifier les amplitudes, les phases, ou les polarisations des diverses ondes transmises au niveau du plan focal. Ces améliorations dont les performances ont été testées sur des prototypes n'ont pas encore donné lieu à des applications commerciales. Néanmoins, c'est un champ d'investigation extrêmement riche qui permettra d'améliorer encore les capacités d'imagerie d'un système optique.

5.4 Le détecteur (la résine)

5.4.1 Principe de fonctionnement

Le détecteur doit répondre à deux impératifs difficiles à concilier : il doit d'abord convertir l'image aérienne en une image 3D permanente (après développement) par des modifications chimiques de la résine photosensible. La seconde fonction de ce matériau est de servir de masque lors du transfert de l'image 3D (réalisée dans la résine) dans le matériau sous-jacent (silicium, silice, métal). Ce transfert se fait par gravure plasma ; cette gravure plasma ne doit pas éroder le masque sous peine de perte du contrôle dimensionnel ; supposant cette condition résolue, pour obtenir un motif idéal, il faut :

- que l'énergie lumineuse soit déposée d'une manière homogène dans l'ensemble de l'épaisseur, cette condition dépend de la qualité de l'image aérienne (contraste, profondeur de champ) mais aussi du facteur d'atténuation de la matrice polymère à la longueur d'onde considérée.

- que le composé photosensible (CPS) doit d'abord être activé par les photons incidents puis diffuser de manière homogène dans l'ensemble du volume insolé, mais uniquement que dans ce volume.

Entre l'image aérienne qui définit la distribution spatiale d'énergie électromagnétique et l'image après développement, les lithographes ont défini une troisième image qui résulte de l'interaction entre l'image aérienne et la résine photosensible : "l'image latente". La matérialisation de l'image latente dépend de mécanismes physico-chimiques : réactions chimiques mais aussi diffusions, relaxation de la matrice polymère...

5.4.2 L'imagerie conventionnelle

La lithographie optique a hérité à ses débuts du savoir-faire de l'imprimerie offset, donc aussi des produits utilisés : une matrice, la novolaque, un composé photosensible (CPS), la diazonaphtoquinone. Le CPS permet de modifier localement lors de l'insolation, la solubilité du mélange novolaque + CPS et de révéler les motifs 3D après dissolution des zones insolées. Cette idée de base est toujours mise en application. La novolaque et la diazonaphtoquinone sont toujours utilisés en insolation 365 nm. En insolation 248 nm, la novolaque présente une absorption trop importante et a été remplacée par des PolyHydroxyStirènes (appelés PHS) possédant un groupement protecteur. Le CPS est un générateur d'acide (Photo Acide Compound ou PAC) qui, insolé, libère un ion hydrogène qui va, à son tour, "déprotéger" la matrice i.e. la rendre soluble.

La résine est une couche mince déposée sur d'autres couches minces d'indices différents. Il apparaît lors de l'insolation des réflexions aux interfaces avec interférences et réflexions parasites. Ces interférences font varier localement la densité d'énergie lumineuse dans la résine, d'où une variation des dimensions 3D. Pour s'affranchir de ces réflexions, des couches anti-réfléchissantes sont déposées soit dessus, soit au-dessous de la résine.

Enfin l'utilisation industrielle de la planarisation mécano-chimique a permis de s'affranchir des topographies engendrées par la superposition de couches minces ayant chacune une topographie propre. L'image aérienne est maintenant projetée dans une couche mince d'épaisseur constante ce qui permet un meilleur contrôle de l'image développée et surtout permet d'utiliser une plus faible profondeur de champ.

5.4.3 L'impact du procédé sur les performances du détecteur

La résine va subir au cours de sa mise en oeuvre de profondes transformations : d'abord liquide, elle est étalée par centrifugation, recuite, insolée, puis recuite et enfin développée.

Les améliorations apportées au détecteur sont liées à la disponibilité de matériaux photosensibles plus performants, et à une meilleure compréhension ainsi qu'une meilleure maîtrise du procédé de couchage et développement. Les mécanismes mis en jeu sont gouvernés par la viscoélasticité du matériau, et ce n'est que récemment que ces phénomènes ont été bien compris et corrélés par des plans d'expérience [9]. Lors de l'étalement du film, il y a génération de volume libre à l'intérieur de ce film. L'élimination de ce volume libre va se faire à travers des mécanismes de relaxation de la matrice, mécanismes qui sont accélérés par les recuits [10]. La présence de volume libre au sein du film entraîne une diffusion non contrôlée du CPS (en particulier dans

les zones non insolées). On observe alors une variation de la dimension du motif avec le temps séparant l'exposition de la révélation du motif. Pour maîtriser ce temps d'attente, il faut maîtriser les températures de recuit. Deux températures critiques jouent un rôle important :

- la température de transition vitreuse (T_g) de la matière polymère qui jouent sur la viscoélasticité du matériau, donc la diffusion du CPS au sein de la matrice (bonne mobilité des chaînes).
- une température (T_d) dite de dégradation (365 nm) ou de déprotection (248 nm) qui entraîne une dégradation des zones non insolées.

La conclusion immédiate est qu'il existe une fenêtre de procédé si $T_g < T_d$, et que, la latitude de procédé est d'autant plus grande que l'écart ($T_d - T_g$) est important [10].

5.4.4 L'imagerie de surface

L'imagerie de surface a été proposée dès les années 80 pour dissocier la fonction détecteur de la fonction masque pour la gravure. Cette technique permet de minimiser l'importance de la profondeur de champ. Comme son nom l'indique, l'image est déposée uniquement en surface (profondeur d'environ 0.1 μm).

La fonction masque est assurée de deux manières :

- soit par dépôt d'une sous couche supplémentaire (par exemple de la silice) qui sera gravée précédemment au matériau dans lequel on transfère l'image,
- soit par modification de la surface du matériau qui va rendre cette surface inerte lors de l'étape de gravure. Une technique dite silylation, consiste à introduire du silicium dans la matrice et de faire réagir ce silicium avec de l'oxygène pour transformer les zones insolées en "silice". Cette technologie a été très étudiée puis abandonnée car le contrôle dimensionnel était trop incertain (de plus, il rajoutait deux étapes) ; néanmoins, l'imagerie de surface risque d'être un passage obligé pour la lithographie 193 nm. Depuis quelques années plusieurs groupes de recherches étudient la faisabilité (en liaison avec les équipementiers) d'un procédé de dépôt par plasma d'une couche mince photosensible à 193 nm (PolyMéthylStyrène) [11].

6. CONCLUSIONS

Le renouvellement des filières de circuits intégrés, au rythme d'une génération tous les trois ans a été possible grâce aux progrès continus de la lithographie optique. Réciproquement, ces progrès n'ont été possibles que grâce aux efforts conséquents de R&D consentis par les équipementiers, efforts encouragés par un marché porteur.

La lithographie optique est aujourd'hui la technologie la plus crédible pour réaliser de l'imagerie proche de 0.1 μm en production de masse. Mais à quel coût, c'est à dire avec quelle rentabilité ? Les technologies concurrentes pas forcément nouvelles, comme les rayons X, les faisceaux d'électrons viennent faire entendre leurs voix dans ce concert, d'autant plus fortement que la latitude de procédé fournie par la lithographie optique se réduit. Néanmoins deux éléments majeurs militent en faveur de la lithographie optique : son formidable acquis (les photorépétiteurs, les résines photosensibles, la réalisation des masques, leur inspection ...) ; ainsi que les délais. Pour qu'un fondeur démarre une production de masse à 0.1 μm en 2007, il faut, compte tenu du compte à rebours (réalisation des prototypes, évaluation, introduction en ligne pilote et stabilisation des procédés), que les choix technologiques soient fait en l'an 2000 et

les photorépéteurs disponibles en 2003 - 2004, ce qui laisse peu de marge de manoeuvre.

Finalement le choix dépendra essentiellement des prises de risques consenties par les équipementiers et les fabricants de circuits intégrés.

Remerciements

Les auteurs remercient P. Paniez pour ses conseils dans la rédaction du chapitre consacré aux résines photosensibles.

Références

Les auteurs se sont appuyés sur une cinquantaine de publications pour écrire cet article. Il est donc difficile de citer toutes ces références. Nous nous sommes borné à citer les articles pour lesquels il y a eu «emprunt» et les travaux les plus récents. Les informations utilisées sont pour l'essentiel issues des actes des deux grands congrès consacrés à la lithographie :

- SPIE (The International Society for Optical Engineering), conférences on Microlithographie.

- Microelectronic Engineering (Elsevier) dont les congrès portent maintenant la dénomination de «Micro and Nano Engineering»

On se reportera aussi utilement aux articles paraissant régulièrement dans les revues professionnelles suivantes :

- «Microlithography World» (PennWell Publication), exclusivement consacré à la lithographie.

- Solid State Technology (PennWell Publication), Semiconductor International (Cahners Publishing Company) revues de synthèse consacrées aux technologies de fabrication des circuits intégrés.

- [1] Semiconductor Industry Association, Technology roadmap for semiconductor (1994)
- [2] Electronique International, 9 mai 1996, p. 2
- [3] J.J. Shamaly and V. F. Bunze, Microelectronic Engineering **30** (1996) p.87
- [4] D. Meyerhoffer SPIE **922** (1988) p.174
- [5] M.D. Levenson, NS Visuanathan, RA Simpson, IEEE trans on Electron Devices **ED 29** (1992),p.12
- [6] P. Schiavone, F. Lalanne, SPIE **2726**.(1996) p.453
- [7] G. Galan, F. Lalanne, P. Schiavone, J.M. Temerson. Jpn. J. Appl. Phys. **33** (1994),p. 6779
- [8] S. André, A. Weill, Microelectronic Engineering **30** (1996) p.99
- [9] F. Vinet, et al. SPIE **2438** (1995) p.202
- [10] P. Paniez et al. SPIE **2195** (1994) p.14
- [11] O. Joubert et al. J. Vac. Sci. Technol. **B12** (6), (1994),p. 3912