Equipements optiques pour la fabrication microélectronique

M. Lacombat

~~MICRO-CONTRÔLE, 7 rue Jean Mermoz, F-91005 Evry, France~~

nouvelle adresse : MICRO-CONTRÔLE, 11 rue du Bois Sauvage, F-91055 Evry cedex, France

INTRODUCTION

L'évolution des microcircuits, depuis près de trente ans, place aujourd'hui l'industrie du semiconducteur dans une position stratégique dans le monde industriel. Ils conditionnent en grande partie le développement de secteurs aussi variés que les télécommunications, l'informatique, les systèmes d'armes, les produits de grande consommation, la médecine, les loisirs...

Ce qui caractérise essentiellement l'industrie microélectronique, et plus particulièrement celle des circuits intégrés, c'est la progression technologique continue que l'on peut observer depuis 20 ans qui permet de doubler la densité des circuits et quadrupler leur complexité régulièrement, en moyenne tous les trente mois. Des premiers circuits monolithiques réalisés en 1965, intégrant 250 transistors sur une même puce, on est ainsi passé aujourd'hui aux circuits VLSI de 10 millions de transistors. Cette progression est maîtrisée au point de pouvoir prédire sans risque leur mise sur le marché près de dix ans à l'avance. Ainsi pour les mémoires DRAM qui constituent le marché le plus important des circuits intégrés, les générations successives et leur technologies associées sont programmées avec précision (figure 1). Les mémoires 16 Mbit sont prévues sur le marché en 1993 avec une lithographie à 0,6 micron et les mémoires 64 Mbit pour 1995 à 0,4 micron.

A cette progression dans les performances correspond une forte croissance des ventes, soit près de 20 % par an portant le chiffre d'affaire mondial du semiconducteur à 300 milliards de francs en 1990.

Et l'optique ? quel rôle joue-t-elle dans cette industrie en perpétuelle évolution technologique, sera-t-elle toujours d'actualité pour les futures générations de circuits ?

C'est le but de cet exposé d'essayer de répondre à ces questions, principalement en ce qui concerne les machines de lithographie qui constituent les véritables "machines outils" de fabrication des circuits intégrés.

A titre d'exemple, une usine moderne de production de moyenne importance produit 5000 tranches de 150 mm de diamètre chaque semaine. Chaque plaquette nécessite environ 15 étapes de lithographie. La plupart des niveaux sont "imprimés" en utilisant des photorépétiteurs qui projettent des images de 2 cm² (typiquement 2 circuits). En tout 6,5 millions d'images sont produites chaque semaine, soit pratiquement 1 million d'images par jour avec des motifs submicroniques positionnés respectivement les uns par rapport aux autres à $\pm 0,3$ micron. Les machines doivent opérer 24 heures par jour, 7 jours sur 7 et les utilisateurs en exigent une fiabilité parfaite (MTBF de 1000 heures).

Ces contraintes technologiques et industrielles ont limité au fil des années le nombre d'industriels capables de répondre à cette demande. Deux japonais, CANON et NIKON, deux américains, GCA et ULTRATECH, et un européen, ASM-L, se partagent le marché.

Mais ce marché est important. Chaque nouvelle génération de circuits nécessite l'ouverture de nouvelles lignes de production et les investissements sont lourds, environ 17 % du chiffre d'affaire annuel. Le marché correspondant pour l'instrumentation optique représente 20 % de ces investissements, soit 10 milliards de francs en 90. Une grande part est affectée aux photorépétiteurs dont 900 exemplaires sont installés en moyenne par an.

RAPPELS SUR LA MICROLITHOGRAPHIE

En microélectronique, et notamment pour les circuits logiques, les fonctions interrupteur et amplificateur sont réalisées par des transistors. Du fait de sa faible consommation le transistor de type MOS (Figure 1) est devenu la cellule élémentaire à partir de laquelle seront construits la plupart des circuits intégrés.

Dans ce transistor (Metal Oxyde Semiconducteur), la couche d'oxyde sert d'isolant entre le substrat silicium et le ruban de silicium polycristallin (grille). De part et d'autre de la grille on crée dans le silicium deux zones dopées N, riches en électrons, l'accès à ces zones source et drain se faisant par des contacts métal sur silicium.

Figure 2 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN TRANSISTOR MOS

Fig. 3 PRINCIPE DE LA LITHOGRAPHIE

Pour réaliser cette architecture de circuits "plans" (technologie planar) il est nécessaire de délimiter dans des étapes successives, les différentes zones sur lesquelles on va opérer un certain process : diffusion ou implantation, dépôt métallique, contacts, interconnexions etc...

La technique qui permet de créer ces zones est la lithographie (1, 2). Son principe est simple (Figure 3). La zone correspondant à un certain process est d'abord définie dans une couche de résine (film polymère), couchée sur le substrat, par une radiation appropriée et délimitée dans l'espace XY. Cette radiation modifie la structure initiale de la résine. Dans le cas des résines positives par exemple, les liaisons entre molécules sont brisées et la zone exposée est dissoute au développement.

Du fait principalement de sa mauvaise tenue en température la résine ne peut être utilisée directement comme masque pour les opérations de diffusion, implantation. Une étape supplémentaire est nécessaire pour transférer la région délimitée de la résine (pattern) dans l'oxyde (ou le métal). L'opération de gravure correspondante est réalisée soit par voie humide, soit par plasma, pour obtenir une meilleure qualité du transfert (1, 2).

Plusieurs types de radiation peuvent être utilisés en lithographie. Les faisceaux d'électrons permettent une très bonne résolution et une grande flexibilité d'écriture. Par contre les images sont décrites point par point ou par faisceau formé de petites dimensions ce qui rend le procédé très lent. La lithographie à faisceaux d'électrons est donc surtout employée pour des circuits très avancés ou, de plus en plus, dans les circuits customs pour les derniers niveaux dits niveaux de personnalisation.

Fig. 4 PHOTOGRAPHIES MEB DE CIRCUITS
AVEC MOTIFS RESINE DE 1 MICRON (Photos LETI)

En lithographie optique l'exposition des résines par radiation UV, permet un transfert parallèle d'images de grandes dimensions donc beaucoup plus rapide. Cette exposition se fait à travers un masque structuré. La quasi totalité des circuits intégrés sont aujourd'hui réalisés par cette technique

La lithographie est un des process clé dans la technologie de fabrication des circuits intégrés. Elle conditionne d'abord la qualité - résolution, reproductibilité - des patterns du circuit et donc au premier ordre le rendement de fabrication. Ensuite c'est un process qui doit être répété pour réaliser successivement chacun des niveaux de construction du circuit. Pour les circuits complexes actuels le nombre d'étapes lithographiques se situe entre 12 et 18 suivant la technologie employée, MOS, bipolaire ou BIMOS.

FABRICATION D'UN CIRCUIT INTEGRE

A partir de sa conception, la réalisation d'un circuit intégré comprend trois phases distinctes (Figure 5) chacune d'elle étant exécutée sur des lignes spécialisées.

La première phase est réalisée par la "mask shop". Elle permet de traduire le concept du circuit en un nombre N de "patterns" correspondant à chacun des niveaux de process successifs. Chaque pattern est tracé sur un masque à l'échelle G ($1 \leq G \leq 5$) du circuit par une machine d'écriture soit à faisceau d'électrons soit plus récemment, (et à coût réduit) à balayage laser (3).

Les masques actuels, réalisés sur plaque de verre revêtue d'une couche de chrome antiréfléchissant, sont des supports d'images de près de 10^9 pixels où aucun défaut supérieur à 10 pixels ne peut être toléré. D'où les opérations d'inspection optique et de réparation (laser ou faisceau d'ions) associées.

La fabrication du circuit intégré à proprement parlé est exécutée ensuite sur la "chaîne de lithographie". Le niveau est transféré par projection de l'image du masque sur la plaquette de silicium. Après développement les dimensions des motifs critiques (CD) et la qualité de superposition (overlay) des niveaux entre eux sont contrôlées sur une machine de métrologie. Enfin, après gravure et process du niveau, les plaquettes sont inspectées pour s'assurer du degré de contamination induit par les opérations successives : pour des motifs de 1 micron aucune particule supérieure à $0,3\mu\text{m}$ ne peut être tolérée à une fréquence supérieure à 1 fois tous les 5 cm^2 . Cette inspection optique est utilisée pour déceler les opérations critiques, améliorer les procédés et, in fine, le rendement de fabrication.

Le niveau n étant ainsi réalisé sur le lot de plaquettes on passe au niveau $n + 1$ et ainsi jusqu'au niveau final N . Compte tenu de toutes ces opérations la réalisation d'un lot va prendre de 2 à 4 mois. Plusieurs lots de circuits différents vont donc cohabiter dans la chaîne de fabrication rendant indispensable une gestion de production par ordinateur (CAM). A noter également que, pour assurer une bonne production, plusieurs machines de lithographie vont coexister dans une même ligne et que les lots sont susceptibles de passer sur des machines différentes. La notion de comptabilité entre machines est donc fondamentale, notamment en ce qui concerne la distorsion et le grandissement des optiques directement responsables de la qualité de superposition des niveaux.

Figure 5 : PRINCIPALES ETAPES DE FABRICATION DES CIRCUITS INTEGRES

Enfin la dernière étape de fabrication du circuit est "l'assemblage". Elle comprend la découpe des puces dans le substrat, leur tri, leur montage et, surtout, tout un ensemble de tests électriques.

LES MACHINES DE LITHOGRAPHIE

De nombreux équipements optiques sont utilisés dans la fabrication des circuits intégrés. Aux machines de métrologie et d'inspection déjà évoquées on doit ajouter la mesure de planéité des substrats, la mesure d'épaisseur des couches par ellipsométrie et les contrôles de fin de gravure ou dépôt par interférométrie laser. Pour être complet sur les équipements optiques, il faut évoquer aussi les machines d'écriture directe qui tracent directement les patterns sur le substrat silicium à partir de la CAO. Ces machines dérivées des "pattern generator" laser sont principalement utilisées pour les niveaux de personnalisation (niveaux interconnexions) des circuits customs, tels que les ASIC par exemple (3).

Nous ne parlerons ici que des seules machines de lithographie et des technique employées en fonction du temps, ou, plutôt des contraintes technologiques de fabrication.

TABLEAU 1 EVOLUTIONS DES OUTILS DE LITHOGRAPHIE

CIRCUITS			4 Kbit	64 Kbit	1Mbit	16 Mbit	64 Mbit	1 Gbit	
STRUCTURES	μm	10	5	3	1	0,6	0,35	0,2	
SURFACES	mm²	10		25	50	< 200	400	1200	
TRANCHES									
DIAMETRES		50 mm	100 mm	125 mm	150 mm	200 mm	300 mm		
			1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
• ALIGNEURS CONTACT PROXIMITE									
OUTILS			• PROJECTION CATADIOPTRIQUE 1/1 →						
			• WAFER STEPPERS 1/5 → g line i line D U V						
			• STEP AND SCAN →						
			• LITHO RAYONS X						

Dans l'évolution de la fabrication des circuits intégrés trois facteurs principaux conditionnent la conception des outils de lithographie et plus précisément des optiques de transfert : la dimension des motifs, la taille des circuits et celle des plaquettes de silicium. Le tableau 1 permet de situer les valeurs respectives de ces facteurs dans le temps.

Pendant près de 10 ans les circuits ont été réalisés par des machines simples de contact où le transfert d'image se fait par ombre portée, le masque étant placé en contact avec la plaquette. Le taux de défauts induit par ce contact étant devenu vite rédhibitoire le masque et la plaquette ont été écartés de 10 à 15 microns (proximité). La résolution et le contrôle dimensionnel des motifs se sont trouvés dégradés et les techniques de projection ont du être développées à partir des années

Les premières machines de projection à voir le jour étaient des machines de projection dioptrique de grandissement 1 projetant le masque complet sur le wafer. Elles n'ont pas survécu à l'apparition des wafers de 75 mm de diamètre, la résolution requise ne pouvant être atteinte pour un tel champ.

La figure 6 représente les principales techniques qui ont été mises en oeuvre.

Fig. 6 SCHEMA DE PRINCIPE
DES DIFFERENTES MACHINES OPTIQUES DE LITHOGRAPHIE

- a) Projection avec balayage 1/1
- b) Projection avec balayage et décalage G/1
- c) Photorépétition 1/1
- d) Photorépétition G/1

La première technique vraiment utilisée en production de masse, et pendant plus de 10 ans, est celle de la projection 1/1 à balayage (Figure 6a). Conçue par ABE OFFNER, elle utilise une optique catioptrique à deux miroirs sphériques non concentriques qui permet un éclairage UV à spectre large (Figure 7). L'énergie disponible pour l'exposition est importante ce qui assure à la machine une bonne cadence de production. Le système est dit à champ annulaire. La zone utile de champ est limitée à un segment d'anneau concentrique avec l'axe optique du système. La vertu d'un tel dispositif est que tous les points de cette zone sont vus sous le même angle réduisant ainsi les aberrations (4, 5).

Fig. 7 SYSTEME MICRALIGN DE PROJECTION 1/1 (Perkin Elmer)

L'illumination étant limitée à cette portion d'anneau, l'image complète sera obtenue par balayage de l'optique par rapport au masque. Dans la pratique le masque et la wafer sont montés solidaires sur un chariot qui va les déplacer en parfait synchronisme par rapport à l'objectif.

Plusieurs générations de ces machines ont vu le jour pour suivre l'évolution des diamètres de plaquettes. A partir de 125 mm l'optique est devenue de plus en plus difficile à réaliser pour couvrir le champ nécessaire et limiter les distorsions et défauts de grandissement d'une machine à l'autre qui interviennent directement sur la qualité de superposition des niveaux. Enfin, l'ouverture numérique, limitée à 0,2, ne permet plus de faire face à la lithographie submicronique.

Partant du même principe de base, mais en limitant le champ, Perkin Elmer a conçu un nouveau dispositif (MICRASCAN) de projection à miroir mais avec un grandissement 1/4. Le champ balayé est limité (20mm x 32,5mm) mais l'ouverture numérique est portée à 0,35 (Figure 6b).

L'intérêt du rapport 1/4 est de pouvoir utiliser des masques échelle 4 plus faciles à réaliser, à inspecter et à corriger. En contre partie l'exposition du wafer complet nécessite une exposition champ par champ avec un balayage X du wafer à la vitesse V en parfait synchronisme avec un balayage du masque à la vitesse 4V (6). Ce système est en cours d'industrialisation par SVG - L (USA).

PHOTOREPETEUR SUR TRANCHES

La seconde technique, utilisée en production à partir des années 80, est la photorépétition. Conçue à l'origine pour la fabrication des masques échelle 1, elle a été adaptée à l'exposition sur wafer. L'image du masque est projetée à travers un objectif à champ réduit et répétée sur toute la surface du wafer. D'où son nom "wafer-stepper". Certaines réalisations (ULTRATECH) utilisent une optique à miroirs de grandissement 1 permettant une illumination UV à spectre large (figure 6 c), mais la plupart des steppers actuellement en production sont équipés d'objectifs dioptriques réduisant l'image du masque (ou réticule) d'un facteur 5 (figure 6d). En limitant le champ à la

dimension de un ou 2 - 3 circuits on peut concevoir des objectifs de forte ouverture numérique, réduire la distorsion et surtout, pour chaque image projetée optimiser la mise au point.

Fig. 8 SCHEMA DE PRINCIPE DE PHOTOREPETEUR SUR TRANCHE

Sur le schéma de principe du stepper, figure 8, figurent les principaux sous ensembles associés à l'optique de projection (1). Le wafer est placé sur une table XY contrôlée par interférométrie laser (4) ce qui permet de positionner les images avec une précision de l'ordre du dixième de micron sur l'ensemble du wafer. La position Z du substrat par rapport à l'objectif est contrôlée et asservie à la même précision par un dispositif de focalisation automatique (2).

Pour optimiser la superposition des niveaux entre eux, notamment si le premier niveau a été formé sur une machine de projection 1/1, il est possible de réaliser un alignement, à travers l'objectif, entre des repères sur le wafer et des repères sur le masque (6). C'est l'alignement puce à puce. On résoud ainsi en majeure partie les problèmes de comptabilité machines évoqués plus haut et la qualité de superposition des niveaux ne dépend plus de la dimension des plaquettes.

Système optique : Compromis techniques et état de l'art

Il y a trois principaux compromis techniques à considérer dans le projet d'un système optique de projection de wafer stepper :

- la résolution et la profondeur de champ (DOF)
- la maîtrise dimensionnelle des motifs critiques et l'éclairement
- le champ, la résolution et la distorsion.

Résolution et profondeur de champ

La résolution utile R_u d'un objectif de photorépétition s'exprime en fonction de l'ouverture numérique et de la longueur d'onde suivant la relation classique :

$$R_u = k \frac{\lambda}{NA}$$

où un terme empirique K est introduit pour tenir compte des conditions de process, notamment de la nature ou structure du film photosensible (7).

Si en recherche on peut quelquefois travailler avec un coefficient K de 0,5, on considère que 0,8 est la valeur minimale utilisable en développement, c'est à dire permettant une tolérance suffisante dans les procédés associés à la formation d'images : épaisseur des couches, focalisation, énergie d'exposition, développement... Mais en production de masse, notamment au Japon pour les mémoires DRAM les objectifs sont utilisés avec une valeur K de l'ordre de 0,95.

Dans une première étape d'une dizaine d'années, les objectifs ont été améliorés en faisant passer progressivement l'ouverture numérique de 0,2 à 0,55, et en gardant la même longueur d'onde d'exposition, soit la raie g du mercure (436 nm).

En augmentant l'ouverture numérique pour améliorer la résolution on réduit sensiblement la profondeur de champ du dispositif, suivant la loi de Rayleigh :

$$D = \frac{\pm \lambda}{2 (NA)^2} \quad (D = \text{DOF})$$

Ainsi pour une résolution utile de $0,65 \mu\text{m}$ en raie g, avec $K = 0,8$ (figure 9) la profondeur de champ totale sera limitée à $1,5 \mu\text{m}$.

Fig. 9 RELATIONS ENTRE LA RESOLUTION, L'OUVERTURE NUMERIQUE ET LA PROFONDEUR DE CHAMP POUR $K = 0.8$

En pratique la profondeur de champ utile est réduite $D_u = 0,7 D$ pour tenir compte de l'astigmatisme et de la courbure de champ. Ce qui donne dans les conditions précédentes une valeur utile de $1,05 \mu\text{m}$. C'est une valeur limite pour l'utilisation sur les plaquettes standards dont les écarts de planéité varient de $0,3$ à $0,9 \mu\text{m}$ dans un champ de $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ si on tient compte, en plus, de la topographie résultant de la superposition des niveaux.

Pour les mémoires 16 et 64 Mbits il est devenu nécessaire de changer de longueur d'onde pour gagner en résolution sans perdre en profondeur de champ (Figure 9).

La plupart des steppers vendus actuellement pour la production sont équipés d'objectifs corrigés pour la raie i (365 nm) et les premières machines à source laser excimère (248 nm) sont expérimentées dans les lignes pilotes (8,9, 10, 11).

Il est bien évident qu'un dispositif de focalisation est associé à l'objectif du stepper pour garantir une mise au point automatique champ par champ. Pour les nouveaux objectifs DUV, ouverts à $0,5$ ($R_u = 0,4 \mu\text{m}$ $D_u = 0,7 \mu\text{m}$) il est même nécessaire de mettre en oeuvre un contrôle d'assiette (leveling) automatique champ par champ (9).

Champ et Distorsion

Pour optimiser la cadence de la production on cherche à réaliser des objectifs à grand champ limitant le nombre d'exposition pour une dimension de plaquettes donnée. On cherche également à projeter plusieurs circuits identiques simultanément pour pouvoir inspecter plus aisément les patterns les uns par rapport aux autres et détecter les éventuels défauts par comparaison. Le tableau 2 présente les principaux objectifs disponibles actuellement sur le marché. On notera que les 4 principaux fabricants proposent des objectifs aux caractéristiques très proches, notamment en ce qui concerne le champ (12).

TABLEAU 2 OBJECTIFS RECENTS DE STEPPERS

CONSTRUCTEUR	OUVERTURE NUMERIQUE	LONGUEUR D'ONDE (nm)	CHAMP mm x mm	DISTORSION nm
ZEISS	0,48	365	21 X 21	70
ZEISS	0,50	248	21X 21	60
CANON	0,52	365	20 X 20	80
NIKON	0,50	365	20 X 20	70
TROPEL	0,50	365	20 X 20	50
TROPEL	0,50	248	20 X 20	50

A la difficulté d'obtenir une résolution sagittale et tangentielle homogène dans tout le champ s'ajoute celle de réaliser une image de très faible distorsion. Comme la lithographie des différents niveaux d'un circuit doit pouvoir être réalisée sur une machine ou l'autre de la chaîne de production, la compatibilité des grandissements des objectifs est une nécessité absolue. Pour tenir compte des variations de pression et de température les objectifs sont asservis en grandissement, l'ajustement étant réalisé par modification de la distance objet-image. D'où la nécessité de concevoir des objectifs télécentriques coté objet et coté image.

En ce qui concerne la distorsion, la dispersion de fabrication sur les objectifs modernes (champ 20 mm x 20 mm) est inférieure à 100nm. En appairant les objectifs on arrive à constituer une chaîne de production avec une dispersion inférieure à 60 nm (8, 10).

Maitrise dimensionnelle des motifs critiques et éclairement.

Les caractéristiques des circuits sont directement tributaires de la précision et de la répétabilité de la lithographie. Pour garantir un bon rendement de fabrication les tolérances sur les motifs critiques des circuits et leur superposition sont très serrées. Le tableau 3 les résume pour les circuits actuels et futurs.

TABLEAU 3
SPECIFICATIONS POUR LA MICROLITHOGRAPHIE DES MEMOIRES DRAM

	4 Mbit	16 Mbit	64 Mbit
Dimension motif (CD)	$\mu\text{m } 0,75$	0,6	0,35
Tolérance sur CD	$\mu\text{m } \pm 0,07$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$
Précision de superposition	$\mu\text{m } \pm 0,25$	$\pm 0,20$	$\pm 0,12$

La dimension des motifs correspond à celle de la base du trait développé dans la couche de résine (épaisseur type 1,2 μm). La dispersion sur tout le wafer pour un trait de 0,6 μm , devra être au plus égal à 50 nanomètres et la pente du profil supérieur à 82 °. Ces conditions strictes impliquent :

- une parfaite homogénéité de la MTF dans le champ
- l'utilisation de l'objectif dans un domaine de fréquences spatiales bien inférieur à la demi fréquence de coupure.
 - la mise en oeuvre d'un éclairement de cohérence spatiale plus forte que celle de l'éclairage Kohler classique ($\sigma = 0,65$). Pour les dispositifs modernes la cohérence spatiale sera ajustable de $\sigma = 0,65$ à $\sigma = 0,6$. Pour l'utilisateur ceci revient à améliorer la résolution utile R_u en réduisant la valeur du paramètre K (13).
- une variation d'éclairage dans le champ qui doit être limité tout au plus à $\pm 2\%$.

Des différentes solutions possibles pour uniformiser l'éclairage dans le champ image, celle qui est retenue par la plupart des équipementiers est le système "oeil de mouche" (14).

Le principe schématisé figure 10 consiste à découper le plan éclairé en éléments adjacents, les éléments sont superposés dans le plan à éclairer A'. La pupille P' est alors composée d'une image multiple de la source émettrice. C₁ et C₂ sont des collimatrices qui rejettent P et A' à l'infini au niveau des microlentilles, respectivement L1 et L2.

Figure 10 PRINCIPE DU SYSTEME "OEIL DE MOUCHE"

L'uniformité d'éclairement obtenue en A' dépend de l'alignement respectif des lentilles L1 et L2. La distance L1 L2 est ajustée pour réduire le défaut résiduel qui se traduit par plus de lumière au bord par rapport au centre.

Différentes réalisations sont possibles, soit par microlentilles ou des billes, soit par des microbarreaux confocaux. Les uniformiseurs Microcontrol utilisent des barreaux cylindriques sur lesquels sont réalisés un méplat. Les barreaux sont croisés et accolés.

Dans le cas particulier d'une source laser excimère la nappe L2 ne peut pas supporter la densité d'énergie. Il est nécessaire d'étaler les points chauds en réalisant un système à étage. Pour obtenir l'uniformité requise un système à 3 nappes de microlentilles sera utilisé avec pour conséquence une perte d'énergie non négligeable.

TABLEAU 4 RESUME DES SPECIFICATIONS OPTIQUES D'UN STEPPER

	Circuits 16 Mbit	Circuits 64 Mbit
• Ouverture numérique	$\geq 0,4$	$\geq 0,5$
• Longueur d'onde	365 nm	248 nm
• Bande passante $\Delta \lambda$	± 3 nm	$\pm 0,002$ nm
• Champ, diamètre	≥ 20 mm	≥ 28 mm
• Limité par la diffraction		
• Homogénéité MTF sagittale et tangentielle dans le champ, écart		$\leq 5\%$
• Astigmatisme + courbure de champ		$\leq 0,3 \mu\text{m}$
• Télécentricité cotés objet et image		
• Distorsion dans le champ		≤ 75 nm
• Transmission		$\geq 70\%$
• Homogénéité éclairnement		$\pm 2\%$
• Cohérence spatiale ajustable		0,3 à 0,6
• Grandissement ajustable		
dynamique		$\geq \pm 30$ ppm
sensibilité		1 ppm

L'ensemble des points qui ont été abordés peut se résumer par le tableau 4 qui fixe les spécifications requises pour les optiques actuelles et futures des photorépéteurs.

Ce qui n'a pas été mentionné, c'est la différence importante qui existe entre les générations actuelles de steppers utilisant les longueurs d'onde du mercure, raies g et i, dans le violet, et le stepper excimère utilisant une source émettant dans l'ultraviolet à 248 nm, en régime pulsé et avec un certain degré de cohérence.

Il serait trop long de développer ici les solutions techniques qui ont été mises en oeuvre. On peut se référer au livre de Kanti Jain (15) pour plus de détails.

Pour résumer :

- l'objectif ne peut être réalisé qu'en silice fondue, seul matériau disponible avec la qualité requise (homogénéité d'indice meilleure que 10^{-6}) qui soit transparent à cette longueur d'onde. Dans ces conditions la bande passante $\Delta\lambda$ sera extrêmement faible 0,02 Å.

- l'émission laser, de largeur naturelle environ 0,3 nm doit être "rétrécie" et "accordée" en permanence sur la valeur de correction de l'objectif. A la source laser doivent également être associés un "décohéreur" et le dispositif oeil de mouche pour éliminer les phénomènes de speckles et passer d'une répartition dissymétrique d'énergie dans le faisceau à un éclairage homogène dans le plan image.

Technique d'alignement

Pour décrire complètement un stepper il faut parler également du positionnement des images par rapport aux niveaux déjà processés ; et les règles de fabrication sont strictes, les écarts entre images de niveaux successifs ne doivent pas être supérieurs au tiers de la dimension des motifs, soit par exemple $\pm 0,2 \mu\text{m}$ pour les mémoires 16 Mbit (tableau 3).

Plusieurs facteurs peuvent entraîner des écarts locaux ou globaux (tableau 5) Tout d'abord l'ensemble des systèmes optiques de la chaîne de fabrication, y compris les masques-réticules, doivent être parfaitement "accordés" (mix and match des steppers), contrôlés (température, grandissement) pour que les images soient parfaitement superposables.

TABLEAU 5 CONTRIBUTIONS AUX ECARTS DE SUPERPOSITION (à l'échelle 1)

• Position des motifs sur le réticule	$\partial 1$	$\approx$	100 nm
• Variation dimensionnelle des motifs	$\partial 2$	$\approx$	100 nm
• Erreurs d'alignement	$\partial 3$	$\approx$	50 nm
• Dilatation thermique des masques et wafers	$\partial 4$	2,5 ppm /°C $\Delta T \times L$	
• Distorsion du système optique	$\Delta 5$	$\leq$	100 nm

Ensuite il faut réaliser l'alignement. Il se fait en général en trois étapes successives :

- le préalignement de la plaquette exécuté avant son introduction sur le stepper pour la centrer et l'orienter par rapport à ses axes.
- L'alignement fin et global de la plaquette par rapport au réticule.
- et enfin, pour les niveaux critiques, l'alignement champ par champ.

La stratégie d'alignement diffère d'un constructeur à l'autre, mais le principe général reste le même : faire coïncider des repères du wafer (W1 W2) avec des repères du réticule (M1 M2) par observation à travers l'objectif (figure 11).

Fig. 11 PRINCIPLE D'ALIGNEMENT A TRAVERS L'OBJECTIF

Fig. 12 EXEMPLE DE REPERES D'ALIGNEMENT

En faisant coïncider successivement les repères M1 M2 avec les repères W1 et W2 on peut ajuster finement

- les positions angulaires du wafer et du réticule par rapport aux axes X Y de la machine
- L'origine de la photorépétition
- l'écart exact entre patterns c'est-à-dire le pas de photorépétition pour tenir compte de la distorsion et de la température du wafer.
- le grandissement de l'objectif.

Cette stratégie, telle qu'elle est appliquée par ASM-L par exemple, permet de réduire au minimum les différentes contributions (tableau 5) aux écarts de superposition. Pour les niveaux non critiques, elle sera suivie de la photorépétition "en aveugle" le positionnement sur les patterns successifs étant confié aux interféromètres qui contrôlent le positionnement de la table.

L'alignement champ par champ, qui réduit la cadence de production, ne sera exécuté que pour les niveaux critiques. Des repères spécifiques placés dans les lignes de découpe (figure 12) sont projetés sur les repères réticule M1 M2 et leur coïncidence optimisée par ajustement fin de la position du wafer.

Chaque constructeur a sa propre technique d'alignement utilisant des repères et modes de détection spécifiques. Nous ne ferons que mentionner un seul exemple, mis en oeuvre par ASM-Lithography, basé sur la diffraction de réseaux (16, 17). En "récupérant" les seuls ordres diffractés ± 1 on s'affranchit en grande partie des problèmes de qualité d'images réalisées à une longueur d'onde, en général 633 nm, hors de la zone de correction de l'objectif. Cette technique a surtout l'avantage d'être très robuste, c'est-à-dire garantir un bon rapport signal sur bruit, sur les différents niveaux de process, les repères étant recouverts de couches successives de nature différente : faible réflectivité pour le nitrure, granularité importante pour l'aluminium, par exemple. Les précisions obtenues avec de telles méthodes sont de l'ordre de quelques nanomètres à 70 nm pour les niveaux les plus difficiles (8, 10, 11). Elles sont adaptées aux performances requises pour les circuits futurs (18)

LE FUTUR DE LA MICROLITHOGRAPHIE

Dans les années 83 - 84 on s'est sérieusement préoccupé du remplacement de la microlithographie optique pour la production à 1 micron. Des études importantes ont été entreprises pour développer des machines à faisceau d'électrons plus rapides, à faisceau formé, et également prospecter sur la lithographie à rayons X.

Parallèlement des progrès importants ont été réalisés sur les résines photosensibles soit grâce à des produits nouveaux, soit avec des techniques de renforcement de contraste ou l'emploi de multicouches. Ces progrès ont permis, avec l'amélioration des performances des objectifs, de "franchir le mur du micron". On sait maintenant que la génération 64 Mbit pourra aussi être réalisée, à 0,35 micron., avec les steppers excimère en ultraviolet. Mais après ? le quart de micron est-il réaliste en optique ?

Fig. 13 PRINCIPE DU PHOTOREPETEUR HOLOGRAPHIQUE

Parmi les recherches actuelles pour préparer ce futur très proche la plupart sont orientées sur les longueurs d'ondes très courtes dans le domaine des rayons X mous. Dans toutes ces recherches on conserve le principe de l'image à champ limité et de la répétition seul garantes d'une bonne qualité d'image et d'une parfaite superposition des niveaux.

En marge de ces travaux, il faut citer tout d'abord les développements en cours sur le "stepper holographique" entrepris par HOLTRONIC (19) suivant le principe de la figure 13. Des travaux identiques sont en cours également en Californie (20).

L'hologramme d'un masque est enregistré sur un prisme dans une résine de forte épaisseur. Dans une deuxième étape l'image est restituée sur le wafer placé à la position précise du masque. Ce dispositif simple et peu coûteux dans son principe, sans optique, a l'avantage de ne pas être limité en champ. Une résolution de $0,3 \mu\text{m}$ est obtenue sur prototype, résultat équivalent à une ouverture numérique supérieure à 0,7.

Les limitations se situent bien sur dans la profondeur de champ du dispositif, moins de 0,5 micron et également dans la réalisation de l'hologramme, étape supplémentaire réalisée à partir du masque échelle 1, étape qui doit être réalisée sans défaut.

Fig. 14 ALTERNATIVES EN LITHOGRAPHIE RAYONS X

Mais les développements qui ont été entrepris sur les steppers X, notamment en Allemagne et au Japon, sont autrement plus importants (21, 22). En réduisant la longueur d'onde à quelques nanomètres on peut revenir à la projection par ombre portée avec le masque et le wafer placés à 10 - 15 microns de distance. L'exposition est faite champ par champ, avec répétition par déplacement du wafer. C'est le stepper X. Il pose deux problèmes majeurs, celui du masque et celui de la source.

Le masque est réalisé soit sur un film polymide, soit, préférentiellement, sur un film mince de nitrure de silicium de 2 microns d'épaisseur. Les patterns sont constitués par de l'or ou du tungstène.

La stabilité dimensionnelle du masque est la principale difficulté à laquelle se heurtent les technologues actuellement.

Les sources classiques RX à anode tournante fournissant trop peu d'énergie, on s'est orienté très rapidement vers le rayonnement synchrotron (figure 14). Des minianneaux de stockage ont été développés pour constituer les sources de steppers X. Ces minianneaux peuvent alimenter plusieurs steppers et constituer ainsi la source unique pour toute une ligne de production.

L'investissement est important et le risque lourd de conséquences pour le fabricant de circuits intégrés qui voit ainsi toute sa production tributaire de la fiabilité de l'anneau et de son injecteur.

Fig. 15 IMAGERIE RAYONS X

D'autres types de sources sont également proposées tels que :

- le laser à électrons libres qui permet de choisir une longueur d'onde dans un spectre très large de 4 nm à 100 nm (23) et pourrait aussi alimenter plusieurs steppers.
- Une source RX à plasma laser (Fig. 14) qui permet de revenir à une machine intégrée.

Mais d'autres difficultés vont surgir en production : comment réaliser un masque échelle 1 avec des motifs de 0,25 μm puis plus tard 0,1 micron, et ce, avec une précision de quelques nanomètres, et avec une qualité zéro défaut ?

La difficulté technologique est telle que les chercheurs orientent leurs travaux aujourd'hui vers la réalisation d'optiques de réduction qui permettraient d'utiliser des masques à échelle 5 ou 10 (figure 15) (24).

C'est également un beau défi, mais il est dans la continuité de ceux que se sont fixés les opticiens et technologues depuis que la microlithographie est venue troubler leur sommeil !

CONCLUSIONS

Nous avons passé en revue les différents aspects de la fabrication des circuits intégrés et de ses répercussions sur les machines optiques de microlithographie. Ce n'est qu'un survol incomplet et approximatif, mais il permet peut être au lecteur non averti de se faire une première idée sur les techniques mises en oeuvre. Pour compenser les lacunes de ce descriptif général nous proposons au lecteur qui voudrait parfaire sa connaissance de consulter les spécialistes. Nous avons essayé de réunir en référence leurs plus récentes interventions.

Je ne voudrais pas terminer cet exposé sans remercier M. Steve WITTEKOEK qui m'a aimablement fourni informations et documentation et Mme Jocelyne MAHE pour son aide efficace dans la préparation et la rédaction du texte.

REFERENCES

- (1) Introduction to Microlithography .
Ed. by L.F. THOMPSON, D.G. WILSON, M.J. BOLUDEN
ACS Symposium Series.
- (2) Integrated circuit fabrication technology D.J. ELLIOT.
Ed. Mc Graw- Hill Book Company.
- (3) Laser based pattern generation.
P. BURGGRAAF.
Semiconductor international May 1988.
- (4) MARKLE D.A. Solid State Technology, 1977 59 (6) p.68.
- (5) CUTHBERT J.D. Solid State Technology, 1977 59 (6) p.42.
- (6) Step and Scan lithography using reduction optics.
J.D. BUCKLEY, D.N. GALBURT, C. KARATZAS.
J. Vac. Sci. Technol. B 7 (6) Nov-Dec. 1989.
- (7) The future of manufacturing with optical lithography.
Optics and Photonics News - October 90.
- (8) Resolution and overlay of submicron I-line wafer steppers.
J. GREENEICH and al.
PIE Proceedings optical /laser microlithography March 88 Santa Clara USA.
- (9) New 0.54 Aperture I line wafer stepper with field by field leveling combined with global alignment.
M.A. VAN DEN BRINK, and al.
Proceedings SPIE March 1991 San José USA.

- (10) New developments in wafer stepper technology for submicron devices.
S.WITTEKOEK, and al.
Proced. SPIE Optical microlithography and metrology for microcircuit fabrication
April 1989, Paris, France.
- (11) Deep UV wafer stepper with through the lens wafer to reticle alignment.
WITTEKOEK, and al.
SPIE Proceedings laser based lithography March 90 San José USA.
- (12) Optical lithography : Staying alive.
Semiconductor international Feb. 90.
- (13) Coherent illumination improves step and repeat printing on wafers.
M. LACOMBAT, E.M. DUBROEUCQ.
SPIE Proceedings vol 174, San José USA, April 1979.
- (14) Design principles for an illumination system using an excimer laser as a light source
J. WANGLER, J. LIEGEL.
SPIE vol 1138, Optical lithography 1989, San José USA.
- (15) Excimer laser lithography.
KANTI JAIN.
SPIE optical engineering Press 1990.
- (16) Double diffraction gratings as keys for high contrast alignment on wafer steppers.
G.M. DUBROEUCQ, M. LACOMBAT, D. SULLEROT.
Proceedings Microcircuit Engineering 1980.
- (17) Phase gratings as wafer stepper alignment marks for all process layers.
S. WITTEKOEK and al.
SPIE Proceedings Optical Microlithography IV March 85 Santa Clara USA.
- (18) Overlay : Lithography's big challenge.
Semiconductor international Feb. 91.
- (19) Submicron holographic photolithography for the 1990.
J. BROOK, R. DANDLIKER
Solid State Technology Nov. 89.
- (20) Submicron holographic lithography for the 1990.
R.T. CHEN.
Optical Engineering March 1990.
- (21) Soft X ray projection lithography.
D.L. WHITE and al.
Solid State Technology July 91.
- (22) X Ray lithography : the promise of the fast and reality of the present.
D.W. PETERS , R.D. FRANKEL.
Solid State Technology March 1989.

- (23) Extreme UV free electron laser based projection lithography systems.
B.E. NEWNAM.
Optical Engineering Aug. 91/ Vol 30 n° 8.
- (24) The challenge of X Ray lithography.
B. COMPTON.
Optical Engineering October 1990.