

LA PHOTOLITHOGRAPHIE EN MICROÉLECTRONIQUE

Les transistors sont les briques de base constituant les puces électroniques. La miniaturisation des composants selon la loi de Moore [1] implique l'intégration de transistors de plus en plus petits. Chaque microprocesseur contient maintenant des milliards de transistors. Pour des raisons de coût de fabrication, ils ne peuvent évidemment être fabriqués unitairement et sont donc réalisés simultanément sur des wafers qui peuvent accueillir des centaines de microprocesseurs complets. Les transistors et circuits intégrés sont ainsi réalisés par une succession d'opérations de dépôts de matière et de gravures, couche par couche. Afin de contrôler la géométrie des dépôts et gravures, ces derniers sont réalisées au travers d'une couche de résine recouvrant les parties à protéger (Fig. 1.1). Le motif à graver est précédemment imprimé dans la résine par un procédé de photolithographie séparé en 3 étapes :

- dépôt d'une couche de résine photosensible uniforme sur le wafer

1. INTRODUCTION

- exposition de la résine au travers d'un masque
- enlèvement de la résine exposée (ou non exposée).

La taille des composants fabriqués dépend donc fortement de la précision avec laquelle l'image du masque est faite dans la résine lors de l'étape d'exposition. L'amélioration du pouvoir de résolution des optiques de projection des scanners de photolithographie est donc un élément central dans les avancées de miniaturisation en microélectronique [2].

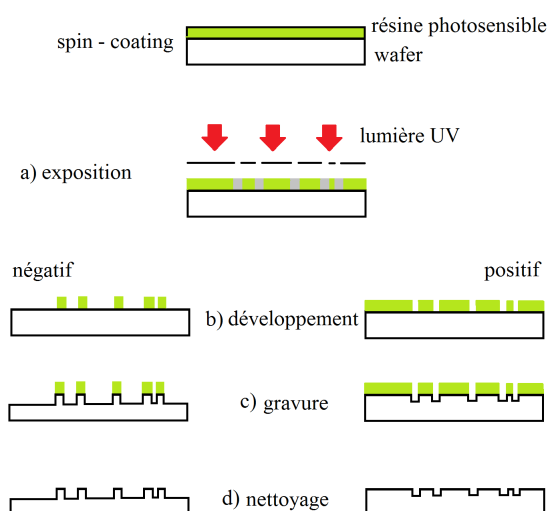


FIGURE 1.1 – Photolithographie suivie d'une gravure. À gauche résine négative, à droite résine positive

1.2 POUVOIR DE RÉOLUTION DES OPTIQUES DE PROJECTION

Le pouvoir de résolution est défini à l'aide du critère de la dimension critique atteignable (Critical Dimension, "CD"), qui est la plus petite dimension que peut résoudre l'optique de projection :

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1.1)$$

où λ est la longueur d'onde d'émission de la source, NA l'ouverture numérique de l'optique de projection et k_1 un paramètre dépendant du procédé et des paramètres opératoires. Suivant les objectifs de dimension critique recherchés (planifiés chaque année sur une période de 10

ans par l'International Technology Roadmap for Semiconductors [3]), on dispose donc de 3 variables d'optimisation.

1.2.1 Longueur d'onde de la source

Le pouvoir de résolution dépend linéairement de la longueur d'onde de la source choisie. La mise au point de nouvelles sources de longueur d'onde plus faible est donc une première source évidente d'amélioration du pouvoir de résolution des scanners de lithographie. Les premières sources étaient des lampes à vapeur de mercure dont les longueurs d'onde d'émission peuvent aller de 436 à 365 nm suivant la raie d'émission sélectionnée. Actuellement les lasers excimères DUV (Deep Ultra-Violet) à 193 nm permettent de réaliser les transistors les plus fins des processeurs. Une nouvelle génération de machines travaillant à une longueur d'onde EUV (Extrême Ultra-Violet) de 13.5 nm est en cours de développement [4].

1.2.2 Facteur k_1

Le facteur k_1 intègre divers paramètres liés au procédé et aux conditions opératoires. Sa limite physique est 0.25 ($k_1 \geq 0.25$). De nombreux moyens permettent d'approcher cette limite physique. Ils sont appelés technologies d'amélioration de la résolution (Resolution Enhancement Technologies) [5]. On peut citer notamment :

- les masques à décalage de phase dont le rôle est de créer des interférences destructives pour améliorer le contraste sur le wafer
- l'illumination hors d'axe qui permet d'augmenter la profondeur de champ tout en conservant la même résolution
- la correction optique de proximité (Optical Proximity Correction) qui modifie légèrement les motifs des masques de manière à prendre en compte la difficulté naturelle des scanners à résoudre certaines formes géométriques (angles droits par exemple)
- l'exposition multiple qui permet de séparer les motifs à graver en deux masques pour prendre au contraire avantage de la facilité naturelle des scanners à résoudre des motifs plus simples.

1.2.3 Ouverture numérique

Augmentation de NA

Le terme NA contient de nombreux aspects liés à la qualité des optiques. L'ouverture numérique est définie comme l'angle maximal du

rayon le plus écarté arrivant sur le wafer, multiplié par l'indice de réfraction du milieu séparant l'optique de projection du wafer (Fig. 1.2). Afin de maximiser l'ouverture numérique, les systèmes se sont com-

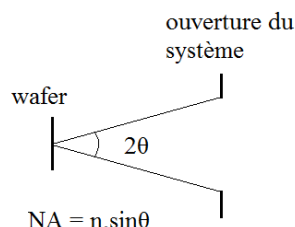


FIGURE 1.2 – Définition de l'ouverture numérique.

plexifiés et font intervenir des optiques de plus en plus grandes (Fig. 1.3, [6]) et de plus en plus précises (écart sub-nanométrique par rapport à la forme théorique). La technologie de photolithographie en immersion permet en outre de jouer sur l'indice de réfraction du milieu, et le passage de l'air à l'eau pure a ainsi permis d'augmenter l'ouverture numérique maximale de 0.9 environ à 1.35 [7]. Un autre moyen d'améliorer l'ouverture numérique est d'utiliser des lentilles asphériques.

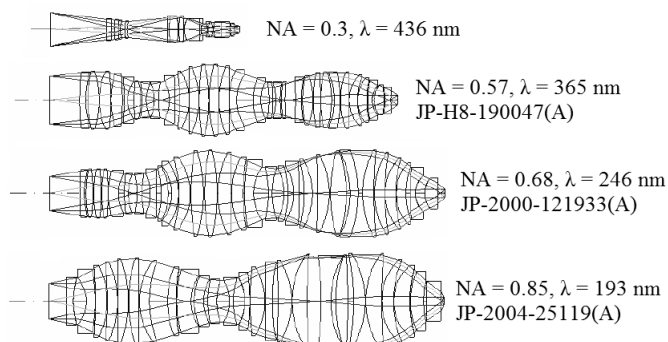


FIGURE 1.3 – Évolution des optiques de projection.

1.2.4 Lentilles asphériques

Les lentilles sphériques généralement utilisées entraînent naturellement diverses aberrations optiques qui déforment l'image du masque réalisée sur les wafers. Pour corriger ces aberrations, la solution est

d'ajouter d'autres lentilles sphériques de telle façon que les aberrations s'annulent. Cependant, une optique non sphérique bien choisie peut permettre de limiter ces aberrations. Ces surfaces qui présentent un écart par rapport à la sphère sont dites asphériques. Le corollaire de la bonne correction des aberrations par les optiques asphériques est la possibilité d'augmenter l'ouverture numérique et de diminuer le nombre de lentilles nécessaires dans un système optique (Fig. 1.4, [8]), tout en conservant la même qualité optique.

⇒ La qualité optique, le poids et l'encombrement sont ainsi favorablement impactés par l'utilisation de lentilles asphériques. Ces lentilles restent cependant difficiles à fabriquer avec une précision suffisante et leur usage reste pour l'instant limité.

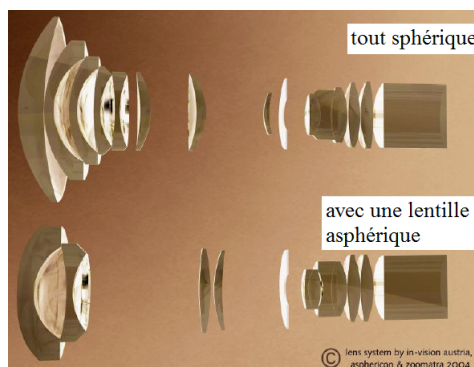


FIGURE 1.4 – Avantage des lentilles asphériques en termes d'encombrement.

1.3 CONTEXTE DE LA THÈSE

La société Reosc travaille depuis plus de 10 ans dans l'étude et la fabrication de sous-ensembles optiques complets de scanners modernes et doit répondre aux nouveaux challenges que relève la photolithographie. Pour les optiques de projection de scanners, comme on l'a vu précédemment, c'est principalement l'augmentation du pouvoir de résolution qui permet d'améliorer l'image du masque dans la résine et qui nécessite :

- une optimisation de la formule optique prenant en compte les limitations de fabrication

- un meilleur contrôle des aberrations des optiques fabriquées : aberrations géométriques, défauts cosmétiques et lumières parasites.

Dans ce cadre, Reosc propose d'intégrer des lentilles asphériques dans les futurs instruments optiques. C'est à la fois un enjeu technologique et commercial. Ces dioptries asphériques sont soumis aux mêmes critères de forme et de rugosité que les dioptries sphériques ou plans, cependant ils ne peuvent être fabriqués en utilisant les mêmes procédés. Les procédés de fabrication et de mesure actuels sont en effet optimisés pour des surfaces sphériques. Le fait que la forme d'une surface sphérique puisse être définie par un seul paramètre - son rayon de courbure - permet de tirer avantage d'outils de fabrication de grande taille et de forme complémentaire à la surface à fabriquer, permettant à la fois une bonne précision et une rapidité de fabrication. De même, les surfaces sphériques et planes sont mesurables par des instruments de mesure interférométrique "universels" couplés à une gamme de calibres servant de référence. Les lentilles asphériques ne peuvent être fabriquées et mesurées avec ces moyens conventionnels. En effet, le rayon de courbure local de la pièce varie en permanence, nécessitant l'utilisation d'outils spécifiques pour chaque surface asphérique différente. De la même manière, la mesure par interférométrie d'une surface asphérique nécessite une référence elle aussi asphérique et différente pour chaque lentille. Ces spécificités entraînent un surcoût de fabrication important, qui augmente avec la précision demandée. Le besoin croissant en optiques asphériques pour des domaines d'applications comme le spatial (miroirs allégés), l'astronomie (grands miroirs segmentés) ou l'industrie micro-électronique (miroirs et lentilles de précision subnanométrique) fait de la maîtrise de la fabrication industrielle de ces optiques un enjeu majeur.

Il existe différentes technologies de fabrication de lentilles asphériques. Le tournage à l'outil diamant sur machine de haute précision est un procédé adapté à des matériaux tels que le germanium, le sulfure de zinc ou le séléniure de zinc mais pas aux verres optiques de haute qualité utilisés dans les domaines ultra-violet [9].

Les techniques comme l'usinage laser [10], l'usinage par jet d'eau abrasif [11] et l'usinage par plasma atmosphérique réactif [12] ne sont pas encore suffisamment matures pour être utilisées dans un processus industriel. L'usinage par abrasion avec un fluide magnéto-rhéologique

(Magneto-Rheological Finishing, "MRF") [13] ainsi que l'usinage ionique [14] (Ion Beam Finishing, "IBF") sont maintenant industriels mais plutôt dédiés à la phase de finition, compte-tenu des vitesses d'enlèvement matière limitées. Certaines technologies plus conventionnelles de fabrication de surfaces sphériques, basées sur un savoir-faire prépondérant et très pointu de la part de l'opérateur, ont été adaptées à la fabrication de surfaces asphériques mais donnent des résultats difficilement reproductibles et donc peu compatibles avec une production de série [15, 16, 17]. Il est également possible de créer des dioptres asphériques par dépôt sous vide. Cette technologie fonctionne bien avec certains matériaux comme le germanium, pour des applications dans le domaine infra-rouge mais pour des profils asphériques de faible amplitude (typiquement 20 microns), très inférieure à l'amplitude usuelle pour les optiques de photolithographie [18], généralement de l'ordre de plusieurs centaines de microns. Enfin, le moulage ou pressage à chaud qui consiste à chauffer une lentille puis à la déformer de manière contrôlée est un procédé très prometteur mais qui reste encore limité à des lentilles de dimensions réduites [19].

Fort de ce constat, Reosc a donc choisi de développer un processus de fabrication industrielle fiable, articulé autour de deux procédés déterministes : la micro-rectification et la finition par usinage ionique. Cependant, pour atteindre le niveau requis de qualité, un procédé intermédiaire de polissage multi-phases "polissage et lissage" avec outils dédiés est indispensable et c'est ce procédé intermédiaire qui sera étudié dans le cadre de cette thèse.

1.4 PLAN DE LA THÈSE

Le premier chapitre de cette thèse a présenté succinctement le contexte industriel de cette étude, qui est le développement de procédés de fabrication pour des optiques de précision utilisées en photolithographie microélectronique.

Le deuxième chapitre est consacré aux procédés de fabrication optique. Tout d'abord, les différents outils mathématiques de description de la qualité d'une surface optique sont détaillés. Les moyens de mesure des surfaces optiques, utilisés en suivi de fabrication sont ensuite présentés. Les différentes étapes de fabrication sont alors rapidement présentées et

une synthèse présente chaque procédé ainsi que son rôle, l'état attendu de la pièce en sortie ainsi que les capacités de retouche de défauts. La mise en œuvre industrielle du procédé de lissage de défauts de hautes fréquences spatiales est ensuite détaillée en insistant sur la spécificité du lissage asphérique et la problématique industrielle à résoudre. Les différents outils de lissage asphérique sont alors analysés ainsi que les modélisations existantes. Une conclusion présente enfin les différentes questions auxquelles l'étude doit répondre.

Le troisième chapitre présente en détail le comportement de la poix entrant dans la composition des outils de polissage, qui est le matériau permettant actuellement d'obtenir les meilleurs résultats de lissage. La poix étant un matériau viscoélastique, les notions importantes de viscoélasticité sont dans un premier temps introduites. L'état de l'art des connaissances sur les différents types de poix est ensuite présenté avant de détailler le moyen de caractérisation du comportement mécanique viscoélastique choisi : l'analyse mécanique dynamique avec application du principe d'équivalence temps – température. Les résultats expérimentaux obtenus pour différentes poix synthétiques et naturelles sont alors analysés et un modèle de viscoélasticité par éléments discrets est développé en vue d'une utilisation pour une modélisation du procédé de lissage.

Le quatrième chapitre porte sur le développement d'un modèle permettant d'étudier le procédé de lissage. Une méthodologie de dimensionnement se basant sur une modélisation multi-échelles des outils permet d'étudier la pression de contact outil - pièce. Cette dernière apporte des connaissances importantes sur l'enlèvement de matière généré par les outils. À l'échelle macroscopique, une étude par éléments finis de la capacité de l'outil à suivre la forme asphérique d'une pièce est effectuée. À l'échelle mésoscopique, une approche par éléments discrets permet de calculer la pression dynamique de contact à l'interface poix - pièce. Ainsi l'efficacité de lissage et la capacité de suivi de forme de l'outil déterminées numériquement peuvent être comparées avec les résultats de fabrication industrielle.

Le dernier chapitre présente les conclusions de ce travail de thèse ainsi que les différentes perspectives scientifiques et industrielles.