

sibles – sont placés sur le silicium et exposés à la lumière. Après ces étapes de dépôt et de lithographie, on attaque sélectivement les zones photoactives ou, au contraire, les couches inertes, afin d'obtenir des motifs qui, une fois alignés et combinés avec ceux des autres couches, forment les transistors et leurs connexions. Habituellement, on fabrique plus de 200 puces sur un mince disque de silicium, ou galette (voir la figure 2).

Dans une première série de niveaux de masquage, on dépose des films d'oxyde isolants afin de fabriquer les transistors. Ensuite, on coule sur ces films un enduit photosensible que l'on expose avec un «photo-répéteur», un appareil semblable aux agrandisseurs photographiques ; la lumière traverse un motif nommé masque, qui est composé de parties opaques et de parties transparentes. Après exposition de la résine photosensible, un développement délimite les «trous de contact», où les différentes couches conductrices sont interconnectées : une étape de gravure dans le film d'oxyde établit des contacts électriques entre les transistors, puis la résine est éliminée.

D'autres étapes de photogravure, analogues à la première, permettent de fabriquer les films conducteurs de métal ou de silicium microcristallin qui relient les transistors. La fabrication d'un circuit intégré nécessite une vingtaine d'étape.

Les phénomènes physiques utilisés lors de cette fabrication pourraient limiter les efforts de miniaturisation. L'un de ces obstacles est le critère de Rayleigh, ainsi nommée d'après John William Strutt, troisième baron de Rayleigh, qui obtint le prix Nobel de physique en 1904 : la dimension des plus petits détails pouvant être résolus par un système optique d'ouverture circulaire est proportionnelle au quotient de la longueur d'onde de la source lumineuse par l'ouverture de l'objectif. Autrement dit, plus les longueurs d'onde sont petites et plus l'ouverture est grande, meilleure est la résolution.

Cette loi indique la dimension minimale des transistors que l'on peut placer sur une puce. La source de lumière dont on se sert le plus souvent pour la lithographie des circuits intégrés est la lampe à vapeur de mercure, dont deux rayonnements sont utilisés : la raie g du mercure, à une longueur d'onde de 0,436 micromètre, et la raie i, à une longueur d'onde de

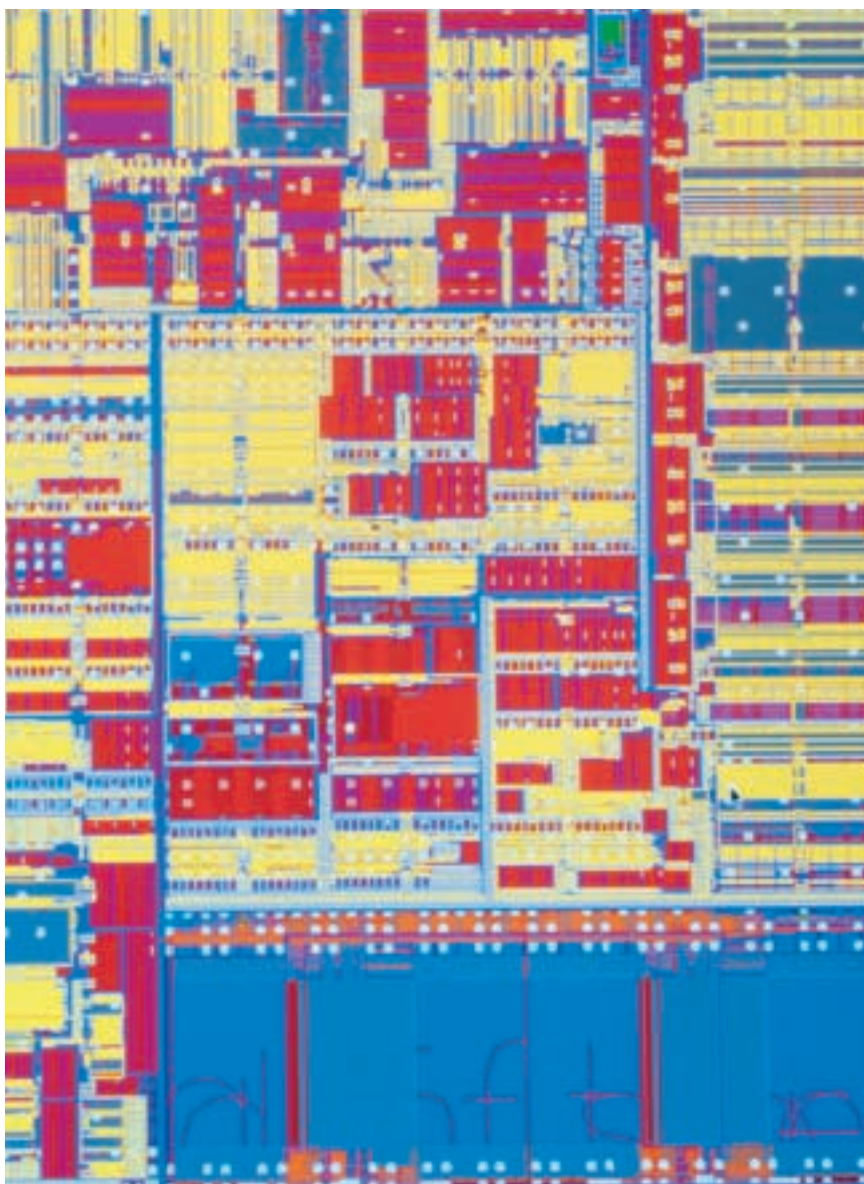
0,365 micromètre. La première est visible, tandis que la seconde est située dans l'ultraviolet proche. Les ouvertures utilisées sont comprises entre 0,28 micromètre pour les lentilles de qualité courante et 0,65 micromètre pour celles des systèmes lithographiques de pointe. Avec ces valeurs, et dans les conditions particulières qu'impose la fabrication en série, la résolution limite est d'environ 0,54 micromètre pour les lentilles utilisées avec la raie g, et de 0,48 micromètre pour celles qui sont utilisées avec la raie i.

Jusqu'au milieu des années 1980, on pensait que la raie g était la seule utilisable en pratique, mais on a progressivement levé les obstacles à l'utilisation de la raie i. L'histoire de ce

progrès illustre la complexité des relations qui existent, dans l'industrie, entre l'économie et la technique : non seulement les difficultés techniques ont été résolues, mais on a alors découvert que d'autres barrières n'étaient que des conséquences du niveau de risque que des entreprises considéraient comme tolérable. Cette histoire se répète aujourd'hui, alors que l'industrie micro-électronique commence à être gênée par les limites pratiques imposées par l'utilisation de la raie i.

Le spectacle doit-il continuer ?

La raie i semblait naguère inutilisable, parce que les verres classiques



1. LES SCHÉMAS DE CIRCUIT permettent aux concepteurs de s'y retrouver dans les plans des puces. Sur ce schéma d'une partie du prochain microprocesseur de Motorola, le PowerPC 620, les différentes couches sont représentées par des couleurs distinctes.

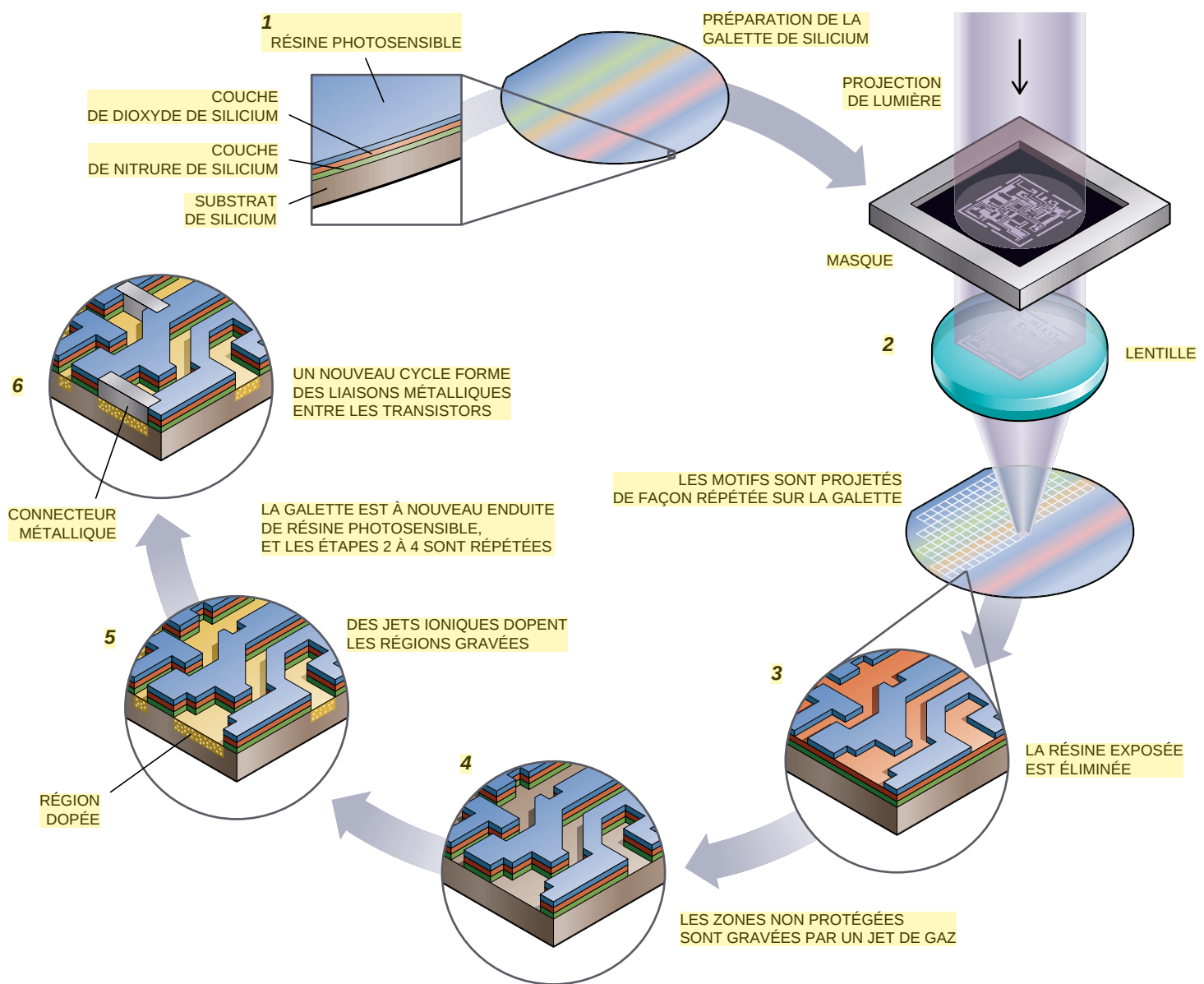
sont opaques aux ultraviolets, ce qui oblige à utiliser des lentilles de quartz. On pensait initialement que, même si l'on avait pu fabriquer des lentilles de quartz appropriées, on aurait difficilement vérifié l'alignement de motifs invisibles. En outre, comme 70 pour cent seulement de la raie i traverse le quartz, on craignait que l'énergie lumineuse absorbée ne chauffe la lentille, ce qui aurait déformé l'image.

D'autres difficultés semblaient condamner les progrès. Le critère de Rayleigh détermine aussi la profondeur de champ ; or plus la profondeur de champ est faible, meilleure est la résolution. Pour les meilleures lentilles uti-

lisées avec la raie g, la profondeur de champ est d'environ 0,52 micromètre et, pour celles de la raie i, de 0,50 micromètre. D'aussi faibles profondeurs de champ nécessitent des galettes de silicium beaucoup plus planes que celles qui étaient produites il y a quelques années, avec les meilleurs appareils alors disponibles.

Des innovations ont résolu ces problèmes. Des méthodes d'aplanissement ont procuré des surfaces optiquement planes, et la limite de Rayleigh a été dépassée grâce à des réglages fins aux bords des motifs, dans le masque ; en changeant la phase des rayonnements de la raie i, on a

obtenu une meilleure définition des bords et, donc, des détails de gravure plus fins. Enfin, comme la constante de proportionnalité entre la longueur d'onde et la résolution dépend du contraste de l'image projetée sur la galette de silicium au cours de la lithographie, les fabricants ont dû admettre, à contrecœur, une constante de proportionnalité inférieure à celle qui semblait nécessaire. En contrepartie, afin de conserver une proportion faible de défauts, ils ont dû réduire les tolérances des opérations de lithographie, de dépôt et de gravure. Ces innovations permettent aujourd'hui l'utilisation de la raie i pour la réalisation



2. LA FABRICATION DES PUCES consiste en un cycle qui peut être répété jusqu'à 20 fois. Un grand nombre de puces sont fabriquées simultanément sur une galette de silicium enduite d'un revêtement photosensible (1). Chaque cycle commence par la projection répétée d'un nouveau motif sur la galette (2). À l'endroit où se forme une image correspon-

dant à une puce, l'enduit photosensible est dissous (3), puis les zones exposées sont attaquées par des gaz (4). Ces zones sont ensuite dopées par des ions, conduisant à la formation de transistors (5). Ces transistors sont reliés entre eux à mesure que de nouveaux cycles ajoutent des couches de métal et d'isolant (6).

de transistors de 0,35 micromètre de côté.

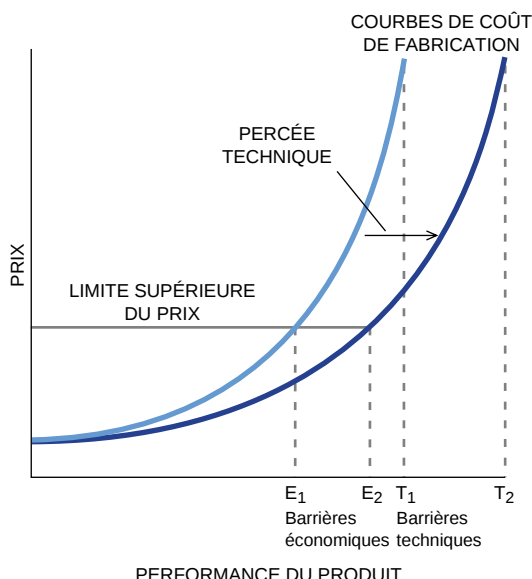
Au cours de tous ces développements, l'enjeu était la diminution du contraste que les entreprises étaient prêtes à tolérer. Lorsque le contraste est parfait, l'image créée sur la résine photosensible est nette. Comme tant d'autres limitations dans l'industrie, le contraste semblait techniquement fondamental, mais il n'était déterminé que par un choix de risques industriels. On trouva finalement que l'affaiblissement du contraste ne réduisait pas les rendements si le contrôle de qualité était renforcé à d'autres moments de la fabrication.

Quand le flot des innovations se tarira-t-il ? C'est difficile à dire, mais, lors de l'amincissement du flot en un mince filet, les conséquences économiques de l'approche des barrières techniques pourraient se faire sentir avant que les barrières elles-mêmes ne soient atteintes : le coût des augmentations de performances des puces croît rapidement lorsque les techniques de fabrication sont utilisées à leur limite, de sorte que les prix de vente, devenant excessifs, risquent de conduire à une stagnation du marché avant l'épuisement des innovations techniques.

Pourtant, le mûrissement d'une nouvelle technique s'accompagne d'une réduction du prix de revient des circuits intégrés. L'industrie passe alors d'une courbe de rendement associée à l'ancienne technique à une autre courbe, correspondant au nouveau procédé. Une découverte permettant de changer de technique de fabrication abaisse la courbe du prix de revient, repoussant les limites techniques (voir la figure 3). On obtient alors, sans augmentation du prix de revient, des performances supérieures, ce qui pousse les acheteurs à remplacer leur ancien matériel. Ce phénomène est important dans l'industrie électronique, car les produits sont rarement utilisés avant de devenir obsolètes.

Les procédés de fabrication et les mécanismes technico-commerciaux évoqués s'appliquent à toutes les sortes de puces, mais le marché principal est celui des puces mémoires. Le prix d'un méga-octet de mémoire a baissé, de 2,5 millions de francs il

PERFORMANCE EN FONCTION DU PRIX



3. LE PRIX DE REVIENT DES PUCES dépend de la technique utilisée pour leur fabrication. Les abscisses T₁ et T₂ correspondent à des barrières techniques : des accroissements minimes des performances des puces deviennent très coûteux. Cependant, les barrières économiques apparaissent bien avant les barrières techniques. Ces barrières se trouvent aux intersections (E₁ et E₂) des courbes avec la droite représentant le prix maximum que le client est disposé à payer. Les percées techniques ont pour effet d'abaisser la courbe jusqu'à la position de la courbe la plus foncée. Les performances s'améliorent alors, ce qui déplace les barrières en E₂ et T₂.

y a 25 ans, jusqu'à moins de 200 francs aujourd'hui. Au cours de la même période, le coût d'une usine de fabrication de telles puces a augmenté, de moins de 20 millions de francs, jusqu'à un peu plus de 6 milliards de francs, ce qui les rend hors de portée de la plupart des entreprises, à l'exception des plus grandes. Ces coûts astronomiques, dus pour la plus grande partie aux investissements nécessaires à des innovations techniques toujours plus imposantes, ont à nouveau attiré l'attention sur les limites de l'industrie des semi-conducteurs.

Les innovations nécessaires

L'industrie micro-électronique ne s'arrêtera pas brusquement, mais les barrières seront si hautes que leur franchissement engendrera des changements plus profonds que ceux provoqués par les cycles précédents.

La plupart des obstacles ont pour origine : soit les structures en couches minces qui composent le circuit intégré ; soit les sources lumineuses néces-

saires à la fabrication de conducteurs extrêmement fins ; soit la largeur des conducteurs eux-mêmes. La constante diélectrique des couches minces isolantes, par exemple, est au cœur de deux difficultés. Quand une couche de matériau isolant est placée entre deux conducteurs, les signaux électriques des deux conducteurs n'interfèrent pas si la constante diélectrique de l'isolant est élevée. Avec l'intégration croissante, les couches sont de plus en plus serrées, et les interférences entre les conducteurs empirent. Pour y remédier, on cherche à réduire la constante diélectrique des isolants. Cette recherche impose de trouver des matériaux de faible constante diélectrique et, aussi, de mettre au point de nouvelles structures de films à faible constante diélectrique. Certains ingénieurs examinent ainsi comment on pourrait cribler la couche isolante de petits vides, pour profiter de la faible constante diélectrique de l'air.

En revanche, en d'autres zones des circuits intégrés, les matériaux doivent avoir une constante diélectrique élevée. La plupart des circuits intégrés contiennent des condensateurs, c'est-à-dire des composants capables de conserver des charges électriques. Dans les mémoires vives nommées DRAM (*Dynamic Random Access Memory*, soit «mémoire dynamique à accès aléatoire»), chaque bit est stocké dans un condensateur : un condensateur chargé représente le nombre binaire 1, tandis qu'un condensateur non chargé représente le nombre binaire 0. Les puces requièrent des condensateurs ayant des capacités importantes. La capacité étant proportionnelle à la constante diélectrique, les DRAM et autres puces semblables doivent contenir des matériaux de constante diélectrique élevée.

Parallèlement, les ingénieurs cherchent des sources lumineuses plus performantes pour les opérations de lithographie. Nous avons vu que la résolution s'obtient par l'emploi de longueurs d'onde plus courtes. Les sources lumineuses au mercure, les plus utilisées aujourd'hui, émettent très peu d'énergie aux longueurs d'onde inférieures à 0,365 micromètre (la raie i). Les lasers (comme les lasers à excimères) sont efficaces jusqu'à environ 0,193 micromètre, mais ils engen-