

Le futur de la micro-électronique

DAN HUTCHESON • JERRY HUTCHESON

La fin de la croissance de l'industrie micro-électronique pourrait obliger les fabricants de circuits intégrés à proposer plus de variété.

Depuis l'utilisation des premières tablettes d'argile, à Sumer, la mise au point de nouveaux moyens de stockage de l'information bouleverse les systèmes juridiques, politiques et sociaux. La science moderne, également, se développe en symbiose avec le traitement de l'information : les progrès scientifiques permettent le stockage, la lecture et le traitement de volumes croissants d'informations, qui donnent, en retour, les bases nécessaires à de nouveaux progrès.

Au cours des dernières décennies, la micro-électronique est devenue une force motrice cruciale de l'entreprise scientifique, inaugurant une ère nouvelle. Les circuits intégrés sont à l'origine des ordinateurs personnels, qui ont transformé le monde des affaires ; ils sont utilisés dans des systèmes de commande qui permettent aux moteurs et aux machines de fonctionner de façon plus propre et plus efficace, et ils sont au cœur d'appareils médicaux qui contribuent à sauver des vies. Ce faisant, ils ont engendré une industrie dont le chiffre d'affaires atteint plusieurs centaines de milliards de francs et qui emploie des millions de personnes. Tous ces avantages, et bien d'autres, résultent principalement des efforts de miniaturisation : l'industrie micro-électronique n'a cessé de placer de plus en plus de transistors sur les puces, à des coûts de plus en plus faibles.

Cette miniaturisation est si régulière qu'elle sert de base aux raisonnements qui président aux développements industriels. Néanmoins, des experts ont craint que des obstacles techniques et économiques ne ralentissent le rythme

du développement : physiciens, chimistes ou ingénieurs, les Cassandres qui annonçaient l'imminence d'une fin de la croissance ont été contredits par la créativité et par l'ingéniosité de leurs pairs.

Pourtant, ne sommes-nous pas, cette fois, au seuil d'une mutation ? Le coût d'une nouvelle usine avoisine aujourd'hui les dix milliards de francs, et la densité des transistors approche les limites théoriques des techniques utilisées. Aussi peut-on se poser la question : qu'advient-il de cette industrie lorsqu'elle se trouvera finalement face à des barrières techniques infranchissables ?

De plus en plus de transistors

En 1964, six ans après l'invention du circuit intégré, Gordon Moore, cofondateur de la Société *Intel*, en 1968, observa que le nombre de transistors placés sur les puces doublait chaque année et il prédit que ce doublement se poursuivrait. Ce phénomène, aujourd'hui nommé loi de Moore, a eu des conséquences d'une grande portée.

Comme les doublements de densité avaient lieu sans augmentation du prix, le coût par transistor diminuait chaque année de moitié. Avec deux fois plus de transistors, une puce mémoire stocke deux fois plus de données. Les microprocesseurs sont composés d'un nombre sans cesse croissant d'unités fonctionnelles qui, moins espacées, interagissent plus vite. Ces progrès ont donc donné aux utilisateurs une plus grande puissance de calcul pour un coût égal, stimulant ainsi les ventes de

puces et la demande d'une puissance toujours plus grande.

Au grand étonnement de beaucoup d'experts – G. Moore compris –, la miniaturisation se poursuivait rapidement. À la fin des années 1970, la progression avait un peu ralenti (le nombre de transistors doublant seulement tous les 18 mois), mais ce rythme s'est maintenu depuis, aboutissant à des circuits intégrés qui comportent aujourd'hui plus de six millions de transistors. Les composants électroniques de ces puces mesurent 0,35 micromètre (ou millionième de mètre) de large. Dans quelques mois, les circuits intégrés qui seront commercialisés comporteront dix millions ou plus de transistors qui ne mesureront que 0,25, voire 0,16 micromètre de large.

Contrairement à ce que laisse penser la loi de Moore, le chemin menant à la puce d'aujourd'hui n'a pas été régulier. À plusieurs reprises, les fabricants de puces ont dû surmonter d'importantes limitations de leurs appareils et de leurs procédés de fabrication. Aucun de ces problèmes n'a été l'obstacle redouté dont la solution aurait été si coûteuse qu'elle aurait ralenti ou même arrêté la progression, conduisant cette industrie à la ruine. Néanmoins, les difficultés sont devenues de plus en plus grandes, pour des raisons liées aux techniques de fabrication des semi-conducteurs.

On obtient les circuits intégrés en façonnant des transistors interconnectés sur un disque de silicium. La fabrication consiste en une série d'étapes, nommées «niveaux de masquage», où des films de matériaux variés – dont certains sont photosen-

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

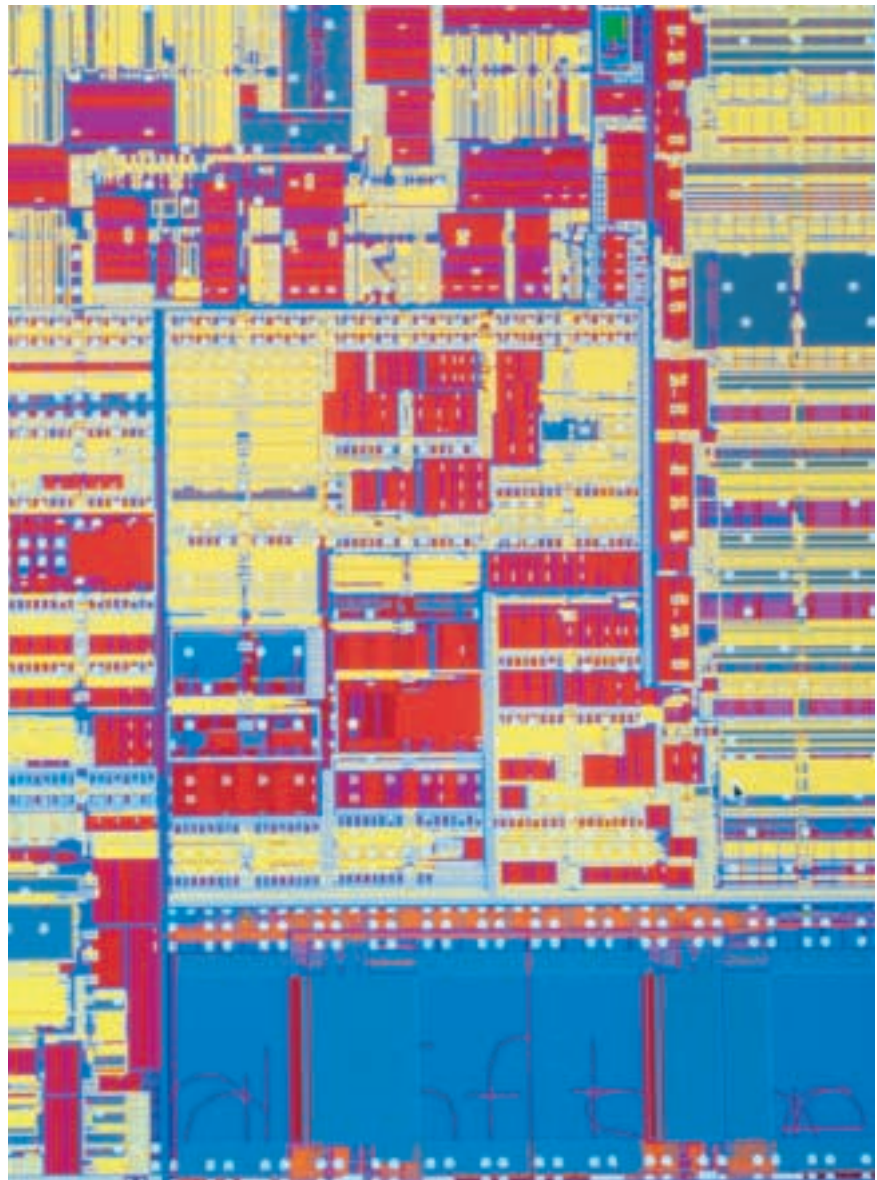
0,365 micromètre. La première est visible, tandis que la seconde est située dans l'ultraviolet proche. Les ouvertures utilisées sont comprises entre 0,28 micromètre pour les lentilles de qualité courante et 0,65 micromètre pour celles des systèmes lithographiques de pointe. Avec ces valeurs, et dans 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.