

de transistors de 0,35 micromètre de côté.

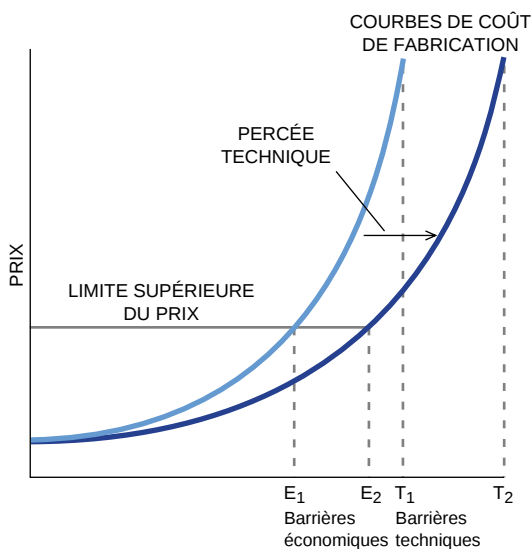
Au cours de tous ces développements, l'enjeu était la diminution du contraste que les entreprises étaient prêtes à tolérer. Lorsque le contraste est parfait, l'image créée sur la résine photosensible est nette. Comme tant d'autres limitations dans l'industrie, le contraste semblait techniquement fondamental, 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 usés 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 T_1 et T_2 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 (E_1 et E_2) 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 E_2 et T_2 .

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-

saies 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-