

NAISSANCE D'UNE PUCE

**UN CIRCUIT INTEGRE, C'EST L'ART DE
L'ENLUMINURE APPLIQUE**

au silicium. Travail de moine où l'ordinateur remplace la main, où l'électron tient lieu de plume, où les manuscrits sont de très petites pastilles bourrées de transistors.

L'informatique, force désormais omniprésente, lance un défi chaque jour plus rude aux physiciens, aux ingénieurs, aux industriels. Celui de loger des centaines de milliers de composants électroniques dans un espace de silicium toujours plus infinitésimal. Celui d'une miniaturisation toujours plus poussée des circuits intégrés. Bref, une gageure des temps modernes est de créer des "puces" dont la taille tend vers l'invisible, et de les charger d'une multitude croissante de transistors.

Une gageure mal tenue, on le sait, par l'Europe. Celle-ci importe 80 % des circuits intégrés, qu'elle consomme, et elle en consomme peu en regard des Etats-Unis et du Japon. Notre vieux continent achète en moyenne, par tête d'habitant et par an, la valeur de 6,60 dollars en semiconducteurs : l'Amérique dépense de son côté 25,80 dollars et le Japon plus encore : 27,60.

Il existe pourtant en France des centres de recherche en microélectronique qui soutiennent honorablement la comparaison avec les meilleurs laboratoires américains ou japonais (!). Faut-il incriminer l'industrie ? Reconnaissons à celle-ci le mérite de

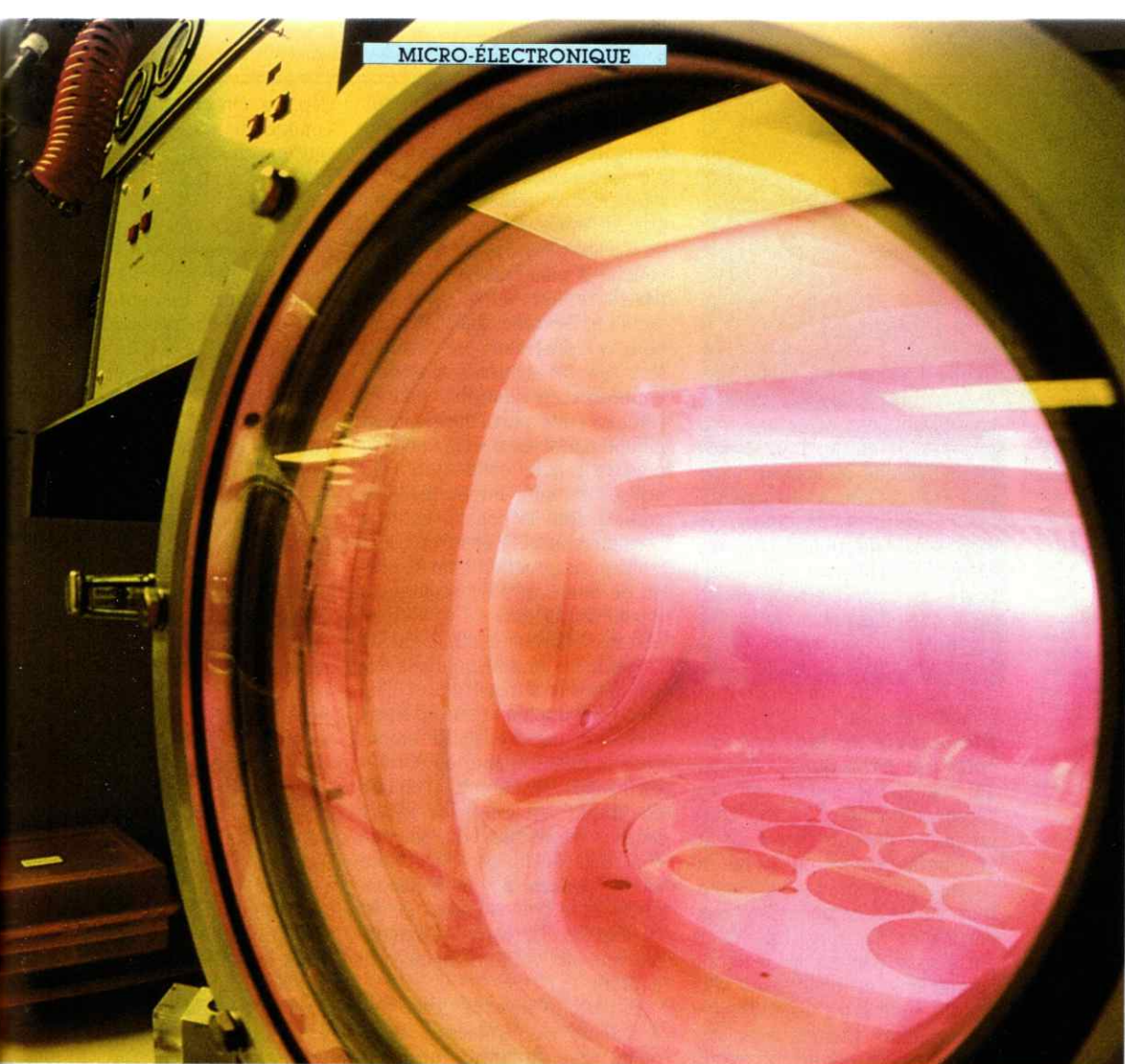
faire tout, actuellement, pour combler son retard. Le premier circuit intégré français, fabriqué — quasi artisanalement — en 1965 par le LETI, ne comptait que dix composants ; ce sont des circuits de 100 000 composants que produit aujourd'hui en série l'usine EFCIS de Thomson, une émanation du LETI. Certes, la performance reste d'un ordre de grandeur en-deçà des chiffres atteints en laboratoire, où l'on arrive maintenant à un million de transistors par puce.

En matière d'informatique, nous avons manqué les premiers rendez-vous de l'Histoire. La France n'est pas au départ au tout début des années 60, quand les transistors électroniques et les circuits imprimés ont remplacé les tubes à vide des premiers calculateurs. Nous sommes déjà distancés au milieu de cette même décennie, qui marque la naissance du circuit intégré : sur des pastilles de la grosseur d'un ongle prennent place, d'abord quelques composants — c'est l'intégration à petite échelle, dite SSI (*small scale integration*) —, puis des dizaines de transistors — l'intégration à moyenne échelle, ou MSI (*medium scale integration*).

Et nous sommes loin derrière le peloton de tête de 1971,



quand deux jeunes Californiens de génie, dans leur garage du comté de Santa Clara, montent un calculateur entier capable d'effectuer des opérations arithmétiques et logiques sur un unique et minuscule circuit intégré. C'est l'avènement du microprocesseur, ensemble miniaturisé qui peut constituer l'élément central d'un micro-ordinateur ; l'origine aussi du mythe de Silicon Valley, au sud-est de San Francisco, qui va devenir le centre mondial de la recherche en semiconducteurs, du fait de la concentration étonnante de grandes et petites entreprises utilisant le silicium, matériau de base de l'électronique moderne. C'est en effet le cristal de sil-



cium qu'on va doper pour lui conférer ses propriétés semiconductrices, qu'on va traiter pour en faire des circuits complexes avant de le découper en minuscules unités — les puces.

1974: autre bond en avant. Encore un succès d'outre-Atlantique: la technologie du "transistor à effet de champ", qui inaugure l'intégration à grande échelle, le LSI (*large scale integration*). Des centaines, puis des milliers, enfin des centaines de milliers de transistors tiennent sur une puce; la densité du million, déjà obtenue en laboratoire, sera acquise d'ici deux ans en production industrielle.

A quoi rime cette miniaturisation forcée? Pas à une

course gratuite aux prouesses technologiques. La densité d'intégration d'un circuit intégré est devenue une nécessité économique autant que technique. Dès lors qu'on réussit à réduire la dimension d'un élément de circuit de moitié, on multiplie par quatre le nombre d'éléments par puce (à surface égale). Les bénéfices sont appréciables: puissance consommée moindre, vitesse de traitement accrue, fiabilité améliorée, coûts en baisse par élément de circuit. Cette miniaturisation accélérée est rendue possible grâce à une simplification des structures de circuits qui permet de caser un maximum de fonctions dans le plus petit espace possible et

grâce aux progrès des techniques et des machines de production.

Cela semble véritablement un miracle technologique de réaliser, automatiquement et en grande série, toute cette suite d'opérations physiques et chimiques, d'une précision d'un millième de millimètre, qui conduira à installer 1 000 000 de composants sur moins d'un centimètre carré. La fabrication doit satisfaire à des conditions draconiennes, telles que même l'industrie pharmaceutique n'en connaît d'aussi rigoureuse: environnement exempt du moindre grain de poussière, absence totale de vibration, humidité et température immuables.

Une étape de la fabrication des puces, la gravure par plasma. Le plasma, gaz ionisé rouge fluorescent, attaque et sculpte les rondelles de silicium contenant chacune de 100 à 300 puces. La gravure est réalisée à moins de 0,1 micron près.

L'objet de ces moyens extraordinaires, c'est le circuit intégré, cette petite chose qui commande tous les rouages du XX^e siècle. Rappelons comment ce minuscule bloc semiconducteur, avec les composants qu'on y incorpore, permet d'accomplir les fonctions logiques que le monde moderne lui demande. On sait que les ordinateurs parlent un langage binaire ; ils savent presque tout dire, mais leur vocabulaire se borne à deux mots : zéro et un. Leur travail mathématique ou logique se réduit entièrement à des manipulations de ces deux unités élémentaires d'information, ou bits. Matériellement, les bits sont portés par des signaux électriques qui circulent à travers un labyrinthe de fils et d'éléments interconnectés. A chaque portion du circuit correspond un type d'opération.

Élément-clé de tous ces circuits : le transistor. C'est lui qui aiguille le signal (un) ou l'absence du signal (zéro). C'est lui qui, à chaque carrefour du labyrinthe, ouvre ou ferme le passage au courant. Finalement, tout circuit est un assemblage particulier de transistors reliés entre eux par un système de connexions et d'éléments dits passifs, comme les résistances et les capacités. Chaque transistor est commandé par un autre transistor en amont, et lui-même en aval. Cette aptitude à arrêter ou à laisser passer le courant sur commande, le transistor la doit à son matériau, généralement du silicium, qui est semiconducteur.

Dans un cristal de silicium

(**dessin 1**), chaque atome est rigidement lié, par quatre électrons, à quatre atomes voisins identiques. Dans cet état et à température nulle, le silicium pur est donc isolant, car aucun de ses atomes ne possède, sur sa couche la plus externe, un électron libre susceptible de se détacher et d'évoluer dans le cristal pour y constituer un courant. Mais en lui ajoutant certaines impuretés en quantités infimes (moins d'une particule pour un million d'atomes de silicium), on peut le rendre conducteur. On utilise comme impuretés des atomes dont la couche externe possède soit cinq électrons, soit trois — autrement dit, un de plus ou de moins que les atomes du cristal de silicium.

Dans le premier cas, celui de l'arsenic ou du phosphore, le déséquilibre créé par l'apport d'un électron supplémentaire permet à celui-ci de circuler librement dans le cristal quand ce dernier est soumis à l'action d'un champ électrique : en effet, les quatre liaisons atomiques du silicium sont déjà occupées. On obtient alors (**dessin 2**) un semiconducteur de type N (négatif), car ce sont les électrons chargés négativement qui forment le courant.

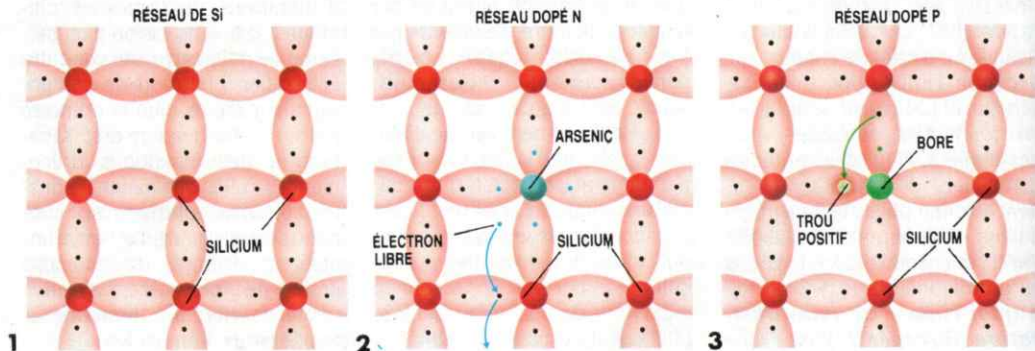
Situation inverse dans le deuxième cas : l'électron manquant crée un "trou", qui laisse une liaison inoccupée. Ce trou, positif — puisqu'il y a absence de charge négative —, peut être comblé par l'électron d'un atome voisin, qui à son tour laissera derrière lui un trou, dans lequel sautera un autre électron. Ainsi, de proche en proche, le trou se

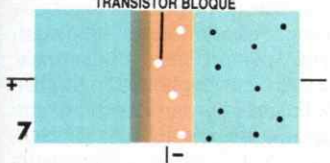
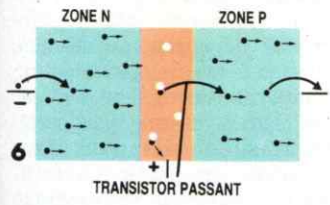
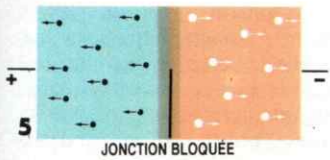
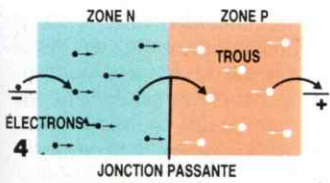
déplace. On crée ainsi un semiconducteur de type P (positif), puisque ce sont les trous positifs qui transmettent ici le courant (**dessin 3**).

Ces deux classes de semiconducteurs deviennent vraiment intéressantes une fois accolées l'une à l'autre. Ce couplage d'un P avec un N forme entre les deux une jonction. Quand une tension positive est alors appliquée du côté P et une tension négative du côté N, les électrons de la partie N, repoussés par la tension négative, se précipitent vers la jonction. Ils y comblent les trous que la tension positive, dans la partie P, a de son côté chassés vers cette même zone d'interface (**dessin 4**). Les électrons s'y font, littéralement, leur trou. Au contraire, en appliquant des tensions inverses, on établit une barrière de potentiel qui empêche les électrons de passer la jonction (**dessin 5**).

Un transistor n'est pas autre chose qu'un "sandwich" de semiconducteurs, NPN ou PNP. Tout l'intérêt d'un tel dispositif tient dans son rôle d'amplificateur de courant. Mais il peut aussi servir de commutateur, et c'est le rôle essentiel qu'il tient dans les circuits intégrés. Selon la tension appliquée à la tranche médiane, P ou N, du sandwich, par rapport à l'entrée, le courant arrive (**dessin 6**) ou n'arrive pas (**dessin 7**) jusqu'à la sortie.

Ainsi par l'intermédiaire de l'électrode de la couche intercalaire (appelée : la grille), qui règle le flux d'électrons, on agit sur le transistor comme sur un interrupteur. Un interrupteur qui répond plus vite que l'éclair :





la transition, ou commutation, de l'état bloqué à l'état passant peut durer moins d'un milliardième de seconde. La phénoménale rapidité de calcul des ordinateurs est due à ce temps de réaction foudroyante du transistor.

Celui qui vient d'être décrit est de type classique "bipolaire". C'est déjà presque un ancêtre. Car la microélectronique utilise aujourd'hui des transistors "à effet de champ", mieux aptes à une intégration très poussée des circuits (la technologie LSI). Ici (*dessin 8*), la grille n'est plus en contact matériel avec la tranche médiane — appelée "espace de contrôle" — du transistor-sandwich. Elle en est séparée

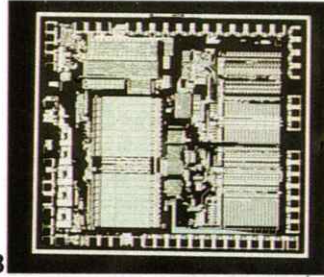
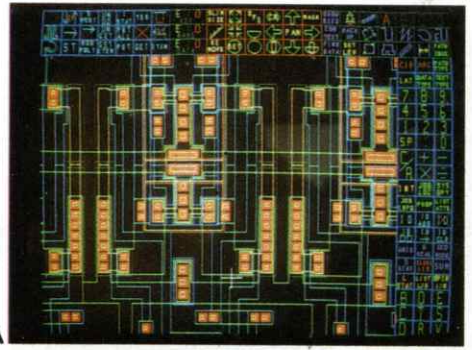
par une couche isolante ultra-mince (0,05 micron). Cette électrode exerce son action de contrôle à distance, grâce à l'effet de son champ électrique.

Si on applique à la grille d'un transistor NPN, une tension positive par rapport à la différence de potentiel d'entrée (*dessin 9*), on induit un champ électrique qui, d'abord repousse les "trous", puis envoie des électrons jusque dans l'espace de contrôle P. Le courant peut alors, par cette espace intermédiaire, s'introduire entre la couche semiconductrice d'entrée d'où proviennent les électrons (la source) et la couche de sortie (le drain).

Comme on peut le déduire logiquement, plus l'espace de contrôle est étroit, plus le transistor est compact, et plus la communication — toujours fonction de la distance, même à une échelle aussi ténue — est rapide. De plus, les ingénieurs ont tout intérêt à réduire la longueur des connexions, c'est-à-dire la liaison du transistor au circuit, pour éviter les pertes de charge.

Comme on le voit le transistor, avec ses différentes couches, est un objet à trois dimensions, même si les électrons y circulent linéairement dans un espace bidimensionnel. Le circuit est donc fabriqué couche après couche, chacune composée d'un matériau particulier (impuretés, isolant, grille, etc.) et ayant un dessin spécifique de sa fonction.

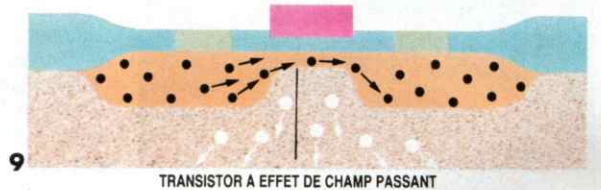
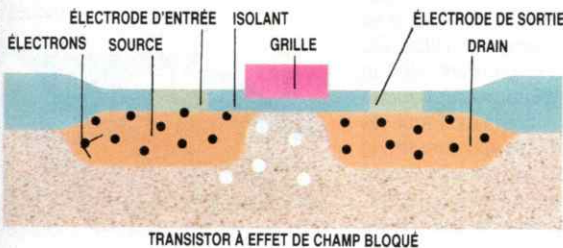
Ces dessins, labyrinthes correspondant à chaque "étage" du circuit, font maintenant partie de notre paysage moderne. Ils sont l'œuvre de concepteurs, véritables maîtres graphistes de l'électronique. Il est vrai qu'ils sont aidés dans leur tâche par

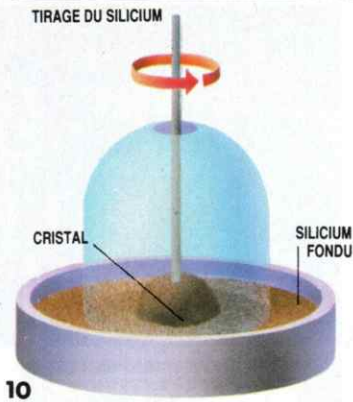


Les concepteurs dessinent le circuit sur un écran à l'aide des programmes de CAO (A). Les masques servant à la gravure de chaque couche sont fabriqués, à partir de ces dessins (B).

une profusion de logiciels et d'énormes banques de données. La conception assistée par ordinateur (CAO) leur fournit des bibliothèques automatisées sur tous les éléments de circuit et leurs paramètres, tels l'épaisseur ou le dosage des impuretés en fonction des caractéristiques demandées. La CAO comprend aussi des programmes d'aide au dessin (*photo A*) et, à l'issue de la conception, stocke la description de chaque couche sur bande magnétique.

Pour graver les motifs sur les couches, on se sert de "masques" (huit à douze, un par couche), autrement dit de caches qui occultent certaines parties au bénéfice de celles que l'on veut traiter. Chaque masque représente le dessin d'une couche du circuit (*voir photo B*). Il est fabriqué par une machine électronique à partir de la bande





10

magnétique (issue de la conception) qui décrit les motifs de cette couche. On utilise une technique, la photolithographie, qui se réclame à la fois de l'art du pochoir, de la photographie et de la lithographie, procédé de reproduction des images qui, en imprimerie, a donné lieu à l'offset. Un circuit intégré est donc la résultante de toute une série de masquages, de traitements physiques et chimiques, d'implantations de matières, de gravures. Le matériau de base est une plaque circulaire de silicium, de 10 cm de diamètre et 0,6 mm d'épaisseur environ, sur laquelle on fait littéralement "pousser" les différentes couches et qui sera ensuite débitée

en une centaine, peut-être même trois centaines, de puces.

Le silicium est, après l'oxygène, l'élément le plus répandu de notre lithosphère. On l'extrait de la silice, qui compose les sables. Après purification, on le cristallise par tirage: un germe de cristallisation fixé à une tige en mouvement (*dessin 10*) donne naissance à un gros monocristal, qui est ensuite découpé en fines tranches, soigneusement polies (*dessin 11*).

Ces tranches de silicium, rangées dans une nacelle en quartz, sont enfournées dans un tube constitué lui aussi de cristal de roche (*dessin 12 et photo C*) — matière qui se recommande par son excellente résistance thermique et sa pureté parfaite. Chauffé à la température constante de 1 000° C, le tube est parcouru par un flux de gaz transportant une vapeur d'eau



13

extrêmement pure, qui oxyde la surface des plaques de silicium (*dessin 13*).

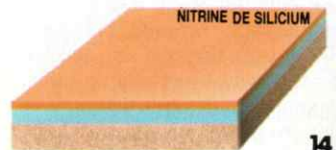
Les plaques de la fournaie sont des "postiches", vouées à être sacrifiées: elles servent uniquement à canaliser l'écoulement du gaz de façon à le rendre homogène pour les plaques suivantes. Le four est surveillé par un microordinateur associé à un écran de visualisation: l'épaisseur d'oxyde peut être contrôlée avec une précision de l'ordre du 10 000^e de millimètre.

Sur cette surface d'oxyde de silicium isolant, il importe maintenant de graver des millions de motifs en creux pour marquer l'emplacement des futurs transistors. Pour buriner la couche d'oxyde on utilisera un masque en nitrure de silicium, qui doit être lui-même gravé en relief. On va donc faire pousser sur la tranche de silicium une couche de nitrure: dans un four, de l'ammoniac et du dichlorosilane se décomposent et se combinent, et une pellicule de nitrure de silicium de très haute

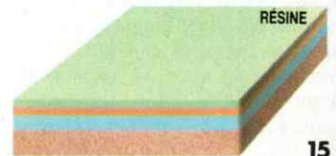
qualité se dépose alors sur la plaque (*dessin 14*). Il s'agit maintenant de graver en relief dans le nitrure le motif du transistor. Pour cela, on utilise pour la première fois un masque, dessiné par les concepteurs du circuit, et la technique de photolithographie.

Ce nitrure, c'est un peu la pierre lithographique sur laquelle les artistes graveurs traacent leur dessin au crayon gras; ils l'enduisent ensuite d'acide nitrique, lequel, sauf aux endroits dessinés, produit par réaction avec la pierre calcaire une couche de nitrate de calcium, substance hygroscopique qui ne "boit" pas l'encre. Seules, donc, les parties dessinées apparaîtront au moment de tirer l'épreuve sur papier. La technique en microélectronique s'inspire de ce principe mais elle l'applique de façon beaucoup plus sophistiquée et automatisée: c'est la photolithographie, à laquelle on aura recours une dizaine de fois dans la fabrication du transistor et dont nous allons détailler les étapes.

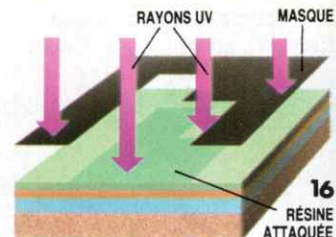
Première étape: couchage d'une résine photosensible sur le nitrure (*dessin 15*). La tranche de silicium-oxyde-nitrure est posée sur un disque tournant.



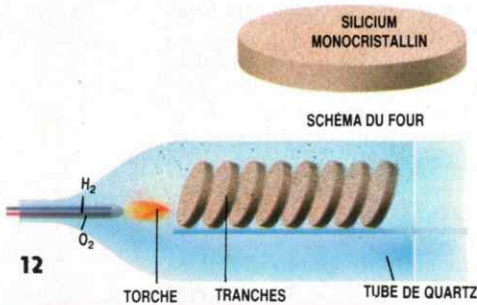
14



15



16



12



On laisse tomber une goutte de résine exactement calibrée, qui, par centrifugation, s'étale uniformément sur la plaque, en une couche d'environ un micron d'épaisseur (*photo D*).

Deuxième étape : insolation de la plaque enduite de résine par des rayons ultraviolets (*dessin 16*), à travers un masque figurant le motif à graver. Aux endroits non protégés par le masque, donc exposés à ces radiations, la résine exposée aux UV se polymérise ce qui la rend plus résistante. Phase infiniment délicate, car l'image de chaque élément du masque doit être impeccablement reproduite. Il existe plusieurs techniques de masquage. La photorépétition est la plus précise : le masque est 10 fois plus grand que le motif à tracer, et ne représente qu'une seule puce : il sera donc nécessaire de le projeter, en le réduisant, autant de fois qu'il y a de puces sur une tranche. La photo E montre un photorépéteur : la tranche de silicium est posée sur un chariot à coussin d'air mobile et un système optique commandé par ordinateur peut la faire se déplacer de telle sorte que chaque flash ultraviolet isole exactement l'emplacement voulu, à 0,2 micron près (*photo E*).

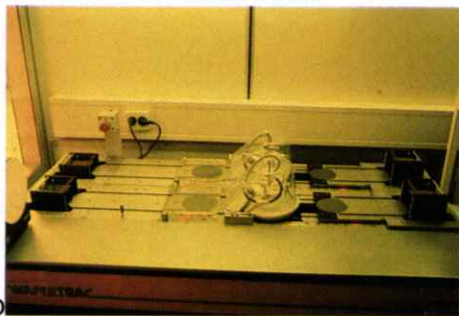
Troisième étape : celle de la révélation, où l'image latente se matérialise sur la plaque (*dessin 17*). La résine, qui était abritée des rayons UV par le masque, est dissoute par un solvant. Mais la résine, exposée aux UV et ainsi polymérisée, résiste au solvant.

Quatrième étape : la gravure du nitrure, qu'on élimine des endroits où il n'est plus protégé par la résine (*dessin 18*). Elle était réalisée chimiquement, il y a peu d'années encore. Mais pour éviter les bavures et les défauts sur les "marches" — les arêtes des parties en relief —, on lui préfère aujourd'hui la gravure sèche par plasma : les plaques sont placées dans une enceinte où l'on injecte un mélange de gaz qu'on soumet à des charges électriques de hautes fréquences. Les électrons sont dissociés de leur noyau atomique et il se crée alors un gaz d'ions — ou plasma — qui percute la plaque et s'attaque aux parties du matériau, en l'occurrence le nitrure, non recouvertes de résine (*photo F*).

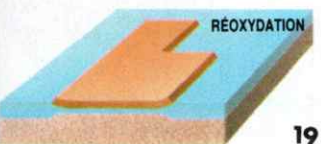
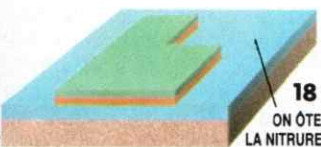
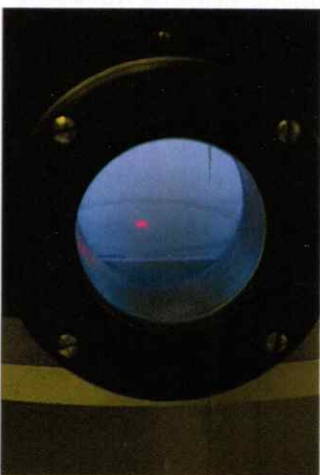
Cinquième étape : élimination de la couche de résine, à l'aide d'un solvant chimique. Sur l'oxyde ne subsiste plus que le motif en bas-relief, tracé correspondant aux ajours du masque. Ce motif gravé en nitrure sert à son tour de masque et permet, après de nouvelles oxydations, d'obtenir sous le nitrure une couche d'oxyde très mince (quelques centaines de microns). Sur les côtés, une épaisseur d'oxyde bien plus considérable assure l'isolation du transistor (*dessin 19*). Reste alors à ôter le nitrure pour voir, dans l'oxyde, le motif se découper en creux (*dessin 20*).

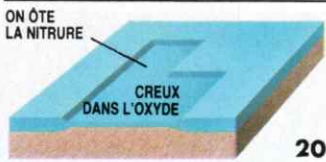
La grille, en silicium polycristallin, est gravée par une succession d'opérations semblables aux étapes qui viennent d'être décrites. Le silicium polycristallin est un conducteur (contrairement au silicium monocristallin qui constitue la base de la tranche) (*dessins 21 à 26*).

Il s'agit maintenant d'implanter dans le silicium les impuretés



Les motifs de chaque couche du circuit sont réalisés par photolithographie. La photo (D) montre le couchage de la résine photosensible. Un photorépéteur (E) permet d'insoler la résine par les rayons UV à travers un masque. Les parties non protégées par la résine sont attaquées par gravure au plasma (bleu). Un laser (rouge) mesure l'épaisseur de la couleur (F).





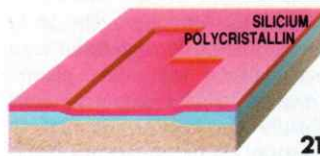
20

par inclusion ionique : des gaz contenant l'impureté désirée (arsine, phosphine) sont soumis à un bombardement d'électrons émis par un filament chauffé. Il en jaillit des ions d'arsenic, de phosphore, de bore, etc., parmi lesquels un spectromètre de masse opère une sélection rigoureuse, séparant le bon grain de l'ivraie, et ne conservant comme impuretés que l'adjuvant désiré.

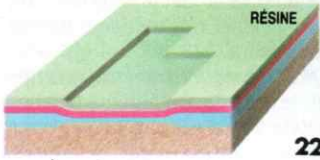
Ce faisceau d'ions privilégiés est alors envoyé dans un accélérateur linéaire de particules, et défléchi de façon à balayer la surface de la plaque de silicium. Les ions sont arrêtés par la grille, qui joue son rôle de masque, et par l'épaisseur d'oxyde qui isole le futur transistor ; par contre, ils traversent facilement l'oxyde dans ses parties minces et pénètrent jusqu'au silicium, auquel ils inoculent les impuretés sur toute la surface qui n'est pas masquée par la grille.

Ce dopage est d'une formidable précision. Mais il a comme inconvénient de détériorer le réseau cristallin du silicium et d'affecter ses caractéristiques de conductibilité électrique ; le bombardement ionique n'est pas un traitement de toute douceur. Il faut donc réparer le dommage en repassant les plaques au four, pour les recuire. Une opération qui comporte ses propres risques, puisqu'elle fait quelque peu migrer le dopant, qui tend à déborder sur la "zone de contrôle" ; celle-ci rétrécit alors sous la grille. N'oublions pas que nous sommes ici à l'échelle microscopique : au LETI, on fabrique des circuits de grille de 1,2 micron environ, dont la zone de contrôle mesure autour d'un micron.

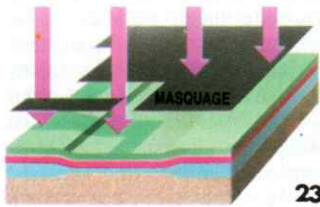
Voilà le transistor pratiquement achevé. Il possède sa grille, séparée de la zone de contrôle par une couche de silice, ainsi que sa source et son



21



22



23



24

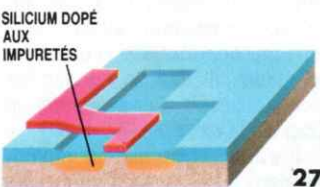


25



26

drain, tous deux convenablement dopés. Il lui manque encore les connexions en aluminium qui assureront le contact avec ces trois éléments du circuit, en plus de quelques autres. Il faut au préalable isoler le circuit sous une couche de verre dopé au phosphore, en ménageant bien sûr les ouvertures



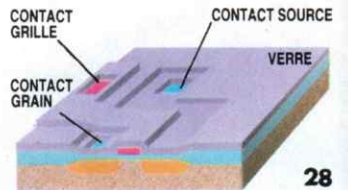
27

qui recevront les connexions (**dessin 28**). Ces orifices sont pratiqués par le procédé de photolithographie, avec son attirail de résine, de masques et autres accessoires qui nous sont maintenant familiers.

Pour greffer les contacts d'aluminium sur les circuits, on utilise une machine à plasma, le magnétron ; les plaques sont posées sur un plateau tournant, tandis qu'un champ électrique est créé entre ce plateau et une cible en alliage d'aluminium et de silice, sous très faible pression d'argon (**dessin 29**). L'argon se transforme en plasma sous l'influence du champ électrique ; ses ions viennent heurter la cible, lui arrachant des ions d'aluminium qui, accélérés par le champ, vont se déposer en une fine pellicule sur les plaques de circuits (**dessin 30**). Le tracé des connexions est ensuite gravé sur ce film d'aluminium, toujours par photolithographie.

Le transistor est né. Nous avons parlé des principaux stades de la fabrication ; en fait, celle-ci comprend presque une centaine d'étapes indispensables. De plus, un circuit comporte, outre des transistors, toute une série d'éléments passifs justiciables des mêmes technologies de production.

Les procédures de contrôles et de tests ne sont pas moins compliquées, ni moins longues, ni moins rigoureuses, ni tellement moins coûteuses, que celles de la fabrication. Ces opérations sont d'autant plus critiques que le risque de malfaçon, pour des éléments de cette complexité, est extrêmement élevé. Pour des produits standard, le rendement atteint 70 % de la fabrication. Pour des circuits de pointe, il peut ne pas dépasser 15 %. Pas plus du septième,



28

donc, de la production ne sera retenu. On connaît le scandale qu'ont soulevé les autorités militaires américaines récemment, devant le manque de fiabilité des circuits intégrés à usage aéronautique et spatial livrés par leurs fournisseurs: ceux-ci rognaient sur le coût des vérifications en bout de chaîne, dépense effectivement tout à fait exorbitante. Des tests par échantillonnage sont effectués à différentes étapes de la fabrication (**photo G**): on vérifie les dimensions des éléments; les épais-



G Ce qui explique l'étrange tenue de cosmonaute du personnel.

Au LETI, à Grenoble, les salles blanches, qui représentent 1 800 m² sur les 17 000 m² du laboratoire, sont considérées de "classe 100" lorsque 1 m³ d'air ne contient pas plus de 100 poussières de diamètre supérieur à 0,3 micron. L'atelier prototype en cours de réalisation avec la société Thomson, appliquera des normes encore plus inexorables: moins de 10 particules de cette dimension par m³. A titre de comparaison, une femme à cheveux longs qui bouge la tête "émet" dans l'air, par ce seul geste, 500 000 particules de 10 microns! Un fumeur est interdit d'accès à une salle blanche dans les trois heures qui suivent sa dernière cigarette. Jusqu'au maquillage des employées qui est réglementé: les produits cosmétiques qui se dispersent en poudre dans l'atmosphère ambiante, sont très "toxiques" pour les matériaux en cours d'élaboration.

Pour répondre aux exigences de températures, d'hygrométrie et d'empoussiéage, on brasse, dans les sous-sols du LETI, plus de 425 tonnes d'air par heure. Les machines ultra-sensibles, dont le fonctionnement ne tolère pas le moindre mouvement du sol, reposent sur des dalles antivibratoires, elles-mêmes supportées par d'énormes piliers qui isolent les équipements des trépidations de la surface.

Jusqu'où peut-on aller dans la miniaturisation des circuits? Le critère utilisé dans la profession pour mesurer leur dimension critique, la largeur de grille. A l'heure actuelle, les circuits produits en série par l'indus-

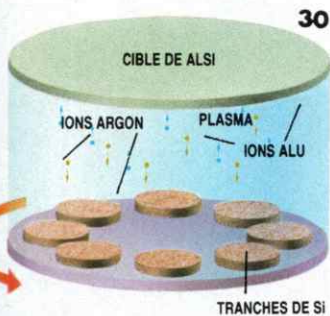


H trie ont des largeurs de grille de 2 à 3 microns. Il existe déjà des circuits de 1,5 micron à usages très spéciaux. Ils devraient accéder au stade industriel d'ici deux ans. Les prototypes qui sortiront de l'atelier pilote du LETI auront une dimension critique de 1,2 micron, faisant de ce laboratoire un des leaders mondiaux en la matière. Mais déjà les études technologiques portent sur des circuits à grilles de 0,8 micron, et la recherche fondamentale explore le domaine du demi-micron. Au LETI, on se penche sur des grilles de 0,15 micron. La miniaturisation au dixième de micron, soit l'échelle de 0,0001 mm, est une certitude inscrite dans le proche futur.

Le temps de commutation des transistors se "miniaturise" lui aussi. Pour une grille de 1 micron, il est de 150 à 200 picosecondes, c'est-à-dire 1,5 à 2 milliardièmes de seconde. La vitesse de commutation passe à 100 picosecondes pour une grille de 0,5 micron. Elle atteint 70 picosecondes pour une grille de 0,25 micron.

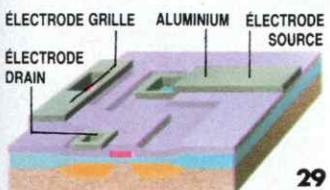
Toujours plus petit, toujours plus vite: peut-être le plus grand défi industriel du siècle. Défi technologique, défi financier dans un secteur à évolution aussi rapide, les équipements coûtent des prix exorbitants et sont rapidement désuets, susceptibles d'être changés tous les deux ans. La France néanmoins semble prête à l'effort. Thomson, au 20^e rang mondial pour la production des microcomposants, ambitionne de conquérir la 10^e place. Une ambition qui, si elle se réalise, mettra l'industrie microélectronique française au niveau de sa recherche. ■

En cours de fabrication, on teste les silicium par échantillonnage. Les circuits (**G**) sont contrôlés au microscope électronique à balayage.



seurs des couches, par microscopie électronique à balayage, etc. (**photo H**). Mais il est impensable ici de se contenter d'appréciations statistiques: chaque circuit doit être contrôlé individuellement, et sous de multiples aspects, avant d'être déclaré bon pour le service. Il ne reste plus alors qu'à les placer en boîtier, leur fixer des connexions en fil d'or enfin les encapsuler.

L'environnement de fabrication s'apparente bien plus à celui du laboratoire, ou même du bloc opératoire hospitalier, qu'à celui de l'usine. Tout se déroule en salles dites "blanches", c'est-à-dire dans un milieu assujéti à des normes d'empoussiéement, de température, d'humidité, de vibrations inconnues par ailleurs.



29