

LA micro-électronique AU MICROSCOPE

**Regardez par-dessus notre épaule,
nous vous ferons voir
les merveilles de la fabrication
des microcircuits.**

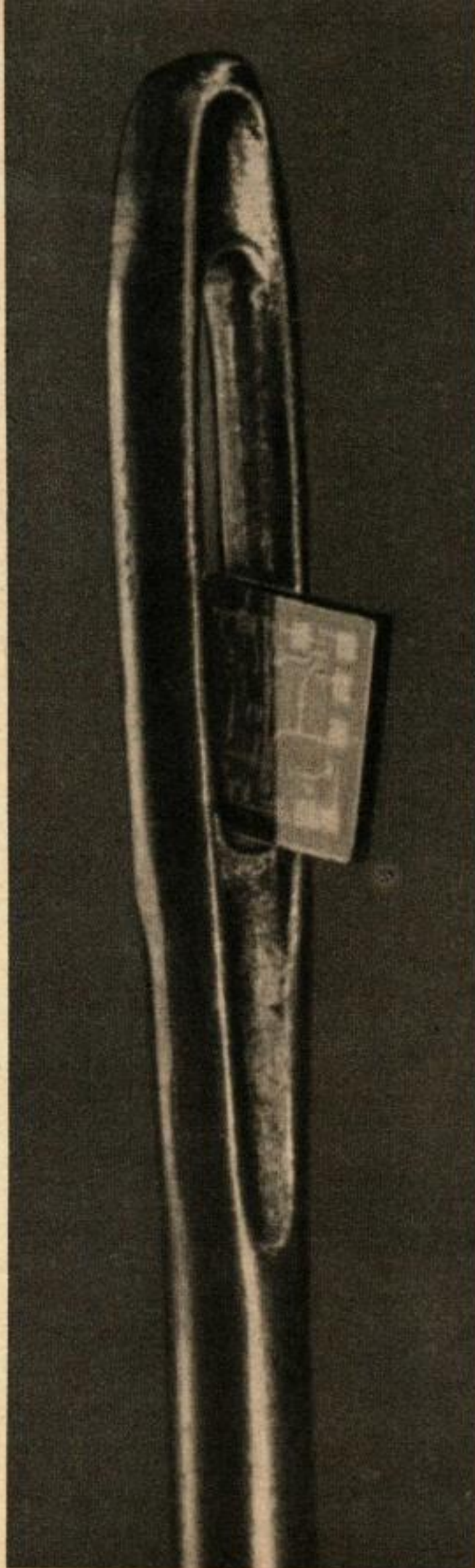
Par Alexandre MARKOVICH

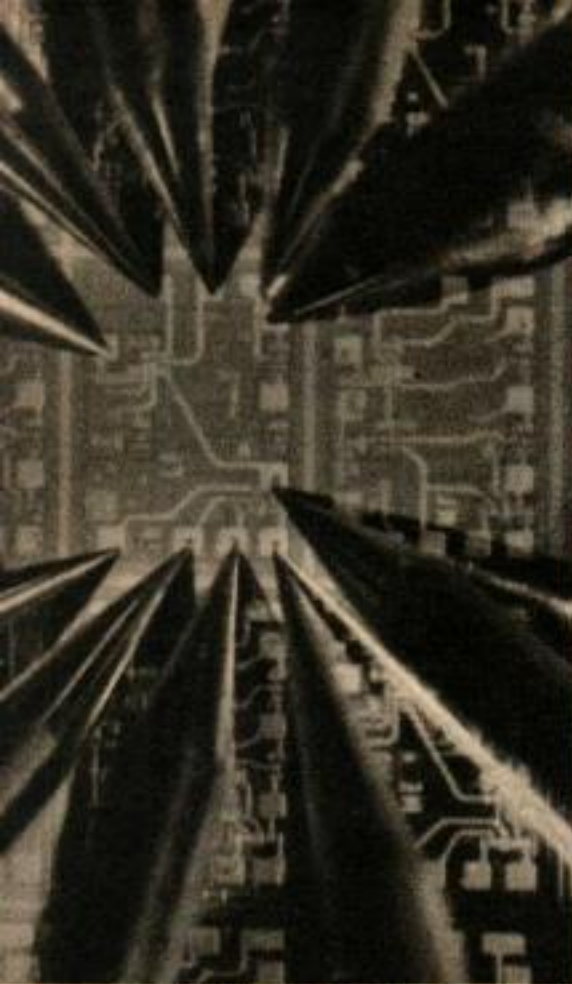
LES sorciers de la micro-électronique commencent avec une plaquette ronde épaisse comme un cheveu, large de 25 millimètres ; et tout va sortir de là. Cette plaquette est du silicium, un des éléments les plus répandus sur la terre. Ils utilisent toutes les lois de la physique, de la chimie et de la métallurgie pour exécuter sur cette plaquette plus de 100 opérations microscopiques, entre autres celle qui consiste à la briser en 400 morceaux tous identiques et assez petits pour passer dans le plus fin des tamis.

Chaque fragment mesure environ 0,9 sur 1 mm, et pourtant, c'est un circuit électronique complet.

La mise au point des circuits micro-électroniques est un bond en avant qu'il faut ajouter à tous ceux qui ont suivi l'invention du transistor. Déjà un fabricant, General Electric, a lancé un poste de radio portatif et rechargeable qui comprend un de ces circuits. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, la taille de l'appareil n'en est pas tellement diminuée ; cela vient de ce que les haut-parleurs et d'autres composants ne peuvent pas encore être miniaturisés.

LE CHAS D'UNE AIGUILLE est assez grand pour laisser passer tout un microcircuit ; il reste de l'espace pour plusieurs autres.





VUE MICROSCOPIQUE DES POINTES VERIFICATRICES ; les circuits défectueux seront éliminés.

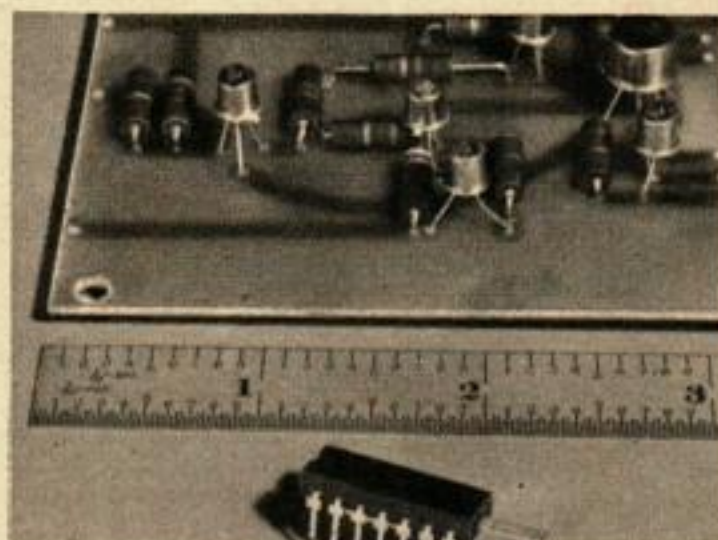


UN PLATEAU DE PLAQUETTES DE SILICIUM est glissé dans le four, dans l'usine des microcircuits de la General Electric. C'est là que se forme la couche d'oxyde. Durant ces premières phases de la fabrication, on manipule un grand nombre de plaquettes à la fois ; ensuite on les sépare pour les opérations de gravure et de dopage.

Mais le microcircuit offre bien des avantages. Le plus important est la fiabilité ; elle est augmentée surtout par l'élimination de toute soudure, un des points faibles des circuits. La distorsion en basse fréquence est plus réduite ; auparavant on ne pouvait jamais adapter exactement les transistors ; tandis que deux microcircuits tirés de la même plaquette de silicium sont exactement semblables. On espère aussi diminuer la distorsion causée par les excès de température, quand par exemple vous êtes sur la plage en plein soleil, ou dans la neige en plein hiver. La consommation sera plus faible, les piles dureront plus longtemps, et finalement, le prix de revient sera plus réduit.

L'Oncle Sam utilise déjà les microcircuits dans les programmes aérospatiaux. Ils ont fait leurs preuves dans les calculateurs des projets Gemini et dans les vols vers Mars et Vénus. Jusqu'à présent on a enregistré des échecs avec les circuits habituels parce que même si chaque composant est extrêmement sûr, leur grand nombre multiplie les chances défavorables. Ici un unique circuit pratiquement parfait remplace une série de composants distincts. Et l'on gagne encore sur la taille et le poids.

En même temps, dans le domaine du grand public, la recherche et les études de marché sont poussées activement. Dans quelque temps peut-être, le client moyen pourra se payer une machine à calculer pas chère, très solide et pas plus grande qu'un paquet de



LE CIRCUIT TERMINE est inclus dans du plastique siliconé ; les fils de connexion dépassent ; à droite, on voit le radiateur ; derrière, un circuit normal équivalent.



LA PREMIERE UTILISATION est cette pendulette radio de la GE. Tout l'amplificateur tient sur un module que l'on peut enlever.

cigarettes. Actuellement, on ne peut pas aller très loin, car il faut bien faire une sorte de clavier pour manipuler la machine ; mais un beau jour il suffira sans doute de parler devant.

« Composition subtile de science, d'art et de technique » c'est ainsi que les ingénieurs décrivent les microcircuits. Voici un processus typique, celui de la General Electric. Les jonctions de semiconducteurs qui constituent le transistor amplificateur sont créés en introduisant des impuretés dans le morceau de silicium suivant un dessin prédéterminé. Les impuretés forment les zones de diffusion que l'on peut voir sur le dessin en coupe. Ces impuretés, ou agents de dopage, sont du bore, de l'arsenic, du phosphore. Il est amusant de remarquer que ces soi-disant impuretés sont pures à 99,999 pour cent. Les zones de diffusion sont encore du silicium, mais sa structure cristalline a été modifiée.

Le réseau des agents de dopage est reporté par des méthodes photographiques de haute précision. Pour commencer, on forme une couche d'oxyde de silicium en cuisant la plaquette dans un four à 900-1 200°. On dépose rapidement une pellicule plastique sensible à la lumière mais inattaquable aux acides, épaisse seulement de 25 microns. Le réseau est imprimé sur cette pellicule à partir d'un négatif très précis, appelé masque ; on expose à la lumière ultraviolette qui polymérise et durcit le plastique. Le développement se fait avec du trichloréthylène qui dissout le plastique non durci.

On passe une solution contenant de l'acide fluorhydrique et de l'acide nitrique ; elle ronge la couche d'oxyde partout où le plastique a été enlevé. Cette solution d'acide est calculée pour dissoudre la couche d'oxyde mais sans toucher au silicium sous-jacent.

Alors la plaquette est prête pour la diffusion des agents dopants, là où l'acide a enlevé l'oxyde. Remarquez que le masque d'oxyde de silicium est capable de résister aux températures élevées mises en jeu pour la diffusion. Ce procédé du masque est assez précis pour travailler sur des largeurs de 2,5 microns.

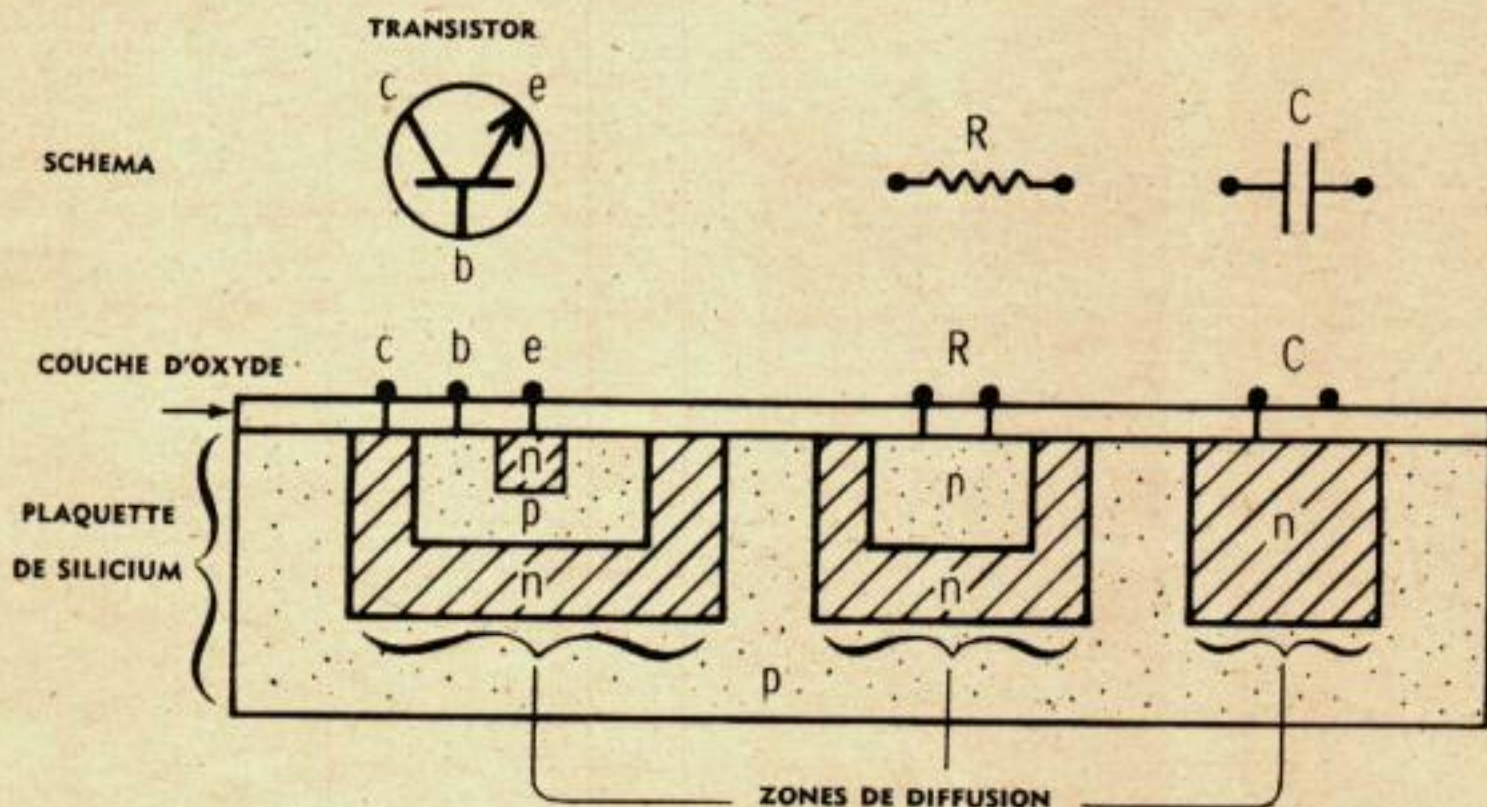
Un microcircuit de radio demande jusqu'à huit impressions photographiques successives, une pour chaque opération de diffusion, pour la formation des résistances, des connexions, etc.

Mesures lilliputiennes

Les tolérances du masquage et de la fabrication sont si étroites que les techniciens ne parlent pas en centimètres mais en microns. On sait que le micron est le millième de millimètre.

Pour rester dans des tolérances de l'ordre du micron, comme on le voit couramment à la General Electric, on comprend qu'il faille une propreté absolue, des conditions d'humidité et de température absolument fixes. Tout le personnel de la salle porte des blouses de nylon ou de dacron, ainsi que des bonnets ; des doigts de caoutchouc pour éviter aux

(Suite page 112)



VUE EN COUPE D'UN MICROMODULE : on voit les trois sortes de composants, transistor, résistance et condensateur, réalisées par diffusion. La plaquette primitive peut être du silicium de type p ou n ; ces lettres désignent la structure atomique du cristal. Des couches p et n sont diffusées successivement dans le cristal pour former les éléments du circuit. La couche d'oxyde supporte le circuit imprimé et sert de diélectrique pour le condensateur. Les connexions entre les éléments et la surface passent à travers l'oxyde. Les deux fils de la résistance aboutissent à une zone p, car c'est elle qui résiste.

dira qu'elle mesure 2 000 Angströms, plutôt que 0,2 micron.

Les circuits défectueux, à cause, peut-être, d'un trou d'épingle invisible, qui produit un court-circuit ou un mauvais contact, ne peuvent échapper à la machine vérificatrice automatique. Elle travaille en chambre noire, puisque les jonctions au silicium sont sensibles à la lumière ; elle vérifie automatiquement chaque circuit de la plaquette par une série d'aiguilles au carbure de silicium dont la pointe est plus fine que n'importe quelle aiguille à repriser. D'un seul coup, elle pique plus de 20 contacts sur les connexions d'aluminium du circuit, et ceci cinq fois par seconde.

Si un circuit est défectueux, un électro-aimant fait descendre un plongeur à encre magnétique qui fait une marque.

Disons en passant que le prix de fabrication de la plaquette, pour les stades où elle est entière, ne représente que le quart du prix total.

Dans les premières phases, en effet, on peut manipuler de 20 à 100 plaquettes à la fois, les faire passer dans les fours à diffusion et à d'autres opérations. Mais ensuite, des diamants tracent des lignes qui se croisent sur la plaquette et on la brise en plusieurs centaines de fragments qui sont les circuits individuels. A partir de ce stade, l'automatisation est en grande partie remplacée par la main-d'œuvre spécialisée, et les prix s'élèvent.

Pareils à une sorte de poussière de charbon brillante, les fragments se répandent sur une courroie transporteuse qui les amène sous une rangée d'aimants. La plupart des mauvaises pièces, marquées à l'encre magnétique, sont éliminées au cours de cette opération ; parfois, cependant, une y échappe. Un technicien, regardant dans un microscope, promène parmi les fragments une sonde magnétique, cherchant parmi des centaines d'autres la pièce défectueuse qui voudrait passer.

Puis, on soude à la main le circuit à un radiateur de cuivre et on soude aussi des fils d'or de 10 à 50 microns sur les bornes qui ne mesurent que 1/10 mm de côté. Ces fils d'or sont soudés à leur tour sur un cadre de cuivre et le circuit est moulé dans un plastique dense aux silicones, sous une pression de 29 kg/cm². Enfin, il subit une dernière épreuve de bon fonctionnement. A la General Electric, sur les 126 opérations diverses que le microcircuit doit subir, il y en a le quart qui sont des vérifications.

Pour l'instant, les microcircuits sont encore plus chers que les circuits classiques à transistors, mais les fabricants travaillent dur pour faire baisser les prix. Un moyen pour y arriver serait de remplacer la main-d'œuvre spécialisée par des machines fortement automatisées ; mais, cela est évident, n'importe qui y aurait pensé. Les véritables moyens de réduire les prix, c'est dans les laboratoires de recherche qu'on les trouvera, là où des savants sont armés de microscopes, mais surtout d'une imagination toujours fertile.

La micro-électronique au microscope

(Suite de la page 83)

plaquelettes le contact de la peau qui contaminerait tout. Des précipitateurs électrostatiques filtrent toute poussière plus grosse que 3 microns. La pression est maintenue un peu au-dessus de la pression atmosphérique, si bien que les poussières ne rentrent pas quand on ouvre la porte. Mais ce n'est pas encore assez. Les masques sont alignés sous des hottes munies d'autres filtres à air. Comme les mains humaines sont trop sales et trop maladroites pour ces pièces délicates, ce sont des manipulateurs mécaniques qui ne tremblent pas et des suçoirs d'acier inoxydable et de plastique qui déplacent les plaquettes d'un masque à l'autre. Une fois couvertes de la couche photo-sensible, elles ne doivent plus voir la lumière ultraviolette ; aussi la salle est remplie d'une féérique lumière dorée.

Les diverses fonctions du circuit sont diffusées dans la plaquette par couches et forment un réseau tridimensionnel. Pour les questions d'épaisseur, il nous faut encore changer notre échelle de mesures ; de la couche d'oxyde de silicium, par exemple, on