

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 26

Artikel: Revue et discussion des techniques nouvelles pour l'électronique microminiaturisée

Autor: Hübner, K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916800>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Revue et discussion des techniques nouvelles pour l'électronique microminiaturisée

Conférence, donnée à la 23^e Journée Suisse de la technique des télécommunications, le 8 septembre 1964 à Zurich,

par K. Hübner, Neuchâtel

621.38-181.4

Après une courte introduction qui touche aussi la question des self-inductions dans la microélectronique, on discute des matières premières susceptibles d'être utilisées pour une électronique microminiaturisée, comme par exemple le silicium, le tantal et le sulfide de cadmium. Puis vient une revue des techniques établies industriellement qui sont vraiment de nature microélectronique. Il s'agit des méthodes des circuits intégrés (monoblocs) et hybrides (chip approach) et des couches minces (thin films). On examine ensuite quelques critères conduisant au choix d'une de ces techniques, telles que la gamme des valeurs possibles, la fonction prévue, la nature du marché, les considérations économiques et la fiabilité. Là on trouve par exemple que la gamme des valeurs pour des résistances et des condensateurs est grande pour les couches minces et restreinte pour les circuits intégrés. Quelques aspects technologiques de la microélectronique sont ensuite détaillés, comme l'application de la photographie pour le contrôle des dimensions réduites à quelques microns et la thermo-compression pour attacher des fils de contact de l'ordre de 15 microns sur ces éléments minuscules. Suit une présentation des perspectives d'avenir offertes par des éléments basés sur de nouveaux principes comme deux types de transistors à champs et le transistor à base métallique. Les améliorations désirables des techniques existantes sont aussi examinées. Quelques remarques sur la complexité technologique de la microélectronique concluent l'exposé.

1. Introduction

Le sujet choisi est par nécessité très vaste, et il faut se restreindre à une revue générale d'une manière plutôt qualitative que quantitative. De plus l'accent est mis sur la technologie plutôt que sur l'application.

Il existe déjà plusieurs revues excellentes, surtout dans les périodiques électroniques américains, traitant de ces nouvelles techniques. Les références en montrent quelques-unes en langue française, ainsi qu'une revue approfondie en anglais sous forme d'un livre.

L'électronique conventionnelle dispose de condensateurs, de résistances, d'éléments actifs tels que les transistors/diodes et de selfinductions. Jusqu'à présent la microélectronique n'a pas trouvé de technique nouvelle pour réaliser une self vraiment microminiaturisée. Elle a seulement construit les bobines plus petites en réduisant le diamètre du fil. C'est pourquoi les selfs sont complètement supprimées dans les grands systèmes microélectroniques tels que les machines à calculer modernes, ce qui pose naturellement des problèmes aux constructeurs. Quelquefois la solution la plus avantageuse pour une tâche spécifique, qui est souvent de nature électromécanique, semble nécessiter une bobine, comme on en trouve par exemple dans quelques montres électriques et électroniques. Dans l'exposé on ne discutera que des condensateurs, des résistances et des transistors ou diodes, et comme point de départ on examinera quelques matières premières.

2. Les matières premières

2.1 Matériaux classiques

Sur la fig. 1 sont indiquées, à titre représentatif, six matières premières pour chacun de ces composants. Le but de ce cliché est d'indiquer quels matériaux se prêtent à une microminiaturisation poussée. Les exemples 1 à 3 donnent les diélectriques, la matière résistante et les semiconducteurs (pour diodes seulement) plutôt classiques. Les condensateurs avec diélectrique de paraffine, air et mica, ainsi que les résis-

Die Mikroelektronik hat die physische Verkleinerung elektronischer Schaltkreise zum Ziel. Die beiden wichtigsten industriell angewandten Techniken liefern die diffundierten Festkörperschaltkreise und die Dünnschichtschaltungen. Durch mehrfaches Aufdampfen oder Kathodenzerstäuben von gut leitenden Metallen (z. B. Gold, Aluminium), schlechter leitenden Metallen (z. B. Nichrome, Tantal) und Isolatoren (z. B. Siliziummonoxyd) auf isolierende Substrate erhält man die Kondensatoren und die Widerstände der Dünnschichtschaltungen. Diese müssen zur Zeit noch durch externe aktive Elemente (Transistoren, Dioden) ergänzt werden. Jede der angewandten Techniken hat ihre Vorteile und Nachteile. So eignen sich z. B. Festkörperschaltkreise speziell für logische Schaltungen usw. Für die Formgebung der oft nur wenige Mikrometer messenden Einzelemente bedient man sich photographischer Methoden. Das Hantieren dieser Kleinstteile erfolgt mit speziellen Mikromanipulatoren. Fragt man nach der Entwicklung in der nahen Zukunft, so muss man zwischen Verbesserungen der bestehenden Technik und Vervollkommenung neuer Elemente unterscheiden. Auf den Advent von neuartigen Feldeffekttransistoren und des Metallbasistransistors für hohe Frequenzen kann ebenfalls gezählt werden. Zum Schluss sei noch vermerkt, dass die Mikroelektronik fast sämtliche Zweige der Naturwissenschaften vereinigt, wie es in diesem Masse selten für ein Spezialgebiet der Fall ist.

tances de charbon et de carbure de silicium sont bien connus. Des mélanges de molybdène, argent et palladium dans une matière porteuse isolante et vitrifiante sont employés comme résistances dans la technique des circuits imprimés par sériographie sur des plaques de céramique. La sériographie cependant ne permet qu'un pouvoir de résolution limité, et par conséquent on ne la considère pas ici comme vraie technique microélectronique. D'autres considérations la rendent néanmoins attrayante, comme le montre l'emploi de cette technique dans la série la plus récente des calculatrices IBM.

Les semiconducteurs sélénium et monoxyde de cuivre sont bien connus comme premiers redresseurs de corps solide, tandis que le sulfure de plomb est le pionnier qui était utilisé comme diode à point dans les premiers détecteurs de radio.

2.2 Matériaux pour la microélectronique

Les exemples 4 à 6 de la fig. 1 indiquent avant tout les matériaux qui sont aussi utilisés pour les applications microminiaturisées. Les éléments de base qui sont surtout intéressants sont ceux qui permettent la réalisation des trois composants: condensateurs, résistances et transistors/diodes,

33'461-689
CONDENSATEUR RÉSISTANCE TRANSISTOR
DIODE

1. Paraffine	C	Se
2. Air	SiC	CuO
3. Mica	Mo, Ag, Pd	PbS
4. SiO_2	Si	Si
5. Ta_2O_5	Ta	Ge
6. SiO	Ni - Cr	CdS

Fig. 1

Quelques matières premières pour l'électronique

Les exemples 1 à 3 sont plutôt classiques, tandis que ceux de 4 à 6 se prêtent plus facilement à une microminiaturisation

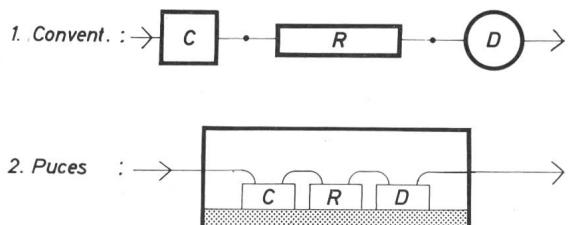


Fig. 2

Possibilités d'un circuit en série d'une capacité (C), d'une résistance (R) et d'une diode (D) avec éléments individuels en silicium.

comme cela est possible par exemple avec le silicium. Une oxydation du Si donne le SiO_2 , le quartz, qui est un bon diélectrique. De plus le matériel peut être dopé pour donner toute une gamme de résistivités, et finalement le Si permet de réaliser aussi des transistors et des diodes. Cet élément est donc idéal pour une technologie homogène. Le tantal, par contre, peut servir de base commune pour des résistances et des condensateurs. Son oxyde, Ta_2O_5 , est aussi un bon diélectrique. La combinaison 6 offre l'avantage que tous ces matériaux peuvent être évaporés relativement facilement, ce qui promet la réalisation de circuits entièrement évaporés. On reviendra à cette possibilité à la fin de l'exposé et on passe maintenant à la revue des techniques microélectroniques qui sont actuellement exploitées industriellement.

3. Les techniques établies

3.1 Circuit avec éléments individuels

Pour des raisons d'illustration on a choisi le cas d'un condensateur, d'une résistance et d'une diode en série, comme le montre la fig. 2, première ligne, avec des composants conventionnels C, R et D (diode). Grâce à la technologie homogène possible avec le silicium, on peut fabriquer le C, le R et le D sous forme de puces minuscules de silicium diffusé. Ces puces peuvent être montées et contactées pour former un circuit complet, sans être encapsulées individuellement. C'est seulement après la formation d'un circuit que l'on met le tout dans une capsule, comme le montre la fig. 2 en bas.

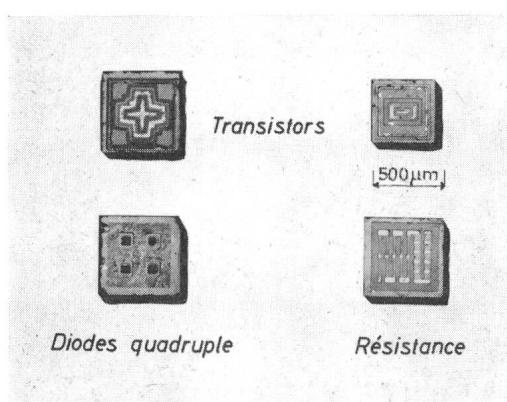


Fig. 3

Quelques exemples d'éléments diffusés dans le silicium (Motorola)

Cette technique est une extension directe et sans aspects nouveaux de la méthode de fabrication des transistors planar au silicium. La fig. 3 montre quelques puces fabriquées par la maison Motorola.

La fig. 4 est une photographie d'un tel circuit de puces. Il montre un diviseur de fréquence analogique comprenant

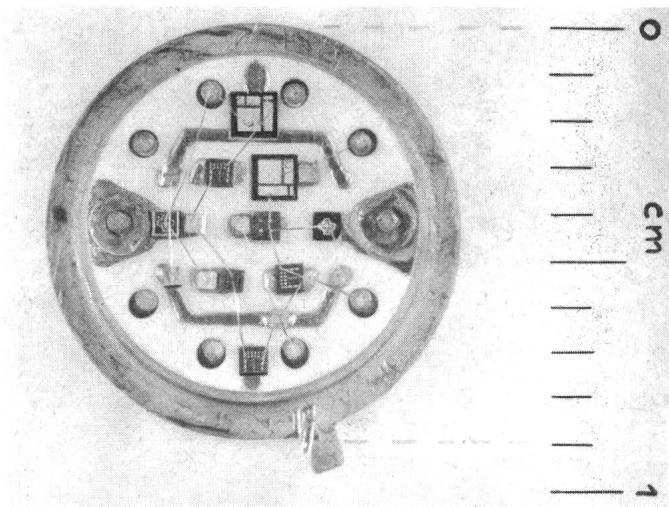


Fig. 4

Exemple d'un circuit selon la technique des «puces»

9 composants individuels ou puces. Des fils d'or de 18 μm d'épaisseur établissent les connections électriques et le tout est monté sur une plaque de céramique métallisée sélectivement et encapsulé dans une boîte de transistor type TO-5. La fig. 5 explique le schéma de ce circuit. Il s'agit d'un circuit d'entrée, d'un condensateur qui permet l'intégration de

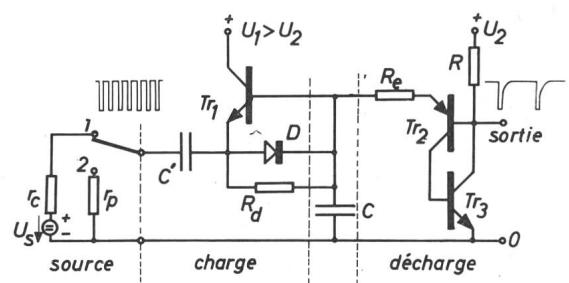


Fig. 5

Schéma du circuit des fig. 4 et 6

Il s'agit d'un diviseur de fréquence analogique

la charge et d'un circuit de décharge. La fig. 6 montre encore une fois la réalisation de ce circuit avant et après la mise en place du capot. Comme tous les composants utilisés sont obtenus par les mêmes procédés de diffusion dans le même élément, le silicium, il est logique d'essayer de les fabriquer

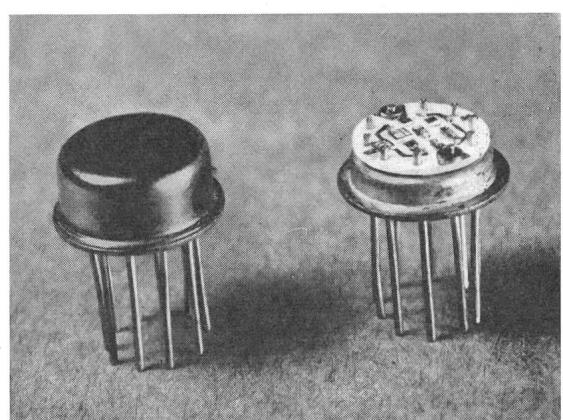


Fig. 6

Le diviseur de fréquence avant et après la mise en place du capot TO-5

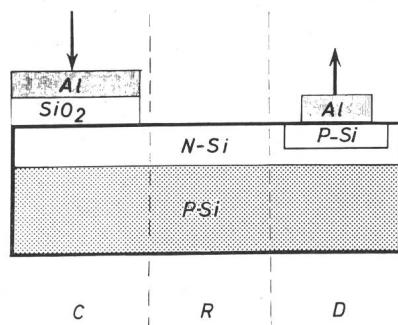


Fig. 7

Schéma simplifié d'un circuit monobloc ou intégré
(Explications voir fig. 2)

dans le même bloc de matériel et de ne pas les couper en pièces séparées. On arrive ainsi de la technique des puces (chip approach) à celle des monoblocs (integrated circuits) comme le montre la fig. 7.

3.2 Circuit monobloc

Le trait large est le contour d'un bloc de silicium type P, dans lequel on a diffusé à haute température une impureté spécifique, comme le phosphore par exemple, ce qui crée une couche du type N. La jonction PN est utilisée comme isolation électrique de la couche diffusée du reste du silicium. Les questions d'isolation dans les circuits monoblocs seront reprises plus bas. Une telle couche diffusée a normalement une épaisseur de quelques μm et une résistance de l'ordre de 100Ω par carré. Dans le circuit C-R-D elle joue le rôle de résistance, de contre-électrode de la capacité, et du côté N de la diode PN. Le condensateur à gauche est formé en plus par une couche diélectrique de quartz que l'on obtient par oxydation du silicium et d'une couche évaporée d'aluminium. Pour la réalisation de la diode à la droite de la fig. 7 on diffuse encore une région P. Une couche d'aluminium

forme aussi le contact. Voilà donc tout le circuit de série C-R-D réalisé dans un bloc solide de silicium, aussi appelé circuit intégré. L'exemple pratique figurant sur la fig. 8 est un «gate» selon la technique «Diode Transistor Logic» et mesure $0,8 \times 0,8 \text{ mm}$. Ce circuit contient 4 transistors, 10 diodes et 6 résistances. L'aluminium évaporé ne sert pas seulement à la formation des contacts comme dans notre circuit simple, mais aussi à l'établissement des connections entre les composants dans le même bloc de silicium. Les îles carrées autour du circuit actuel servent à attacher des fils de contact.

3.3 Les couches minces

La troisième technique utilisée industriellement est celle des couches minces. Elle est illustrée à l'aide du simple circuit C-R-D dans la fig. 9. Le bloc pointillé est un substratum isolant comme le verre, le quartz ou la céramique. La résistance est formée soit par une couche évaporée de nichrome, soit par une couche de tantalum pur ou dopé, obtenue par décomposition cathodique. Cette couche forme en même temps une des électrodes du condensateur à gauche. Le diélectrique est soit une couche évaporée de monoxyde de

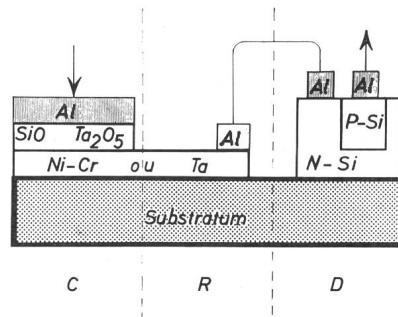


Fig. 9

Schéma simplifié d'un circuit selon la technique des couches minces
(Explications voir fig. 2)

silicium, soit une couche de pentoxyde de tantalum formé sur la couche de tantalum par oxydation anodique. La deuxième contre-électrode du condensateur, ainsi que le contact de la résistance, consistent en une couche évaporée d'aluminium. On emploie aussi souvent de l'or dans ce but. Comme les éléments actifs (transistors et diodes) fabriqués selon la technique des couches minces en sont encore au stade de recherches en laboratoire, on emploie en général des puces diffusées pour ces éléments, comme cela est démontré à droite dans la fig. 9. La diode est placée sur le substratum sous forme de puce et les contacts électriques sont exécutés avec des fils minces selon la technique des puces décrite ci-dessus. La fig. 10 est une photographie d'un tel circuit sur la base de tantalum, avant la mise en place des transistors et des diodes. Il est déposé sur une plaque de quartz mesurant $16 \times 19 \text{ mm}$. Les traces fines sont les résistances, les rectangles avec les barres perpendiculaires sont les condensateurs, et le reste les interconnexions et les surfaces pour attacher les éléments actifs et les contacts extérieurs. Les rectangles de tantalum pour former les condensateurs ont été liés électriquement entre eux pour permettre la formation de l'oxyde diélectrique par une anodisation dans un bain électrolytique. Après cette opération les connections entre les condensateurs ont été coupées comme on le voit sur la fig. 10.

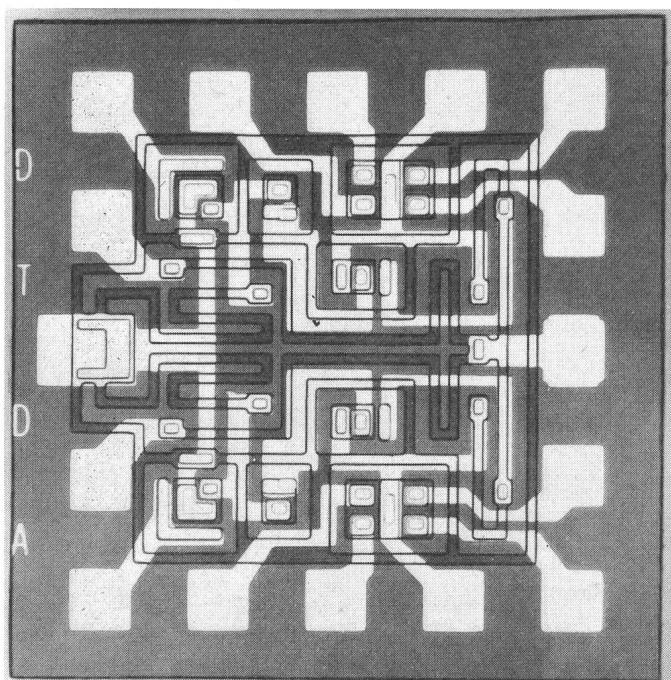


Fig. 8

Circuit monobloc (Fairchild)

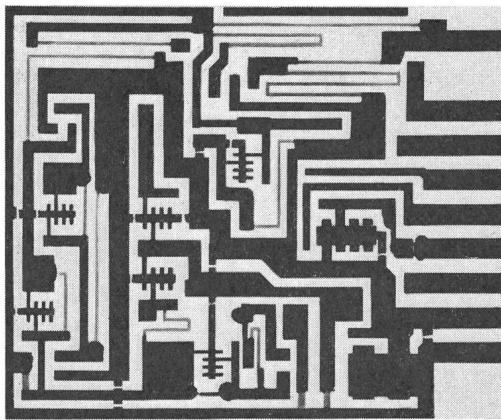


Fig. 10

Exemple d'un circuit réalisé par la technique de tantalum (Collins Radio)

3.4 Combinaison de deux techniques

La méthode des couches minces évaporées peut être combinée avec celle des monoblocs, comme le montre la fig. 11. Le condensateur est formé par un sandwich d'aluminium, de quartz et d'une couche diffusée dans un bloc de silicium. La diode est aussi obtenue avec la même technique que celle du monobloc. La résistance, par contre, est évaporée sur une couche isolante de quartz et consiste par exemple en du nichrome. Une telle réalisation est employée s'il est nécessaire.

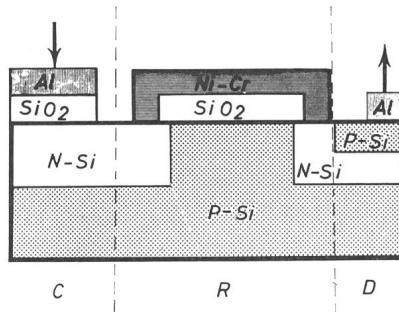


Fig. 11

Combinaison de la technique des couches minces avec celle des monoblocs (Explications voir fig. 2)

soit que le coefficient de température des résistances soit petit. Le schéma d'un amplificateur différentiel selon cette méthode est montré à la fig. 12, et sa réalisation à la fig. 13. Les dimensions en sont $0,8 \cdot 0,8$ mm. Les serpents symétriques sont ces résistances évaporées sur un bloc de silicium qui, autrement est réellement un circuit monobloc.

Voilà donc les techniques qui ont atteint le stade de développement industriel: les puces (chip approach), les monoblocs (integrated circuit), les couches minces (thin films) pour condensateurs et résistances, et la combinaison des monoblocs avec des résistances sous forme de couche mince. Il

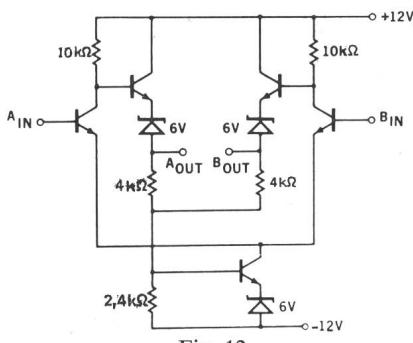


Fig. 12

Schéma de l'amplificateur différentiel montré à la fig. 13 (Fairchild)

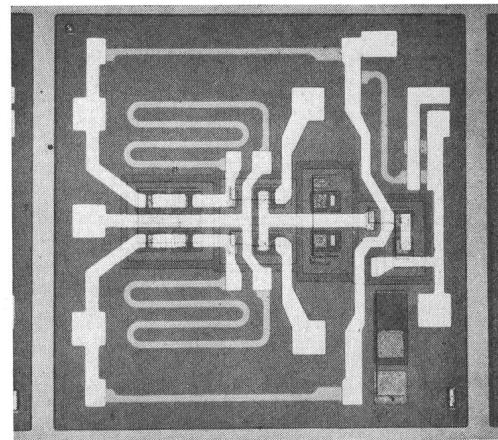


Fig. 13

Amplificateur différentiel utilisant des résistances évaporées sur une structure monobloc (Fairchild)

faut souligner ici qu'en décrivant ces techniques différentes on a seulement indiqué la structure de base, en éliminant beaucoup de détails.

4. Quelques critères conduisant au choix d'une technique spécifique

Avec tant de techniques différentes le problème du choix se pose aux constructeurs. Toutes ces techniques ne sont que des outils, et le constructeur doit en choisir une pour réaliser son système, soit montre, soit appareil, etc. On va maintenant passer en revue quelques critères qui permettent d'arriver au choix d'une de ces techniques pour une tâche spécifique.

4.1 Gamme des valeurs possibles

La gamme des valeurs possibles de condensateurs et résistances n'est pas la même pour les techniques différentes, comme le montre la fig. 14. Les valeurs maximum pratiques pour des condensateurs et des résistances diffusées dans le silicium sont de l'ordre de 500 pF et 40 kΩ. Par contre, les éléments conventionnels et les composants de couches minces offrent une gamme plus grande.

4.2 Fonction du circuit

La fonction prévue pour le circuit entre aussi en considération pour le choix d'une technique. La fig. 15 donne trois exemples d'application. Le circuit linéaire, un amplificateur par exemple, exige en général une précision des composants qui n'est pas nécessaire pour le circuit logique, un flip-flop par exemple. Les valeurs des éléments de couches minces peuvent être soit mesurées pendant la fabrication, soit ajustées par oxydation ou par d'autres traitements après leur

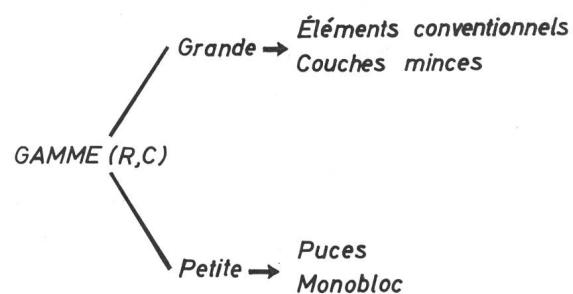


Fig. 14

Schéma indiquant que la gamme des valeurs possibles n'est pas la même pour les techniques différentes

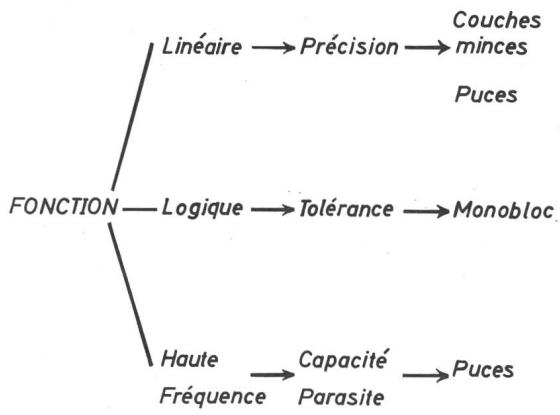


Fig. 15

Les exigences et les techniques les plus adaptables de trois fonctions spéciales

fabrication, ce qui permet d'obtenir une grande précision des valeurs désirées. Une mesure et une sélection des puces avant leur montage offrent aussi une précision des composants. Avec la technique des monoblocs, par contre, tous les éléments d'un circuit sont fabriqués d'un même coup ne laissant ainsi que peu de possibilités de corriger les déviations de leurs valeurs idéales.

Dans une application de haute fréquence, les capacités parasites des jonctions PN isolantes dans les monoblocs peuvent les empêcher de fonctionner convenablement. Un circuit avec des puces non seulement élimine cette objection, mais encore permet aussi, grâce à des connections très courtes entre les éléments, de minimiser l'effet de selfinduction parasite que l'on trouve souvent dans les circuits conventionnels.

4.3 Le marché

Il ne faut pas seulement rechercher la gamme des valeurs et la fonction prévue. Le marché sur lequel le produit terminé est vendu nécessite aussi de l'attention, comme le montre la fig. 16. Pour le marché militaire, les questions de poids/volume et fiabilité/performances sont plus importantes que le prix. Pour le marché industriel la considération de fiabilité/performances est immédiatement suivie du prix, tandis que le poids et le volume sont peu importants. Mais pour le marché des biens de consommation le prix est le facteur le plus important. Le placement des autres qualités dépend de la nature de l'appareil en question. L'importance des prix nous rappelle de ne pas oublier les aspects économiques que l'on va discuter avec l'aide de la fig. 17.

4.4 Aspects économiques

Si un circuit est réalisable par plusieurs techniques, la quantité prévue peut déjà déterminer la technique la plus

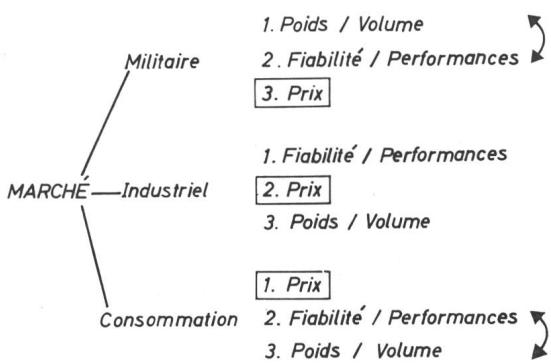


Fig. 16
Schéma et exigences des marchés

économique. Pour 10 circuits une réalisation par éléments conventionnels sera certainement meilleur marché que par monoblocs qui exigent un jeu de masques coûteux et beaucoup de travail de préparation. La technique des puces exige aussi une étude de l'arrangement des éléments et souvent une métallisation spéciale du substratum. A titre d'exemple ces préparations deviennent rentables à partir d'une quantité de 100 circuits pour les puces et de 1000 circuits pour les monoblocs.

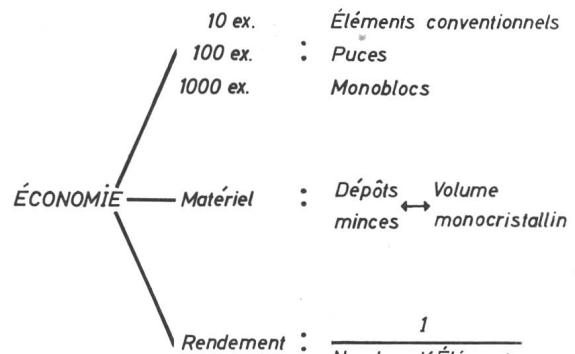


Fig. 17
Quelques aspects économiques

Dans une fabrication de masse automatisée les frais des matières premières sont importants. La quantité de matériel dans les couches minces est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle utilisée dans les monocristaux purs pour les éléments en silicium. Mais n'oublions pas le rendement de production qui est un facteur de toute première importance. Dans les circuits monoblocs et couches minces, le rendement est inversement proportionnel au nombre d'éléments fabriqués en même temps. Ce n'est pas un secret qu'à l'heure actuelle un rendement de 10 % pour beaucoup de types de circuits monoblocs est considéré comme exceptionnellement bon. Cette relation entre le rendement et le nombre d'éléments limite donc la complexité d'un circuit monobloc qui est encore économiquement tolérable. Le rendement de production est quelquefois lié à la fiabilité (ou sûreté de fonctionnement) qu'on va discuter comme prochain sujet.

4.5 La fiabilité

Les raisons du mauvais fonctionnement d'un circuit microélectronique après un certain temps peuvent être de nature mécanique, chimique ou physique, comme cela est indiqué sur la fig. 18. Un choc mécanique peut casser un fil d'or ou rompre l'étanchéité de la capsule. A haute température il se produit des réactions chimiques, par exemple entre l'or et l'aluminium. C'est le phénomène connu sous le nom de plaie pourpre, à cause de la couleur du produit de la réaction. De plus une rupture de l'étanchéité permet par exemple une adsorption de matériaux étrangers sur la surface du silicium qui altère la conductibilité près de la surface, changeant une couche P en une couche N. Une telle conversion se produit relativement facilement sur le silicium du type P. C'est pourquoi un transistor planar PNP est souvent plus cher qu'un NPN. Des effets de diffusion, soit à la surface, soit dans le volume, peuvent aussi perturber le fonctionnement d'un élément ou circuit microélectronique. Les instabilités thermiques doivent aussi être mentionnées ici. Elles sont responsables de ce qu'on appelle «second break-down» dans les transistors opérés à un niveau de puissance élevé.

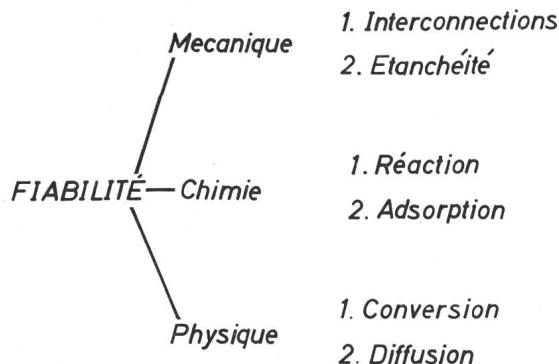


Fig. 18
Quelques mécanismes pouvant conduire à un défaut de fonctionnement

Finalement tous ces phénomènes influencent les performances électriques du circuit et peuvent conduire à un défaut de fonctionnement. Par conséquent il faut se rendre parfaitement compte des exigences quant aux effets de chocs et température, durée de vie, etc., et choisir la technique de base et les méthodes de montage, d'interconnections et d'encaissement selon ces besoins.

Il y a en outre une quantité d'autres critères. Le volume et la puissance minimale sont deux exemples très importants pour l'horlogerie.

La solution particulière avec des microblocs est certainement celle qui permet d'atteindre les plus petites dimensions, mais elle n'est souvent pas satisfaisante en ce qui concerne l'exigence de la faible consommation de puissance. On a déjà mentionné qu'il n'est pas encore possible de réaliser des résistances plus grandes de $40\text{ k}\Omega$ environ qui aient encore un coefficient de température et une capacité parasite acceptable par la technique des monoblocs. Par contre pour limiter la puissance d'un étage alimenté par 1 V à $1\text{ }\mu\text{W}$ il faut une résistance de $1\text{ M}\Omega$. Les capacités parasites influencent également la puissance consommée, car elles se chargent et se déchargent à chaque cycle, ce qui dissipe de la puissance. Même pour des éléments individuels c'est la capacité d'entrée de l'émetteur qui limite normalement la puissance minimale. Il ressort de cette brève discussion sur la question du volume et de la puissance minimale qu'il faut trouver le meilleur compromis pour chaque application.

Après cette revue des points importants pour le choix d'une technique spécifique, on discutera quelques domaines micromécaniques de la microélectronique. Les questions de diffusion et du procédé planar avec la technique du photoresist sont traitées en détail dans la première référence donnée. Elles sont aussi un des principaux sujets traités dans les articles sur la microélectronique dans plusieurs périodiques électroniques d'origine américaine. C'est pourquoi on les supprime pour éclaircir de plus près deux aspects spécifiques et pour jeter un coup d'œil sur l'avenir.

5. Quelques aspects microtechniques de la microélectronique

Pour donner une idée des dimensions typiques, on présente sur la fig. 19 une coupe d'un seul transistor planar, tel qu'il est utilisé dans la technique des puces et comme composant intégré dans les monoblocs. La puce typique mesure environ $500 \cdot 500 \cdot 200\text{ }\mu\text{m}$, mais seule une très petite fraction de ce volume est vraiment utilisée comme transistor.

Le reste ne sert que de support pour manipuler la plaquette de silicium pendant la fabrication et pour monter la puce. La région active ne mesure que $150 \cdot 150 \cdot 4\text{ }\mu\text{m}$. Notez la distortion dans le dessin de la région striée par rapport à l'épaisseur totale de la puce. Les contacts sont formés par des régions métallisées d'aluminium, sur lesquelles sont attachés des fils d'or d'un diamètre typique de $15\text{ }\mu\text{m}$. On revien-

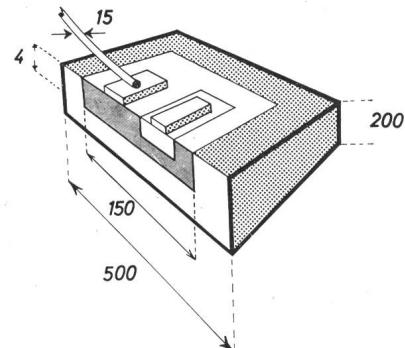


Fig. 19
Dimensions typiques en μm d'un transistor planar à faible puissance
La région active ne mesure que $150 \cdot 150 \cdot 4\text{ }\mu\text{m}$

dra à cette question plus tard. Les dimensions de toutes les régions diffusées et évaporées sont contrôlées par des techniques de photo-lithographie. Pour la réalisation d'un tel transistor ou d'un circuit monobloc, on utilise un jeu complémentaire de clichés photographiques de très haute précision, comme en montre un exemple la fig. 20. Ce masque photographique a été utilisé en conjonction avec la technique photo-lithographique pour obtenir une partie de la structure de l'aluminium évaporé sur la plaquette de silicium de la fig. 21. L'aluminium sert d'interconnection, contre-électrode et surface de contact pour un circuit monobloc. Les tolérances sont de l'ordre de un μm dans un circuit, ainsi que pour les distances entre eux. La précision en est déterminée par celle du masque photographique et par la résolution du photoresist.

Pour attacher les fils d'or d'un diamètre de $15\text{ }\mu\text{m}$, comme cela a été indiqué, on utilise la technique expliquée sur la

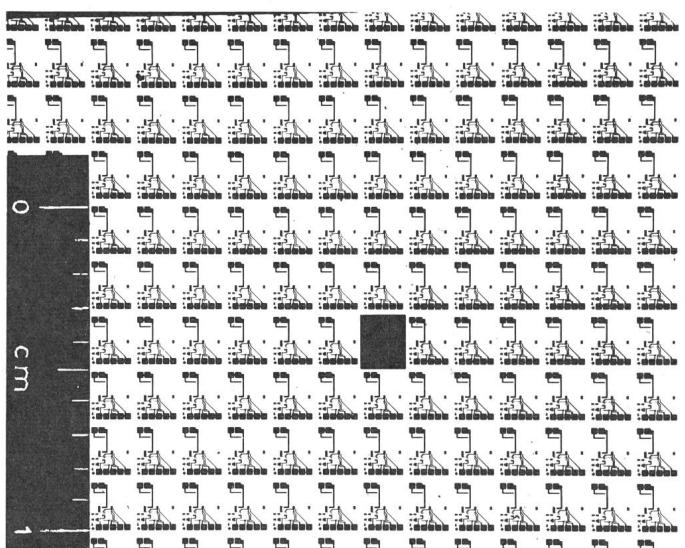


Fig. 20
Exemples d'un masque photographique
Pour la fabrication d'un transistor ou circuit monobloc il faut un jeu complémentaire de plusieurs masques

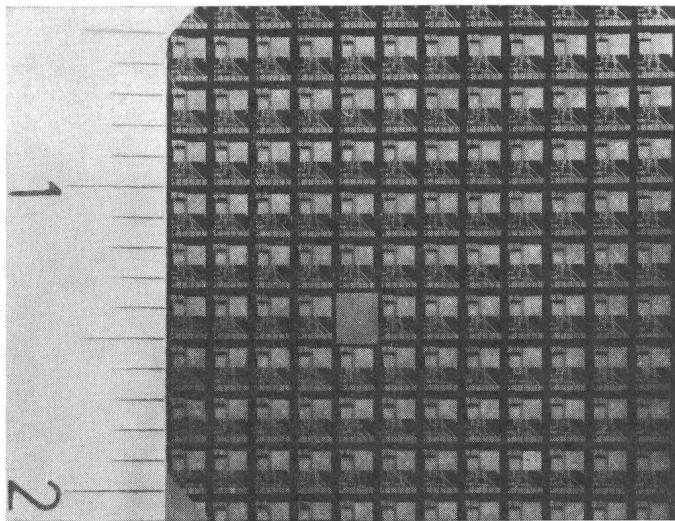


Fig. 21

Plaquette de silicium avec structure d'aluminium d'un circuit monobloc réalisé en partie avec le masque de la fig. 20

fig. 22. La puce, dont on ne voit maintenant qu'une petite région, est chauffée à 320 °C environ. Un jet d'azote la protège contre l'oxydation. Le fil d'or est manipulé en place par un capillaire, et avancé ou retiré pneumatiquement. Avec un ciseau on presse sur ce fil placé sur l'aluminium. Cela le déforme et le soude sur l'aluminium. Cette technique est appelée la thermocompression. Il existe plusieurs variations de cette méthode qui sont mieux adaptées pour une production, mais le principe reste le même. On en arrive maintenant au dernier point: Qu'apportera l'avenir dans le domaine de la microélectronique?

6. L'avenir de la microélectronique

Il est toujours très délicat de faire des spéculations sur l'avenir, surtout sur des sujets audacieux, comme par exemple les semiconducteurs organiques et l'électronique moléculaire. Néanmoins, à un niveau pratique et à relativement courte échéance, cela ne paraît pas trop difficile. On distingue les améliorations des techniques existantes et les éléments selon des principes nouveaux comme indiqué sur la fig. 23. Ces derniers comprennent entre autres surtout toute la famille des transistors à effet de champ. Les transistors à effet de champ diffusé au silicium sont déjà bien connus en tant qu'éléments individuels. Leurs avantages sont une haute impédance d'entrée et un bruit de fond très faible. Leur incorporation dans des microcircuits du type monobloc pose encore des problèmes. Cette figure décrit aussi divers éléments nouveaux qui se trouvent encore au stade de développement.

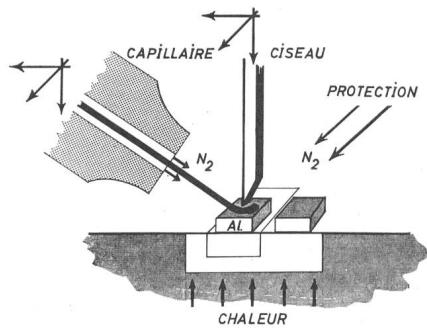


Fig. 22

Méthode de thermocompression pour attacher un fil d'or d'un diamètre de 15 μm sur une surface ne mesurant quelquefois que 25-40 μm

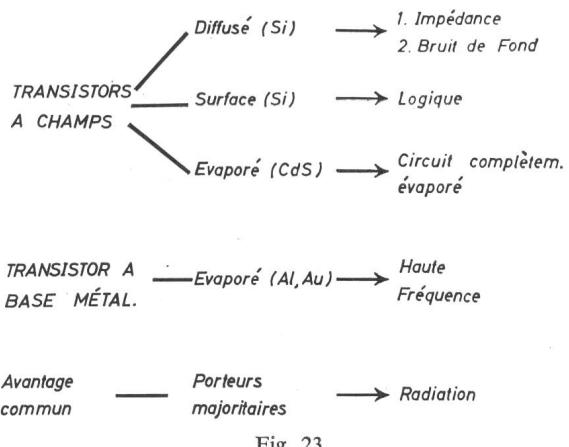


Fig. 23
Quelques éléments actifs nouveaux

nement. Le transistor à champ de surface du type métal-oxyde-silicium (MOS) offre la possibilité de fabriquer des circuits logiques simples sans résistances et capacités. La structure de cet élément est détaillée sur la fig. 24. Avec une tension appliquée au «gate» on peut moduler la conductibilité dans la couche d'inversion appelée «channel». Actuellement on utilise le même effet, souvent parasite, dans les transistors bipolaires PNP pour obtenir un nouvel élément actif. La fig. 25 donne le schéma de deux circuits logiques utilisant ces éléments et la fig. 26 montre la réalisation de ce double circuit fabriqué par RCA. Notez les brucelles en bas à droite qui tiennent la plaquette de céramique sur laquelle le circuit actuel est monté. Les questions de bruit de fond élevé et les difficultés d'obtenir des paires complémentaires ne sont pas encore résolues.

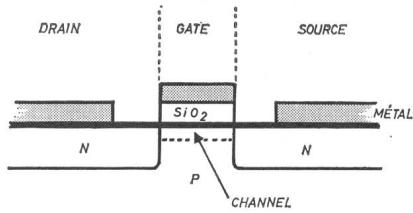


Fig. 24
La structure d'un transistor à effet de champ du type métal-oxyde-semiconducteur (MOS)

Un développement important est la mise au point d'un transistor entièrement évaporé sur la base du sulfide de cadmium. Avec des condensateurs et des résistances évaporées, cela permet la réalisation de circuits entièrement réalisés sous forme de couches minces.

Les progrès en direction d'un transistor à base métallique sont prometteurs. Un tel élément devrait être utilisable pour des fréquences plus hautes que celles des transistors bipolaires.

L'avantage commun de tous ces éléments est leur immunité relative aux radiations nucléaires comparée à celle des

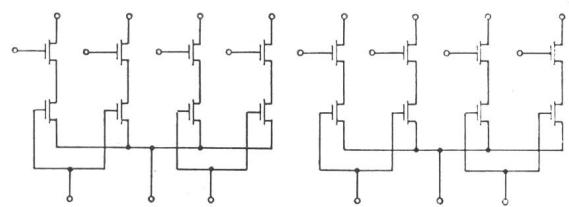


Fig. 25
Schéma d'un double circuit logique utilisant des transistors MOS

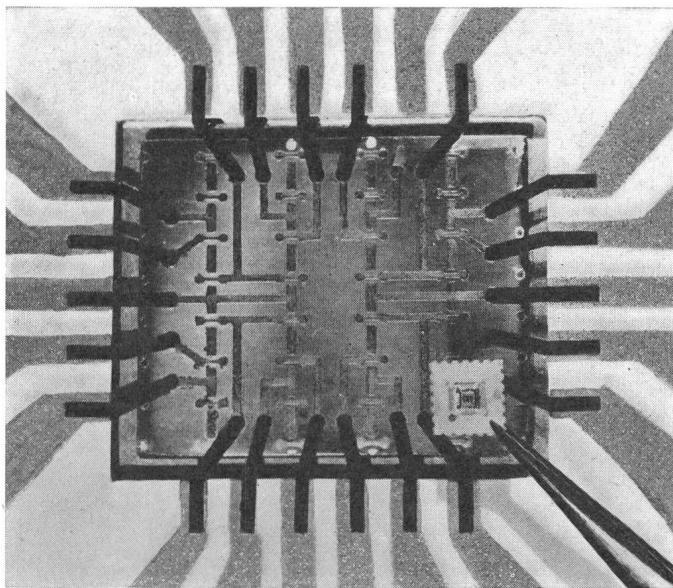


Fig. 26
Le circuit de la fig. 25 fabriqué avec des transistors à effet de champ du type MOS (RCA)

transistors bipolaires. La raison en est qu'ils sont tous des éléments à porteurs majoritaires.

AMÉLIORATIONS :

1. Isolation Circuit Monobloc
2. Contacts et Interconnections
3. Encapsulation et Surfaces
4. Réduction des Dimensions
5. Réduction de Puissance

Fig. 27
Exemples pour l'amélioration des techniques existantes

Les améliorations des techniques existantes à espérer sont indiquées sur la fig. 27. Une technique nouvelle qui permet de remplacer les jonctions PN isolantes dans les monoblocs par des couches de quartz est au stade expérimental. On revient tout de suite à cette question. La méthode d'interconnections avec des fils d'or de quelques microns est également peu satisfaisante. Les études d'encapsulation avec des matériaux organiques et des verres sont poussées, ainsi que les questions de passivation des surfaces. Pour des applications spéciales on peut aussi compter sur une réduction continue de dimension et de puissance. La fig. 28 explique en haut la méthode d'isolation par des jonctions PN dans les monoblocs actuels. A titre d'exemple la structure d'un transistor diffusé NPN est montrée à droite. Ces jonctions d'isolation ont le grand désavantage d'une capacité parasite non

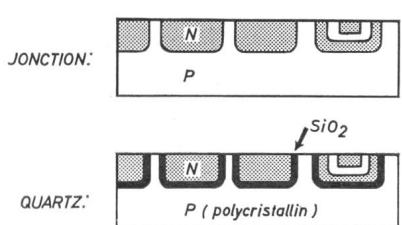


Fig. 28

Comparaison de la technique classique (en haut) avec une nouvelle technique pour l'isolation dans des circuits monoblocs

négligeable. Cela peut limiter la fréquence maximum utilisable et la puissance minimum possible. De plus les courants de fuite sont une fonction de la température, et par la proximité des jonctions il peut se produire des effets d'interactions électroniques comme dans une diode à quatre couches. Une nouvelle technique, encore au stade de laboratoire, arrive à la structure montrée en bas, où entre les régions N et P se trouve encore une couche de quartz. Les défauts mentionnés en haut en sont pratiquement éliminés.

7. Conclusions

On a présenté, de façon très générale, une revue et une discussion des techniques modernes de la microélectronique. On espère que cet exposé a aussi aidé à rectifier, si on ose dire, une fausse conception que l'on rencontre de temps en temps parmi les non-électroniciens: en termes très simplifiés il s'agit d'une certaine crainte que la microélectronique ipso facto soit déjà un système ou une machine qui va remplacer ce qui aujourd'hui est micromécanique ou électromécanique. La vérité est, que dans la gamme de basses fréquences, la microélectronique n'est qu'une technologie, complexe, pour réduire les dimensions d'un circuit classique. Mais c'est au constructeur qu'incombe entièrement la responsabilité de créer un système ou un appareil nouveau. La microélectronique l'aidera seulement à réduire les dimensions de son produit.

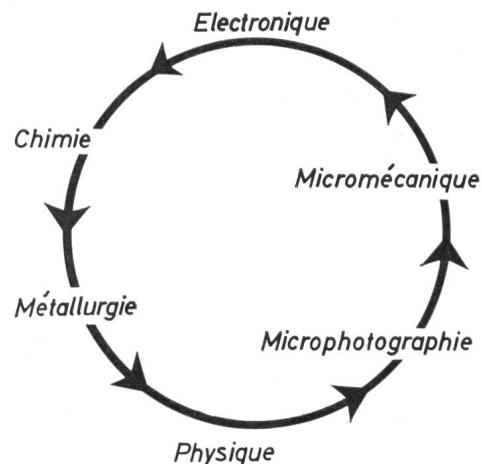


Fig. 29
Les domaines et arts différents contribuant à la réalisation d'un microcircuit

D'autre part, la multitude des problèmes évoqués justifie une certaine crainte. En effet, la microélectronique, par sa complexité, exige la synthèse de plusieurs domaines ou arts différents. Ceci est illustré par le schéma de la fig. 29. Seule une activité de surveillance et d'évaluation des derniers développements demande déjà une combinaison de ces talents, plus un bon jugement économique.

Bibliographie

- [1] A. Bobenrieth et S. Zoberman: Microminiaturisation et fiabilité. L'onde électrique 44(1964)443, p. 147...159.
- [2] Microminiaturisation et circuit imprimé. Edition spéciale de: L'onde électrique 42(1962)428.
- [3] Miniaturisation et Microminiaturisation. Edition spéciale de: La Suisse horlogère. Edition internationale en français. 77(1962)3.
- [4] E. Keonjian: Microelectronics. McGraw-Hill New York/Toronto/London 1963.

Adresse de l'auteur:

K. Hübner, Dr. sc. nat., Centre Electronique Horloger S. A., 2000 Neuchâtel.