Zeitschrift: Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen

Herausgeber: Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere

Band: 39 (1966)

Heft: 4

Artikel: Sciences et techniques : la microélectronique

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-562183

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. Siehe Rechtliche Hinweise.

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. Voir Informations légales.

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. See Legal notice.

Download PDF: 06.05.2025

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

621.38-181.4

Sciences et techniques: La Microélectronique

L'apparition du transistor, voici plus d'une décennie, bouleversait l'électronique. Mais, tout aussitôt, a commencé une évolution vers la miniaturisation, qui aboutit aujourd'hui à la micro-électronique.

Nous allons d'abord examiner les caractéristiques techniques de cette nouvelle phase de l'électronique, puis nous tenterons d'en dégager les conséquences économiques.

Un circuit électronique classique est constitué par un assemblage de composants (passifs: résistances, capacités, inductances, diodes; actifs: transistors) reliés par des fils soudés en vue de réaliser une fonction déterminée: amplification, bascule, etc.

Les grands ensembles électroniques, tels les calculateurs, utilisent des milliers de fonctions de ce genre. Les circuits sont bâtis sur des plaquettes empilées et interconnectées de façon ordonnée, pour pouvoir réaliser un échange standard facile en cas de défaillance de l'un des circuits.

Mais on a cherché aussi à réduire l'encombrement de ces plaquettes ou, ce qui revient au même, à réaliser des fonctions plus nombreuses sur la même surface. A cet effet on a utilisé d'une part toutes les ressources d'empilement ou d'association géométrique des composants sur la plaquette, d'autre part on a tenté de faire des connexions plus compactes par soudure électrique, dépôt sérigraphique, etc... On a abouti ainsi à des assemblages de forte densité (technique fagot, Cordwood, etc.). Parallèlement on a diminué la taille des composants en créant les séries «miniature».

Mais cette étape n'est pas encore pleinement satisfaisante car les composants restent discrets. L'étape suivante consiste évidemment à réaliser une intégration de ces éléments de telle manière qu'ils perdent leur individualité physique et que disparaissent les fils soudés qui constituaient les interconnexions.

On peut se demander alors le pourquoi de cette évolution. L'origine se trouve dans les faibles valeurs de volume, poids et consommation des circuits, imposées par les applications militaires et spatiales. Il est bien évident qu'un système électronique destiné à être logé dans une fusée doit répondre au mieux à ces impératifs. Ce qui explique que la microélectronique ait vu le jour, bien qu'elle fût à l'origine excessivement coûteuse.

Mais d'autres avantages apparaissent alors: les microcircuits possèdent une fiabilité accrue (en particulier une tenue remarquable aux chocs et accélérations), ainsi qu'une plus grande rapidité de fonctionnement. La première de ces propriétés résulte surtout du remplacement des interconnexions classiques entre composants, qui s'effectuaient au moyen de fils et de soudures souvent défaillantes, par des câblages pris «dans la masse» du matériau. La seconde provient du fait que les éléments étant contigus, le signal se propage plus rapidement. En outre, des procédés de fabrication en série sont possibles. Bref, les prix ont baissé de façon telle qu'actuellement les microcircuits commencent à concurrencer sérieusement les montages classiques dans de nombreux domaines.

Quelles sont donc les techniques utilisées?

On rassemble sous le nom de microélectronique trois procédés:

— la technique des couches minces qui n'existe intégralement qu'en laboratoire,
— la technique des circuits intégrés à semi-conducteurs dite monolithique,
— enfin la technique dite hybride ou «semi-intégrée» qui est une combinaison des deux premières. Elle n'est pas véritablement intégrée car les éléments actifs sont discrets et rapportés sur le film mince par soudure.

Notons, qu'à présent, seules les deux dernières techniques sont commercialisées. Leurs produits se nomment microcircuits. Examinons-les toutes cependant, tour à tour.

La technique des couches minces

On dépose sous vide par des procédés divers (évaporation, pulvérisation) des couches de 50 à 1000 Å sur un substrat de verre ou de céramique. Les dépôts sont convenablement disposés dans le plan et aussi superposés pour obtenir le comportement électrique désiré. Telle partie de la surface traitée a donc un rôle résistif, telle autre un rôle capacitif, etc.

Rappelons ici que les dimensions d'un atome sont de l'ordre de l'Angström (1 Å = 10^{-10} m); celles de la molécule de quelques Angströms. Les couches que nous envisageons ici sont dites moléculaires: leur épaisseur est de l'ordre d'une certaine de molécules.

Il nous faut insister aussi sur la grande variété des propriétés que peuvent présenter ces couches suivant la nature du dépôt: elles peuvent être conductrices, résistantes, capacitives, actives, magnétiques, supraconductrices, électroluminescentes ou photoémissives. On conçoit donc bien la vaste gamme d'applications de ce procédé.

Par exemple on réalise des résistances de 100 à 500 Ω au moyen de Ni-Cr, jusqu'à 5000 Ω au moyen de TaN, jusqu'à 10 000 Ω au moyen de Cr-Si02, etc.

Cependant, à l'heure actuelle, si l'on sait bien réaliser les éléments passifs en couches minces, les éléments actifs n'en sont, par ce procédé, qu'au stade du laboratoire. Par suite, il apparaît que, dans les années prochaines, ce sont surtout les techniques que nous allons exposer ci-après qui seront utilisées. Il est néanmoins raisonnable de penser que les couches minces pourront les supplanter lorsque les difficultés actuelles seront résolues.

La technique des circuits intègres à semi-conducteurs, dite «monolithique»

On découpe une fine tranche d'un barreau de silicium très pur (moins d'un milligramme d'impureté par tonne de silicium) et de structure cristalline particulièrement uniforme.

On diffuse des «impuretés» convenables sur certaines parties délimitées par des caches. Le processus est répété jusqu'à ce qu'aient été diffusées toutes les couches nécessaires à la réalisation des paramètres du circuit. Remarquons que les fonctions électroniques seront ainsi assurées par la variation des propriétés électriques à l'intérieur même du silicium et non pas par le contact entre deux couches de natures différentes, ce qui était le système décrit précédemment.

Insistons donc sur le fait que le résultat obtenu justifie pleinement le nom de «monolithique». Il est rigoureusement impossible, même avec beaucoup d'imagination, de reconnaître à telle partie le rôle de résistance, à telle autre celui de capacité, etc.

Les connexions sont posées en des points repérés par des fenêtres dans le matériau. Elles sont destinées à relier le

sous-ensemble que constitue le circuit, à d'autres sous-ensembles.
Il est à noter que dans les transistors, la partie «active» est obtenue par une diffusion du même genre que celle indiquée ci-dessus. Il s'agit toujours de diffusion de quantités «moléculaires» d'un corps pur dans un substrat de silicium; mais les zones actives ainsi obtenues, qui ont un volume de quelques microncubes (1 micron = 10^{-6} m), restent entourées d'une volumineuse enveloppe de matériau inactif. La technique monolithique utilise à plein ce matériau en lui faisant aussi jouer un rôle.
Il n'est donc pas étonnant que l'on réalise facilement les éléments actifs (transistors) par cette méthode. A l'inverse de ce qui se passait pour les couches minces, ce sont les éléments passifs que l'on a, ici, de la difficulté à réaliser. Mais ces difficultés sont assez facilement surmontables.

La technique hybride, dite «semi-intégrée»

Nous avons donc vu, en décrivant les techniques précédentes, que l'une permettait de réaliser facilement les éléments passifs, l'autre les éléments actifs. La technique hybride combine films minces et monolithiques: dans son stade actuel elle consiste à souder de simples transistors sur des films minces. Il est probable que l'on utilisera ultérieurement de véritables circuits monolithiques connectés à des films minces, réalisant ainsi un mariage des deux techniques dans toute leur complexité.
Par rapport au procédé monolithique, la technique hybride possède alors les avantages suivants:
— plus grande souplesse de conception, surtout en ce qui concerne les composants passifs,
— rapidité de fabrication accrue.
Mais il faut noter en revanche que le procédé monolithique permet une fabrication plus aisée en grande série. Les éléments actifs incorporés sont moins coûteux que lorsqu'ils sont rapportés.
Bref, les deux procédés sont actuellement en compétition sur le marché, en vue de leur emploi dans la 3e génération de calculateurs (1). On penche beaucoup pour les monolithiques.

Les récents perfectionnements de la technique monolithique

Le procédé de base est le procédé «planar» que nous avons décrit plus haut: diffusion localisée d'impuretés et protection des surfaces par une couche isolante (passivation). Mais il y a bien d'autres techniques, utilisant alliage direct, évaporation, gravure, projection de brouillards, etc. Signalons également deux propriétés physiques largement employées:
— Les couches épitaxiques
Ce sont des couches cristallines dont les atomes sont tous alignés dans le sens de la structure cristalline de base sur laquelle on les dépose d'où le nom épitaxe du grec $\varepsilon\pi\iota$: «sur», $\tau\varepsilon\iota\nu\omega$: «étendre»). La diffusion d'impuretés dans ces couches donne des résultats particulièrement intéressants.
— L'effet de champ consiste à réaliser dans le matériau semiconducteur des «goulots» de charges électriques créés par application localisée d'un potentiel.

Le type de circuits MOS-FET (metal oxide silicon, field effect transistor) qui a la faveur sur le marché actuellement, utilise ces propriétés.

Les techniques en expérimentation

Signalons quelques méthodes qui font encore l'objet de recherches et non pas comme les précédentes, de production commerciale. Elles sont dirigées surtout vers les propriétés des monocristaux en couches minces. On expérimente entre autres:
— la fusion de micro-zones à l'aide d'un faisceau électronique (ex.: matériau indium et antimoniure d'indium),
— la diffusion de flux qui utilise des diffusions d'impuretés dans une substance en cristallisation (sulfure de cadmium),
— l'écrasement.
Des études sont également entreprises pour tirer de la morphologie même des substances: on sait qu'un cristal de quartz est électriquement équivalent à un circuit série R C L et une capacité en parallèle.
Ne pourrait-on pas trouver une intégration aussi parfaite dans d'autres cristaux? Les couplages que l'on considère comme des parasites pourraient peut-être, s'ils étaient mieux connus, être utilisés efficacement. On aboutit ainsi à une électronique «atomique».

Les réalisations commerciales

Les microcircuits sont commercialisés sous forme de «modules fonctionnels», c'est-à-dire d'ensembles réalisant une fonction déterminée.
Dans le cas d'un circuit monolithique, par exemple, les dimensions typiques d'un de ces modules sont de l'ordre de 4×2 mm; la série d'une quarantaine de circuits tous semblables (chacun contenant à son tour quelque 70 composants) se présente sur sa plaquette de silicium originale de 25 mm de diamètre environ. On découpe ensuite cette plaquette pour obtenir chacun des modules. On pose enfin les connexions pour relier chaque module à d'autres sous-ensembles.
Notons que l'ingénieur qui réalise un système électronique n'a plus une liberté aussi grande avec les microcircuits qu'avec les circuits classiques: on lui impose des fonctions logiques toutes prêtes. Ceci constitue une sujétion et nécessite de nouvelles méthodes de travail.
Les paramètres caractéristiques de ces circuits sont:
— le temps de propagation global (de l'ordre de la dizaine à quelques dizaines de nanosecondes, 1 ns = 10^{-9} s);
— la consommation (une fraction de mW par élément de circuit donc pour un module de l'ordre de quelques dizaines de mW);
— l'immunité aux bruits (marge de sécurité en tension);
— les tensions d'alimentation (quelques volts);
— les modes d'interconnexions;
— la gamme de température de fonctionnement:

gamme militaire:	— 55 °C à + 125 °C
gammes civiles:	— 10 °C à + 80 °C
	— 0 °C à + 70 °C
	— 15 °C à + 55 °C

Les circuits digitaux utilisent des «familles» logiques qui diffèrent entre elles par le principe du montage électrique réalisant la fonction cherchée. Telles sont les logiques:

1) On parle couramment de la «3e génération» de calculateurs pour désigner les machines universelles pouvant convenir aussi bien au calcul scientifique qu'aux problèmes de gestion ou au traitement des données. Alors que la «2e génération» est transistorisée, la «3e génération» est à circuits microminiatures.

DCTL-RTL (Direct Coupled Transistor Logic, Resistor Transistor Logic)
DTL (Diode Transistor Logic)
TTL (Transistor Transistor Logic)
ECTL (Emitter Coupled Transistor Logic).

Il faut cependant mettre l'accent sur le plus grave obstacle auquel se heurtent les circuits intégrés et ceci quel que soit leur type de fabrication: on ne sait pas microminiaturiser les capacités ou les inductances importantes. En effet de tels éléments emmagasinent de l'énergie dans un certain volume que l'on ne sait pas réduire considérablement.

Par conséquent les circuits «linéaires», c'est-à-dire les réseaux classiques RLC sont difficiles à fabriquer; au contraire les circuits digitaux sont très simples. On constate, en conséquence, une application immédiate des microcircuits aux télécommunications utilisant les techniques digitales, mais une application beaucoup plus difficile aux télécommunications utilisant les techniques analogiques. Ceci ne signifie pas cependant que les fabricants de microcircuits abandonnent leurs efforts sur les circuits linéaires. Mais leur catalogue reste actuellement modeste, même pour les plus grandes firmes américaines.

Une autre limitation notable est la dissipation de puissance par les éléments des circuits, qui reste relativement importante. Les constructeurs utilisent des «astuces» de montage pour améliorer les performances des circuits à basse puissance (résistance non linéaire, transistors complémentaires en série, etc.) et réduire ainsi la dissipation. La véritable solution sera de diminuer encore plus les dimensions des composants.

Le marché des microcircuits

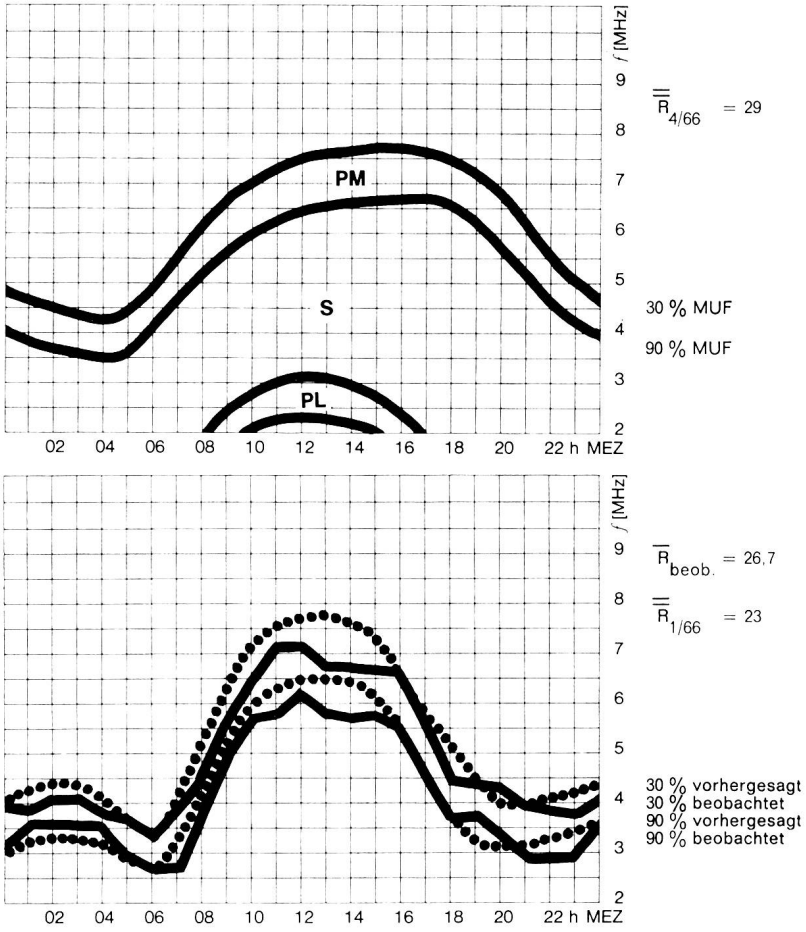
Jetons maintenant un coup d'œil sur le marché des microcircuits. Du côté des fabricants de circuits intégrés, trois firmes U.S. se détachent nettement. Il s'agit de Texas Instruments, de Fairchild et de Motorola. Depuis plusieurs années elles ont accumulé les brevets et possèdent une grande avance technique: le procédé «planar» était utilisé par Fairchild dès 1959; Texas Instruments a utilisé le premier la technique hybride, etc.

En Europe, on en est encore au stade exploratoire. Seuls les groupes importants commencent à fabriquer des microcircuits, mais sont gênés par un marché national trop étroit. D'autre part, tandis qu'aux USA les producteurs se sont partagé le marché et lancent tous leurs moyens dans un type de circuit déterminé, on constate qu'en Europe chaque firme fabrique un peu de tout, au détriment de la rentabilité. Citons en France la SESCO, la COSEM et la Radiotechnique qui commencent à lancer des familles logiques DTL ou DCTL. En Angleterre, Ferranti, Marconi. En Allemagne Fédérale, Siemens et Telefunken. Il est à noter qu'en Europe s'installent actuellement des filiales de firmes américaines citées plus haut; au départ simples organismes de distribution elles tendent de plus en plus à se livrer aussi à la production, utilisant à cet effet un personnel local mais des capitaux et des brevets américains.

Nous voudrions insister sur le fait que la fabrication des microcircuits suppose une production en masse et donc des investissements considérables. Pour être compétitive elle ne peut s'accommoder de procédés artisanaux; elle nécessite à la fois une grosse concentration de moyens et un vaste marché.

Du côté des utilisateurs, citons tout d'abord les fabricants de calculateurs qui en constituent une importante partie. Tandis que le 360 IBM est constitué de circuits hybrides, le RCA Spectra 70 utilise des monolithiques, la General Electric et le Control Data Corp, n'ont pas encore choisi définitivement (IBM fabrique d'ailleurs ses propres circuits hybrides avec un procédé particulier d'isolement des transistors rajoutés sur le film mince au moyen d'une fine pellicule de verre; la

MUF-Vorhersage für April 1966
Beobachtungen, Januar 1966



Bedeutung der Symbole

Wählt man für eine Verbindung auf Kurzwellen innerhalb der Schweiz die Arbeitsfrequenz so, dass sie in den Bereich S fällt, so ist die Verbindung als sicher zu beurteilen (unter Vorbehalt von drei gestörten Tagen). In den Bereichen PM und PL ist die Wahrscheinlichkeit für eine sichere Verbindung naturgemäss geringer. Fällt die Arbeitsfrequenz in den Bereich PM, so ist die Wahrscheinlichkeit grösser, dass die Tages-MUF erreicht oder überschritten wird. Ist die Verbindung schlecht, soll eine tiefere Arbeitsfrequenz gewählt werden. Fällt die Arbeitsfrequenz in den Bereich PL, so ist die Wahrscheinlichkeit grösser, dass die Tages-LUF erreicht oder überschritten wird. Ist die Verbindung schlecht, soll eine höhere Arbeitsfrequenz gewählt werden.

$\overline{\overline{R}}$ = gleitendes Zwölfmonatsmittel der Sonnenflecken-Relativzahlen

$\overline{R}$ = beobachtete monatliche Relativzahl der Sonnenflecken

Explication des symboles

Si l'on choisit pour une transmission sur ondes courtes sur territoire suisse une fréquence de travail qui se trouve dans la région centrale S du graphique, on peut considérer la liaison comme sûre (sauf en cas de perturbation pendant trois jours). Dans les régions PM et PL du graphique, la probabilité d'obtenir une liaison sûre est naturellement moins grande. Si la fréquence de travail se trouve dans la région PM, la probabilité est plus grande que la MUF de ce jour soit atteinte ou même dépassée. En cas de mauvaise liaison: diminuer la fréquence de travail. Si la fréquence de travail se trouve dans la région PL, la probabilité est plus grande que la LUF de ce jour soit atteinte ou même dépassée. En cas de mauvaise liaison: augmenter la fréquence de travail.

$\overline{R}$ = nombre relatif mensuel observé des taches solaires

$\overline{\overline{R}}$ = moyenne glissante de douze mois des nombres relatifs mensuels des taches solaires.

fabrication de ces circuits pour l'Europe est concentrée à l'usine de Corbeil-Essonnes). Bien sûr, les microcircuits n'intéressent pas seulement les gros calculateurs mais surtout les petits à usage spécialisé: calculateurs de vol pour engins et avions par exemple, tel Autonetics D 37 C du Minuteman qui pèse 19 kg.

En ce qui concerne l'électronique appliquée à l'aviation, on prévoit aux U.S.A. pour les systèmes construits dans la période 1966—1968 que les microcircuits constitueront 90 % des calculateurs, 78 % des systèmes de traitement de l'information, 88 % des télécommunications, 70 % des petits radars et 25 % des gros radars. C'est donc une proportion considérable des équipements qui sera miniaturisée.

Mais, évidemment, ce sont aux nouveaux systèmes militaires et spatiaux que la haute fiabilité, la taille et le poids faibles de la microélectronique sont absolument indispensables. Citons à titre d'exemple deux projets de très grande envergure utilisant les microcircuits: Minuteman II et Apollo.

En outre, seule l'électronique militaire utilise pratiquement les circuits linéaires intégrés pour des applications très spéciales où le prix est un facteur secondaire. Il ne s'agit pas alors de grandes séries de fabrication.

Dans le domaine des instruments de mesure on note l'apparition aux U.S.A. de quelques appareils importants utilisant des microcircuits (compteurs de scintillation).

De façon générale, il est certain qu'à l'heure actuelle, mises à part les considérations de volume et de consommation, seuls les systèmes assez importants ont intérêt à se miniaturiser car seules les grandes séries de microcircuits sont compétitives sur le plan économique; en outre c'est surtout dans ces systèmes qu'une haute fiabilité des composants s'avère nécessaire.

Perspectives d'avenir

Tentons d'esquisser ce que sera le développement des microcircuits dans les années à venir. Il faut souligner que ce sont des facteurs économiques qui commandent la production en masse, beaucoup plus que les facteurs techniques.

Déjà, sur certains calculateurs spéciaux, on a réalisé des micromodules de taille nettement plus faible que les séries commerciales: on peut mettre 30 modules du Burroughs D 84 sur la surface d'un cachet d'aspirine.

D'autre part, le nombre de composants qui doivent être intégrés dans un module pour que le coût de celui-ci soit minimum est bien défini par l'état de la technique à la date envisagée: 10 composants par module en 1962, 60 en 1965, on peut s'attendre à 1000 en 1970 selon toute vraisemblance.

En outre le coût minimal lui-même s'abaisse constamment et l'on peut envisager pour 1970 un prix par module dix fois plus faible qu'en 1965. Mais ceci à la condition que la fabrication porte sur des séries suffisamment importantes. Pour être compétitive une firme devra produire en grande série.

Evoquons maintenant les problèmes techniques.

Du point de vue de la dissipation thermique le problème se résoudra de lui-même car les éléments étant plus petits dissiperont moins. On pourra donc utiliser la même énergie par surface unitaire de microcircuit — et on l'utilisera pour traiter et véhiculer plus d'information — il n'y a donc pas de limitation de ce côté.

Un obstacle est cependant la puissance électrique exigée pour faire fonctionner les systèmes électromécaniques tels que les dispositifs d'entrée-sortie des calculateurs. Il est évident que les circuits de commande de tels systèmes devront conserver un volume en rapport avec le courant qu'ils transmettent et par suite ne pourront guère être miniaturisés.

De même, dans le domaine des communications, on ne sera jamais capable de microminiaturiser les systèmes utilisant de grandes puissances d'émission.

Un dernier problème, auquel on ne voit pas de solution à l'heure actuelle, est la microminiaturisation de circuits linéaires tels qu'un amplificateur à fréquence moyenne nécessitant des inductances d'accord assez importantes: on se résignerait à les laisser assez volumineuses.

Mais, en revanche, dans le domaine des hyperfréquences la microélectronique va prendre une place dont on ne soupçonne pas encore toute l'importance. On sait que les circuits employés en hyperfréquences sont du type dit «à constantes réparties», par opposition aux éléments «discrets» classiques où les constantes (résistances, inductances, capacités) sont localisées. Grâce aux microcircuits, la possibilité de réaliser et d'assembler des composants de taille faible par rapport à la longueur d'onde permettra d'utiliser des éléments discrets, du moins dans un certain domaine de fréquence.

Ainsi l'on peut penser que la réalisation d'antennes à réseau de phase qui utiliseraient des éléments hyperfréquences intégrés pourrait révolutionner le radar. (On appelle antenne à réseau de phase une antenne radar où la rotation classique est remplacée par un balayage de phase: il n'y a donc pas d'élément tournant.)

L'utilisation des monocristaux va conduire également à des réalisations considérables. On parle «d'électronique du nanowatt» où les constituants des circuits consomment chacun un nanowatt (10^{-9} W); la fabrication s'effectue alors non plus avec des caches, comme nous avons vu plus haut, mais avec de fins pinceaux électroniques ou ioniques.

Insistons sur le fait que des systèmes constitués de milliards de composants et consommant quelques watts sont réalisables sur le plan technologique — bien que n'étant pas encore économiques. On peut en conclure que, sous peu, nous disposerons de circuits capables de simuler les fonctions du système nerveux vivant, dans le même volume et avec la même puissance électrique.

De façon plus certaine les circuits intégrés donneront d'ici peu une prolifération de «gadgets»: petits calculateurs de commande, équipement personnel de communication, contrôle des automobiles..., et passeront dans la vie de tous les jours comme éléments indispensables. Ces équipements seront fabriqués en très grand nombre et pourront être très bon marché.

Il est tout aussi assuré que les équipements digitaux, calculateurs, télécommandes industrielles, se convertiront en grande partie à la microélectronique. Leur prix devrait donc baisser, leur encombrement diminuer et ils devraient ainsi permettre à de nouvelles classes d'utilisateurs de bénéficier de leurs avantages.

La microélectronique n'est donc pas une performance limitée et spectaculaire mais constitue véritablement l'avenir de l'électronique.

Article tiré du journal «Revue de Défense nationale», Nancy