

L'ONDE ÉLECTRIQUE

42^e ANNÉE N° 428

NOVEMBRE 1962

PRIX : 5 NF

REVUE MENSUELLE de la SOCIÉTÉ FRANÇAISE des ÉLECTRONICIENS et des RADIOÉLECTRICIENS
PUBLIÉE PAR LES ÉDITIONS CHIRON, PARIS



Réalisation de la fonction logique
NI en circuit intégré (montage
sur boîtier T.O.5, 8 sorties)
fabrication C.F.S.

■
MICROMINIATURISATION
ET CIRCUITS IMPRIMÉS



spectre

ANALYSEUR DE

DU NOUVEAU

dans la conception des ANALYSEURS DE SPECTRE

La conception originale de cet appareil permet à tout laboratoire disposant d'un générateur ou d'un oscillateur hyperfréquence de bonne qualité, délivrant un signal UHF pur (CW) d'une puissance de 1 mW, de s'équiper d'un analyseur de spectre de grandes performances à un prix notablement réduit. En effet, le premier oscillateur local (fonctionnant dans la gamme UHF du signal à observer) n'est pas incorporé. Il suffit d'utiliser pour cette fonction un générateur extérieur.

CARACTÉRISTIQUES :

Plage de fréquence d'utilisation : 800 à 11 000 MHz avec oscillateur extérieur délivrant une puissance de l'ordre de 1 mW - 11 000 à 44 000 MHz (ou plus) avec oscillateur et mélangeur extérieurs.

Résolution	10 kHz (à 3 dB)
Excursion en fréquence	300 kHz à 70 MHz
Fréquence de balayage	1 à 30 Hz
Sensibilité	70 dB/m
Atténuateur d'entrée	0 à 80 dB
Marqueur	linéaire, étalonné tous les 50 kHz
Tube cathodique	13 cm à fond plat. Post accélération : 10 kV (luminosité élevée)
Dimensions	505 x 595 x 365 mm
Poids	45 kg

* NOTICE TECHNIQUE DÉTAILLÉE SUR DEMANDE

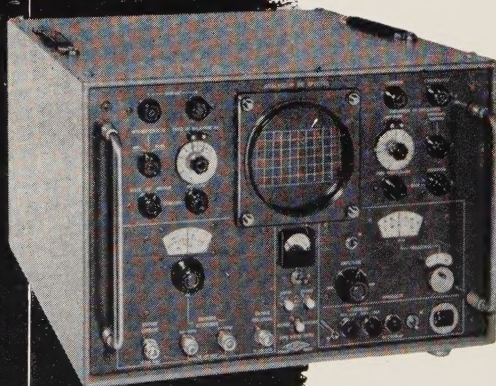
**18, AVENUE PAUL-VAILLANT-COUTURIER • TRAPPES
(S.-&-O.) - TÉLÉPHONE 923-08-00 (5 lignes groupées)**



Société Anonyme au capital de 2.000.000 NF

XB-101*

- PERFORMANCES ÉLEVÉES
- VOLUME, POIDS ET PRIX RÉDUITS
- GRANDE COMMODITÉ D'EMPLOI



**ETS GEFFROY ET CIE
INGÉNIEUR-DOCTEUR**

L'ONDE ÉLECTRIQUE

Vol. XLII

NOVEMBRE 1962

N° 428

Rédaction de l'Onde Électrique :

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRONICIENS ET DES RADIOÉLECTRICIENS

10, Avenue Pierre-Larousse - Malakoff (Seine) - Tél. : ALÉSIA 04-16 - C.C.P. Paris 697-38

Cotisations des Membres de la Société : Voir au verso "Extraits des Statuts"

MICROMINIATURISATION ET CIRCUITS IMPRIMÉS

SOMMAIRE

La microminiaturisation	X. AMEIL	913
Aperçu de la miniaturisation électronique	R.C. SPRAGUE	916
Le micromodule	R. COCHAIN J. SCHWEITZER	921
Microminiaturisation électronique	A. BOBENRIETH	929
Les éléments micrologiques	FAIRCHILD	945
Montages logiques à transistors à couplage direct	M.R. DANIEL	953
Les circuits intégrés	J. BLANLUET	957
Technologie des circuits intégrés	A. SNYDER	963
Réalisation et contrôle de circuits logiques à structure modulaire	G. GERBIER A. SAUTEL J.P. BERGER	967
Informations :		
Documentation technique		977
Communiqués		979
Bibliographie		981

Sur notre couverture

Un circuit NI comportant 3 transistors et une résistance, réalisé au moyen de la technique des circuits intégrés sur un bloc de silicium de 1,5 mm sur 2 mm.



— Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil, Département « Recherches Physico-Chimiques » 12, rue de la République, Puteaux (Seine). Téléphone : LONchamp 28.86.

L'Onde Electrique, revue mensuelle publiée par la Société Française des Electroniciens et des Radioélectriciens, est éditée par les

ÉDITIONS CHIRON

40, Rue de Seine - PARIS-6^e - Tél. : MÉD. 18-93 - C.C.P. Paris 53-35

Abonnement annuel souscrit directement aux Editions Chiron : France 45 NF — Etranger 51 NF — Ce n° 5 NF

Exclusivité de la Publicité : M. R. DOMENACH, 161, Bd St Germain, Paris 6^e - Tél. BAB. 41-97 et 41-98

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRONICIENS ET DES RADIOÉLECTRICIENS

BUREAU DE LA SOCIÉTÉ

Président (1962)

M. B. DECAUX, Ingénieur en Chef des Télécommunications.

Président désigné pour 1963

M. G. LEHMANN, Directeur Scientifique à la C. G. E.

Vice-Présidents

MM. H. PORTIER, Directeur des Etudes à l'E.S.E.

J. DAUVIN, Ingénieur Général des Télécommunications e.r., Directeur délégué du Centre de Recherches de la C.G.E.

P. GRIVET, Professeur d'Electronique à la Faculté des Sciences de Paris.

Secrétaire Général

M. A. FLAMBARD Ingénieur Militaire en Chef.

Secrétaires Généraux Adjoints

MM. R. CABESSA, Ingénieur à la Société L.M.T., Directeur de la Division systèmes électroniques à la Société Le Matériel Téléphonique.

B. GAUSSOT, Chef du Service Radioélectricité et Electronique à l'E.S.E.

Tresorier

M. J.M. MOULON, Directeur Général Adjoint de la Société M.E.C.I.

Secrétaires

MM. M. THUÉ, Ingénieur des Télécommunications.

J. BLOUET, Chef de la Section Métrologie de la Division Radioélectricité et Electronique du L.C.I.E.

J.-P. POITEVIN, Ingénieur des Télécommunications.

SECTIONS D'ÉTUDES

N°	Dénomination	Président	Secrétaires
1	Problèmes d'enseignement, de formation et de perfectionnement des Ingénieurs et des Techniciens	M. L. CHEREAU	
2	Etudes scientifiques générales	M. L. ROBIN	M. M. MENORET
3	Physique de l'état solide	M. Ch. DUFOUR	M. G. PARICARD
4	Tubes électroniques	M.J. PICQUENDAR	M. O. CAHEN
5	Composants électroniques	M. DANZIN	M. Ch. LOYEN
6	Propagation des ondes	M. J. VOGÉ	M. DU CASTEL
7	Electroacoustique, Enregistrement des sons	M. R. BUFFARD	M. R. LEHMANN
8	Télécommunications-Radiodiffusion-Télévision	M. J. FAGOT	M. AFFANASSIEFF
9	Radiodétection et localisation, Radionavigation	M. P. ASSENS	M. D. COULMY
10	Calculateurs électroniques, Automatismes	M. J. LOEB	M. G. ROTH
11	Electronique nucléaire et corpusculaire	M. P. DESNEIGES	Mme KOCH
12	Electronique biologique et médicale	M. J. POLONSKY	M. E. ALLARD

Rédaction de l'Onde Electrique

M. L.J. LIBOIS, Ingénieur en Chef des Télécommunications, Président du Comité de Rédaction.

M. J.-P. POITEVIN, Ingénieur des Télécommunications, Rédacteur en Chef de l'Onde Electrique.

M. M. CAMUS, Ingénieur des Télécommunications.

M. A. PROFIT, Ingénieur des Télécommunications.

GROUPES RÉGIONAUX

GRUPE D'ALGER

Secrétaire. — M. P. CACHON, Assistant à la Faculté des Sciences d'Alger.

GRUPE DE L'EST

Président. — M. R. GUILLIEN, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Nancy.

Secrétaire. — M. E. GUDEFIN, Maître de Conférences à l'E.N.S.E.M.

GRUPE DE GRENOBLE

Président. — M. BENOIT, Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble, Directeur de la Section de Haute Fréquence à l'Institut Polytechnique de Grenoble.

Secrétaire. — M. J. MOUSSIEGT, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Grenoble.

GRUPE DE LYON

Président. — M. A. SARAZIN, Professeur de Physique Nucléaire à la Faculté des Sciences de Lyon, Directeur de l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon.

Secrétaire. — M. R. ARNAL, Maître de Conférences à l'I.N.S.A. de Lyon.

GRUPE DE MARSEILLE

Président. — M. Th. VOGEL, Directeur de Recherches au C.N.R.S.

Secrétaire. — M. J. GIRAUD Ingénieur des Télécommunications.

GRUPE DU NORD

Président. — M. N. SEGARD, Professeur, Directeur de l'I.S.E.N.

Vice-Présidents. — M. R. CARPENTIER, Chef du Centre de Télévision la R.T.F.

— M. R. GABILLARD, Professeur Directeur de l'Institut Radiotechnique

Secrétaire. — M. BOUVET, Secrétaire Général de l'I.S.E.N.

EXTRAITS DES STATUTS

ARTICLE PREMIER. — La Société FRANÇAISE DES ÉLECTRONICIENS ET DES RADIOÉLECTRICIENS a pour but :

1° De contribuer à l'avancement de la radioélectricité et de l'électronique théoriques et pratiques ainsi qu'à celui des sciences et industries qui s'y rattachent.

2° D'établir et d'entretenir entre ses membres des relations suivies et des liens de solidarité.

Elle tient des réunions destinées à l'exposition et à la discussion de questions concernant la radioélectricité, l'électronique et tout ce qui s'y rattache.

ART. 2. — La Société se compose de membres titulaires, dont certains en qualité de membres bienfaiteurs ou de membres donateurs, et de membres d'honneur.

Pour devenir membre titulaire de la Société il faut :

1° Adresser au Président une demande écrite

appuyée par deux membres, non étudiants de la Société.

2° Être agréé par le Bureau de la Société.

Tout membre titulaire qui, pour favoriser les études et publications scientifiques ou techniques entreprises par la Société, aura pris l'engagement de verser, pendant cinq années consécutives, une cotisation égale à dix fois la cotisation annuelle, recevra le titre de membre bienfaiteur.

Ceux qui, parmi les membres titulaires, verseront une cotisation égale à cinq fois la cotisation annuelle, seront inscrits en qualité de donateurs.

Tous les membres de la Société sauf les membres d'honneur, paient une cotisation dont le montant est fixé par une décision de l'Assemblée Générale.

Les membres âgés de moins de 25 ans en cours d'études pourront sur leur demande, bénéficier d'une réduction de 50 % sur leur cotisation. Cette

réduction ne leur sera accordée que pendant cinq années au plus.

Les membres titulaires reçoivent une publication périodique ayant un caractère technique *.

Cette publication leur est adressée gratuitement. Toutefois, les membres résidant à l'étranger devront verser, en sus de leur cotisation annuelle, une somme destinée à couvrir les frais supplémentaires.

MONTANT DES COTISATIONS

Particuliers	25,00 NF
Particuliers âgés de moins de 25 ans en cours d'études	12,50 NF
Sociétés ou Collectivités	150,00 NF
ou	350,00 NF
ou	750,00 NF
au gré de la Société ou Collectivité.	
Particuliers résidant à l'étranger	25,00 NF
plus frais postaux	5,00 NF

* NDLR. Cette revue est 'Onde Electrique.

Changement d'adresse : joindre 0,50 NF à toute demande.

RÉSUMÉS DES ARTICLES

LA MICROMINIATURISATION, par X. AMEIL, *Directeur Adjoint du Département de Recherches Physico-Chimiques de la C.S.F.* Onde Electrique de novembre 1962 (pages 913 à 915).

Après avoir rappelé les objectifs de la microminiaturisation l'auteur présente la classification la plus généralement admise, des différentes catégories de microminiaturisation.

APERÇU DE LA MINIATURISATION ÉLECTRONIQUE, par Robert C. SPRAGUE, *Président de la Compagnie Sprague Electric.* Onde Electrique de novembre 1962 (pages 916 à 920).

Le problème de la miniaturisation et de la fiabilité des équipements électroniques nécessite le développement de composants ayant des dimensions de plus en plus réduites.

Un aperçu des technologies nouvelles montre les possibilités de réalisation dans ce domaine.

Les facteurs déterminant le choix de la méthode à adopter sont également discutés.

LE MICROMODULE, par R. COCHAIN, *Ingénieur des Travaux des Télécommunications à la Section d'Études et de Fabrications des Télécommunications* et J. SCHWEITZER, *Chef de Laboratoire à la C.S.F.* Onde Electrique de novembre 1962 (pages 921 à 928).

On fait une brève description du « Micromodule ». Après un exposé des motifs qui, en 1957, ont amené à réaliser ce système de circuits électroniques miniatures, on envisage la façon dont le problème se pose dans l'optique européenne actuelle.

MICROMINIATURISATION ÉLECTRONIQUE, par A. BOBENRIETH, *Chef du Service Dispositifs Spéciaux SESCO.* Onde Electrique de novembre 1962 (pages 929 à 944).

Après quelques généralités sur les causes de l'essor récent de la microminiaturisation électronique et les buts qu'elle se propose d'atteindre on donne le principe des grandes méthodes actuellement en développement dans le monde : micromodules, microcircuits, circuits solides.

On décrit alors en détail la méthode étudiée à la SESCO sur contrat STTA, méthode qui est maintenant industrialisée. Elle se situe entre le micromodule et le circuit solide. Après en avoir indiqué le principe et les avantages, on énumère les divers circuits de calculateurs fabriqués actuellement en petite série. On termine par les améliorations et extensions en cours : augmentation de la vitesse, de la fiabilité à long terme et de la densité de composants, extension aux mémoires à diodes tunnel et aux circuits de télécommunications.

LES ÉLÉMENTS MICROLOGIQUES FAIRCHILD SGS. Fairchild S.A. Onde Electrique de novembre 1962 (pages 945 à 952).

MONTAGES LOGIQUES A TRANSISTORS A COUPLAGE DIRECT, par M.R. DANIEL, *SGS Fairchild S.A.* Onde Electrique de novembre 1962 (pages 953 à 956).

LES CIRCUITS INTÉGRÉS, par J. BLANLUET, *Département de Recherches physico-chimiques de la C.S.F.* Onde Electrique de novembre 1962 (pages 957 à 962).

Les nouvelles technologies des « Circuits Intégrés » sont destinées à la Microminiaturisation des équipements électroniques.

La microminiaturisation en volume, en poids, en puissance consommée, s'accompagne de recherches pour accroître la fiabilité tout en s'efforçant de limiter les prix de revient.

La réalisation de « Blocs Fonctionnels » en « Circuits Intégrés » exige une étroite collaboration entre utilisateurs et fabricants. On donne comme exemple la réalisation d'un circuit bistable à partir de transistors à effet de champ.

TECHNOLOGIE DES CIRCUITS INTÉGRÉS, par A. SNYDER, *Motorola Semiconductor.* Onde Electrique de novembre 1962 (pages 963 à 966).

RÉALISATION ET CONTRÔLE DE CIRCUITS LOGIQUES A STRUCTURE MODULAIRE, par G. GERBIER, A. SAUTEL, J.-P. BERGER, *Centre National d'Études des Télécommunications.* Onde Electrique de novembre 1962 (pages 967 à 976).

Les résultats d'une étude de fabrication par petites séries de circuits utilisant 8 fonctions NI et de leur contrôle aux différents stades sont exposés dans cet article. Après la description de la fabrication de plaquettes modulaires, à 2 fonctions NI indépendantes et de leur contrôle automatisé, aussi bien en régime continu qu'en régime transitoire, sont indiqués le mode de réalisation des circuits définitifs et leur contrôle par un appareillage automatique très général et dont le principe est facilement adaptable au contrôle des circuits logiques quel qu'en soit le standard de signaux.

SUMMARIES OF THE PAPERS

FAIRCHILD MICROLOGIC ELEMENTS, SGS, Fairchild S.A. Onde Electrique, November 1962 (pages 945 to 952).

LOGIC ASSEMBLIES USING DIRECT-COUPLED TRANSISTORS, by M.R. DANEL, SGS, Fairchild S.A. Onde Electrique, November 1962 (pages 953 to 956).

INTEGRATED CIRCUITS, by J. BLANLUET, *Département de Recherches physico-chimiques de la C.S.F.* Onde Electrique, November 1962 (pages 957 to 962).

The new technologies of integrated circuits are going to be applied in the microminiaturisation of electronic instruments.

Microminiaturisation in volume, in weight and in power consumption, is associated with research to improve reliability while all the time seeking to limit the price of sale.

The design of functional blocks in integrated circuits demands close collaboration between users and manufacturers. An example is given of the development of a bistable circuit based on field-effect transistors.

TECHNOLOGY OF INTEGRATED CIRCUITS, by A. SNYDER, *Motorola Semiconducteur.* Onde Electrique, November 1962 (pages 963 to 966).

DESIGN AND CONTROL OF MODULAR STRUCTURE LOGIC CIRCUITS, by G. GERBIER, A. SAUTEL, J.P. BERGER, *Centre National d'Etudes des Télécommunications.* Onde Electrique, November 1962 (pages 967 to 976).

This article deals with the results of a study of the manufacture in short runs of circuits using 8 NOR functions and with their control to different standards. After a description of the manufacture of modular units having two independent NOR functions, and of their automatic control both in continuing operation and in intermittent operation, there is an account of the design principles of other circuits and their control by automatic equipment of general application. The principle of this equipment is readily adaptable to the control of any logic circuits whatever may be the signal standards.

MICROMINIATURISATION, by X. AMEIL, *Directeur Adjoint du Département de Recherches Physico-Chimiques de la C.S.F.* Onde Electrique, November 1962 (pages 913 to 915).

After having reviewed the objects of microminiaturisation, the author deals with the generally agreed classification of the different categories of this activity.

A REALISTIC LOOK AT ELECTRONIC MINIATURIZATION, by R.C. SPRAGUE Sr., *Président de la Compagnie Sprague Electric.* Onde Electrique, November 1962 (pages 916 to 920).

The problem of miniaturization with reliability of electronic components calls for further development of components having smaller dimensions.

New technologies are discussed which show possibilities in this direction, and are compared with existing techniques from the point of view of size, cost and reliability.

Factors to be considered in determining the proper approach to miniaturization are also discussed.

THE MICROMODULE, by R. COCHAIN, *Ingénieur des Travaux des Télécommunications à la Section d'Etudes et de Fabrications des Télécommunications et J. SCHWEITZER, Chef de Laboratoire à la C.S.F.* Onde Electrique, November 1962 (pages 921 to 928).

This is a brief account of the micromodule. After an explanation of the reasons which in 1957 led to the development of this system of miniature electronic circuits, there is an examination of the present-day requirements and problem in Europe today.

ELECTRONIC MINIATURISATION by A. BOBENRIETH, *Chef du Service Dispositifs Spéciaux, SESCO.* Onde Electrique November 1962 (pages 929 to 944).

After some general comment on the reasons for the recent upsurge in electronic microminiaturisation and the purposes to which it is being applied, there is an account of the basis of the principal methods at present in development in this field: micromodules, microcircuits and solid circuits.

There is then a detailed account of the method studied at SESCO in connection with a STTA contract — a method which is now commercialised. It falls between the micromodule and the solid circuit. After an account of the principle and the advantages of this method there is an account of various computer circuits now being manufactured in small batches. Finally there is reference to the improvements and extensions now in progress including improvements in speed, in long term reliability and in compression together with extensions to memory circuits using tunnel diodes and to telecommunications circuits.

LA MICROMINIATURISATION

PAR

X. AMEIL

*Directeur Adjoint du Département de Recherches
Physico-Chimiques de la C.S.F.*

La tendance à miniaturiser le matériel électronique, à le rendre moins encombrant ou moins lourd, date du début de la Télégraphie Sans Fil.

Pendant longtemps, on peut dire jusqu'au début de la seconde guerre mondiale, cette tendance s'est manifestée de façon un peu anarchique : la forme des pièces détachées est généralement déterminée par leur mode de fabrication et les constructeurs s'efforçaient de tirer le meilleur parti possible de leurs dimensions erratiques. La pièce la plus encombrante était l'objet d'une certaine contrainte au rétrécissement. Les autres composants y échappaient. L'effort a d'abord porté sur les tubes à vide, puis sur les condensateurs électrolytiques.

Depuis une dizaine d'années les progrès scientifiques dans le domaine de la physique de l'état solide ainsi que les progrès technologiques combinés avec le besoin impérieux de matériels minuscules ont abouti à de très beaux résultats de microminiaturisation du matériel électronique qui va jusqu'aux limites de ce qui est techniquement possible : c'est ainsi que pour le traitement de l'information, on sait réaliser des circuits 10 à 100 fois plus petits qu'avec les éléments classiques.

On considère que le domaine des circuits microminiatures commence lorsque l'encombrement des composants est de l'ordre de $0,3 \text{ cm}^3$, ce qui donne un volume de 2 à 3 cm^3 à un circuit fonctionnel, car on se réfère généralement à la densité d'une dizaine d'éléments par circuit fonctionnel. Des assemblages de composants classiques, tels que ceux des appareils de prothèse auditive, se trouvent au seuil du domaine de la microminiaturisation.

La microminiaturisation des matériels obéit à certains besoins et est toujours coûteuse, du moins au stade actuel, car au dernier congrès d'Oslo (juillet 1961) tous les participants se disaient capables de réaliser des matériels comparables, du point de vue fiabilité et amortissement, aux matériels conventionnels, à condition de les réaliser en série suffisante.

Même à l'échelle américaine le mot « suffisant » correspondait souvent à un chiffre important.

Au stade transitoire actuel, du moins dans le contexte européen, il est utile de considérer le degré de microminiaturisation optimal d'un matériel. C'est celui en-dessous duquel un rapetissement de l'électronique n'apporte guère d'avantages. Pour un récepteur de télévision, par exemple, il est bien inutile que l'électronique soit très petite devant l'encombrement du tube image. Les limitations seront souvent apportées par les dimensions humaines, le diamètre d'un bouton de réglage qu'on doit tourner avec les doigts, la dimension d'un cadran qu'il faut pouvoir lire, ...

Dans la pratique, un équipement ne peut guère être microminiaturisé en totalité. On peut supposer que 80 % de ses composants sont microminiaturisables dans le rapport de 10 à 1 et que les 20 % restant resteront inchangés. Le volume total aura donc diminué dans le rapport de 1 à $0,2 + \frac{0,8}{10} = 0,28$ soit plus du tiers de l'encombrement initial.

Deux directions sont alors possibles :

— ou bien l'économie de poids est prédominante ; on conserve la conception de l'appareil et il faut faire porter le progrès sur les 20 % des composants inchangés car une réduction supplémentaire, même importante, de l'électronique ne peut apporter, à la limite, qu'une amélioration de 8 % du volume initial ;

— ou bien l'économie de poids n'est plus prédominante ; on peut se fixer un encombrement maximal supérieur à celui de l'exemple précédent (0,50 au lieu de 0,28) que l'on cherche à utiliser au mieux. Dans ces 0,50 l'équipement électronique occupera 0,30 et le matériel non microminiaturisé 0,20 comme précédemment. Ces 0,30 microminiaturisés proviennent d'un matériel électronique beaucoup plus important puisque si l'on admet toujours le rapport de 1 à 10, il vaut en encombrement 3 au lieu de 0,3

précédemment. Les gains en petitesse prennent toute leur valeur dans la mesure où ils servent à augmenter les possibilités du matériel et il peut en résulter des mutations complètes en matière d'équipement.

On peut aussi profiter des disponibilités en matière électronique pour doubler certains circuits afin, comme dans les machines à calculer, d'augmenter la fiabilité de l'ensemble. Cette « redondance » est assez fréquente.

De toutes façons, l'emploi d'éléments minuscules oblige à utiliser, comme pièces détachées, des sous-ensembles plus importants qui se situent généralement au stade des circuits fonctionnels. En cas de dépannage, ces sous-ensembles sont évidemment plus coûteux que l'élément défaillant d'un matériel classique, il faut donc qu'ils aient une durée de vie allongée en proportion. Cette considération explique que même si les circuits microminiatures n'étaient pas le plus souvent conçus en vue de conditions de fonctionnement extrêmes, une bonne fiabilité serait néanmoins une condition sine qua non de leur utilisation.

Catégories de microminiaturisation ⁽¹⁾

On a tenté de classer les différents modes de réalisation de circuits fonctionnels microminiatures d'après le degré de diversification du composant électronique.

1. CIRCUITS RÉALISÉS À PARTIR DE COMPOSANTS CLASSIQUES, DE FORME GÉOMÉTRIQUE ERRATIQUE

Les pièces détachées (résistances, condensateurs, transistors) sont fournies sous leur emballage protecteur habituel. Elles sont soudées suivant des dispositions souvent ingénieuses ; les soudures se trouvent donc moins protégées que les composants, même si l'ensemble reçoit un enrobage après montage — capacité inférieure à 1 cm³ par circuit fonctionnel.

2. CIRCUITS RÉALISÉS À PARTIR DE COMPOSANTS DE FORME GÉOMÉTRIQUE IMPOSÉE

Afin d'avoir la meilleure compacité possible, les composants, de fonctions classiques, ne sont protégés qu'en vue de leur stockage. Ils sont assemblés de façon compacte, suivant des procédés généralement automatisables, et après soudure, enrobés avec soin. Les soudures qui sont protégées, permettent d'espérer une meilleure fiabilité que dans le cas précédent. Dans certains cas la protection peut être constituée par un boîtier de transistor.

Compacité de 1 à 0,5 cm³ par élément fonctionnel. On peut ranger dans ce groupe un certain nombre de tentatives. Citons des assemblages type « Swiss cheese » préconisés par HUGUES à partir des éléments « Microseal », les micromodules SESCO et les micromodules du type R.C.A. (étudiés en France par la C.S.F. pour le compte de la S.E.F.T.). On trouvera dans cette revue des articles spécialisés ou des infor-

mations techniques sur ces différentes réalisations techniques.

Ces deux premières catégories concernent des circuits réalisés à partir de composants classiques.

3. MICROCIRCUITS ÉVAPORÉS SUR UN SUPPORT ISOLANT

Dans les cas précédents, les composants étaient fabriqués séparément. Ici, les éléments ont toujours les propriétés des composants classiques, mais ils sont réalisés sur le même support isolant. La compacité est améliorée (de 0,5 à 0,1 cm³ par circuit fonctionnel). Les difficultés de réalisation sont compensées par le fait que certains éléments, réalisés simultanément auront, par exemple, la même dérive en température ou dans le temps, ce qui moyennant quelques discernements, permet d'obtenir pour le circuit une constance de caractéristiques meilleure que celle de ses éléments. De plus le nombre de connexions est diminué, d'où une probabilité de fiabilité accrue.

Exemple de réalisation : Résistances et capacités au tantale en film mince par les Laboratoires de la BELL.

4. CIRCUITS SOLIDES

Nom donné par la Société TEXAS INSTRUMENTS à la réalisation de blocs fonctionnels au sein d'un même monocristal de semiconducteurs.

On réalise, en effet, dans un ou sur un bloc de semiconducteur un certain nombre d'hétérogénéités qui présenteront des constantes réparties ($R - C$ — redressement) souvent variables avec la tension. La notion classique de composant électronique s'estompe et l'analyse des phénomènes à l'intérieur du bloc n'est guère redevable que du calcul matriciel. La limite inférieure de l'encombrement est très basse, les dimensions de l'hétérogénéité élémentaire sont inférieures à 0,1 mm³, et le circuit fonctionnel peut atteindre le millimètre cube, ou moins.

Ces deux dernières catégories de circuits sont appelées « CIRCUITS INTÉGRÉS » (integrated circuits) car leurs composants sont réalisés par un seul processus. Leur degré de compacité rend l'emploi des inductances très difficile. De ce fait, malgré de nombreux efforts, les circuits accordés leur sont actuellement interdits et les principales réalisations concernent des circuits logiques où ils se comportent particulièrement bien.

On trouvera dans cette revue des informations détaillées sur les circuits intégrés (Fairchild, C.S.F., Motorola).

5. ÉLECTRONIQUE MOLÉCULAIRE

L'électronique moléculaire, enfin fait franchir une étape de plus à la microminiaturisation.

Dans cette dernière catégorie le physicien s'efforcera de réaliser les fonctions demandées par l'électronicien, en faisant l'inventaire des « moyens » dont il dispose.

⁽¹⁾ Selon M. KOWJAN (ARMA) Advisory Committee for Microminiaturization AGARD.

On ne distinguera plus forcément une résistance, une capacité, etc., au sein du circuit intégré. Le phénomène physique ou les phénomènes physiques associés dans le circuit fournissent la fonction demandée. Ainsi a-t-on associé physique du solide et phénomènes optiques.

Conclusion

En fait, les circuits réels sont souvent difficiles à ranger de façon rigide dans l'une de ces cinq catégories. C'est le caractère le plus net de la situation actuelle qui est en pleine évolution. Nous espérons que ces définitions aideront le lecteur non spécialiste

à se retrouver dans la documentation où les distinctions ne sont pas toujours nettement faites.

L'existence de circuits fonctionnels aux caractéristiques définies amènera probablement une évolution irréversible de la conception des matériels électroniques, qu'on pensera de plus en plus en termes de fonction alors qu'on en est resté jusqu'à maintenant au composant. Il en résulterait dans les années à venir des transformations de la notion de pièces détachées dont les conséquences industrielles devraient être tempérées par l'élargissement du marché provenant des possibilités accrues des appareils micro-miniaturisés.

APERÇU DE LA MINIATURISATION ÉLECTRONIQUE

PAR

ROBERT C. SPRAGUE

Président de la Compagnie Sprague Electric

De nos jours, une boule de cristal semble être une source normale permettant de prévoir l'avenir de l'industrie des composants électroniques.

Récemment de nombreux articles ont paru dans la presse et les revues qui voudraient faire des prévisions au sujet de l'avenir encore incertain des composants et des circuits qui les emploient.

Un article disait récemment que deux nouvelles technologies provoqueront une révolution qui va bouleverser le marché des composants.

Pour moi « révolution » est un terme exagéré. Des exposés comme ceux-ci relèvent plutôt de l'enthousiasme que de l'appréciation rationnelle des faits. Cette révolution ne permet malheureusement pas aux électroniciens de métier et aux instances gouvernementales d'éviter des erreurs de décision trop hâtive.

Tandis que la presse parle de révolution, l'expérience nous a appris qu'il est préférable de parler d'évolution.

Cette évolution date de l'origine de la télégraphie sans fil. Elle apparut avant que les mots radio et électronique aient été inventés. Pour ma part, j'ai observé que ces évolutions continuent depuis les 36 ans que la Compagnie SPRAGUE existe.

L'évolution, bien sûr, s'oriente vers la miniaturisation et la fiabilité des équipements électroniques. Elle est le résultat de recherches fondamentales et continues sur les matériaux utilisés dans les composants électroniques et sur les techniques d'assemblage incorporant des circuits complexes.

Cette miniaturisation n'a pas commencé avec le transistor ni avec les nouvelles technologies de l'état solide qui ont été développées parallèlement. Depuis que les transistors opèrent d'ordinaire à des tensions inférieures à celles des tubes électroniques subminiature développés durant la seconde guerre mondiale, ils ont naturellement inspiré le développement de composants nouveaux et de dimensions réduites.

Le plus significatif de ceux-ci est bien sûr le condensateur à électrolyte solide qui utilise une anode au tantale ou au niobium.

La figure 1 montre quelques types de ces composants miniatures développés récemment pour des circuits transistorisés.

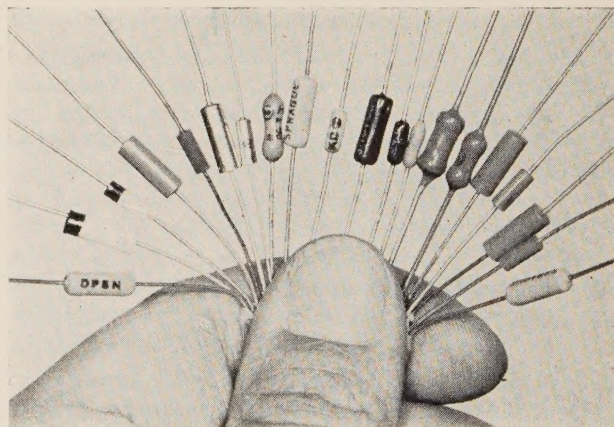


FIG. 1.

On comprend l'intérêt de miniaturiser les circuits électroniques dans certaines applications spécifiques.

Néanmoins la miniaturisation a des applications très limitées.

En effet, elle peut entraîner des prix de revient plus élevés, limiter les performances et rendre difficile la maintenance des équipements.

Les appareillages électroniques spéciaux produits durant la seconde guerre mondiale utilisaient des composants et des techniques d'assemblage ayant une densité de 40 composants par décimètre cube.

Durant les années suivantes, le développement de composants plus petits dans lesquels SPRAGUE ELECTRIC a joué un rôle majeur et l'application de

meilleures techniques modulaires ont permis de produire des circuits ayant jusqu'à 40 000 composants individuels par décimètre cube.

La Compagnie a depuis 1954 produit des modules complexes contenant jusqu'à 4 000 composants élémentaires par décimètre cube.

Récemment notre groupe de recherches a développé des circuits déposés sur céramique, ayant 80 000 composants par décimètre cube.

Des techniques se sont développées pour des configurations tridimensionnelles et planes.

La figure 2, par exemple, montre un circuit typique avec composants imprimés sur substance céramique et livré, depuis 1951, à des fabricants de récepteurs de télévision.

Ces plaquettes ont seulement 32 mm de long et 15 mm de large. Elles remplacent 6 résistances à composition de carbone et 3 capacités céramiques à disque.

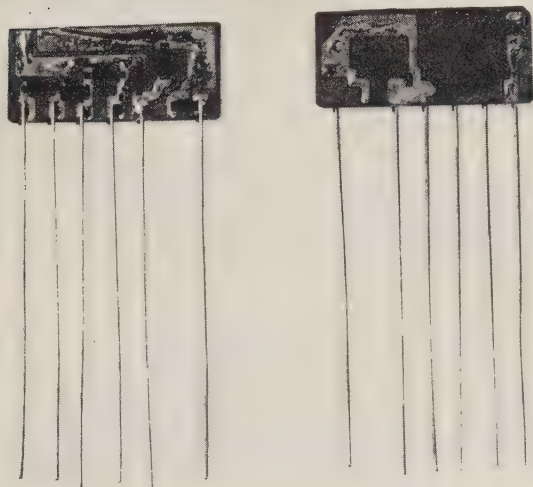


FIG. 2.

La figure 3 représente une méthode de conversion des circuits à 2 dimensions en circuits à 3 dimensions.

L'objectif dans ce cas particulier était d'obtenir un circuit utile et économique avec une miniaturisation comme but secondaire.

La densité des composants de cet amplificateur type 1953 était de 2 000 éléments au décimètre cube.

Une autre méthode pour économiser de la place et obtenir une manipulation aisée du module fut d'utiliser des circuits imprimés sur plaquettes ou cartes.

Du fait que les rangées de ces cartes sont montées avec des dispositifs de fixation appropriés, la plupart du temps sur racks, elles ont amené le développement de composants assortis avec des hauteurs limitées par les espacements entre plaquettes.



FIG. 3.

La figure 4 montre une plaquette typique.

Un autre module courant est le bloc coulé ou moulé.

La figure 5 représente un circuit caractéristique de ce type de montage. La construction la plus courante d'aujourd'hui est le bloc « cordwood ». Ici les composants individuels sont assemblés en petits « ligots ».

L'interconnexion entre les composants peut être effectuée par soudure au fer ou soudure électrique ou encore en utilisant des circuits imprimés sur une ou deux faces du bloc « cordwood ».

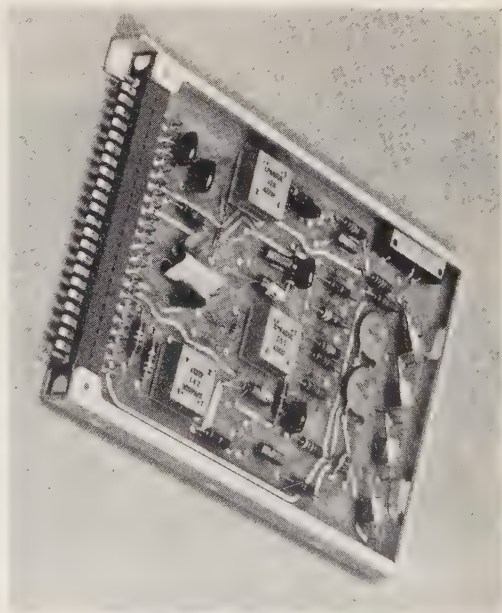


FIG. 4.

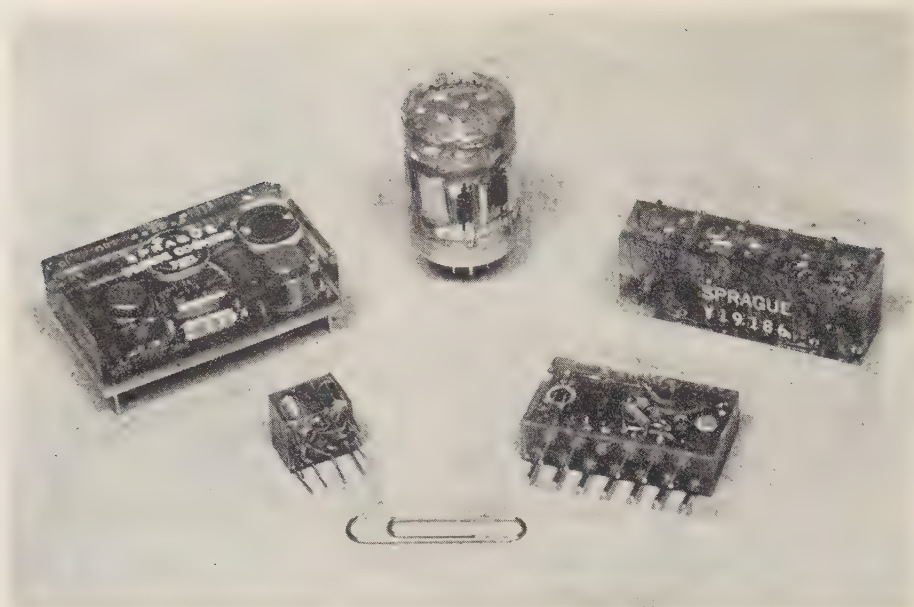


FIG. 5.

Des blocs hybrides peuvent se substituer aux plaquettes phénoliques ou époxy communément utilisées pour réduire l'encombrement et augmenter la flexibilité.

Les transistors — du fait de leur construction — sont connectés normalement d'un seul côté du circuit, tandis que les diodes et éléments passifs à sorties axiales qui constituent la majorité des composants le sont des deux côtés.

De nouvelles applications sont à prévoir bien que les modules « cordwood » aient le rendement volumétrique le plus élevé avec des composants de mêmes dimensions, et bien que les composants soient fabriqués avec des dimensions standard (voir fig. 1).

La U.S. ARMY SIGNAL CORPS a expérimenté une technique utilisant des modifications des composants classiques.

Les micro-modules de SIGNAL CORPS sont com-

posés de feuilles de céramique à rainures empilées les unes sur les autres.

Elles peuvent constituer des circuits à éléments intégrés ou déposés. Elles peuvent également servir de support pour fixer les éléments.

Les feuilles de rainures sont interconnectées en soudant des fils de branchement dans les encoches. Les blocs volumétriques sont utilisés pour loger des semi-conducteurs, inductances et condensateurs au tantale, etc.

La figure 6 montre un condensateur au tantale solide typique fabriqué par SPRAGUE pour assemblage micro-modulaire.

La figure 7 montre un condensateur céramique pour un usage micro-modulaire.

Un autre procédé consiste à loger les composants dans des trous de la plaquette support.

Les connexions sont faites par soudure électrique ou par soudure au fer ou par époxyconducteur.

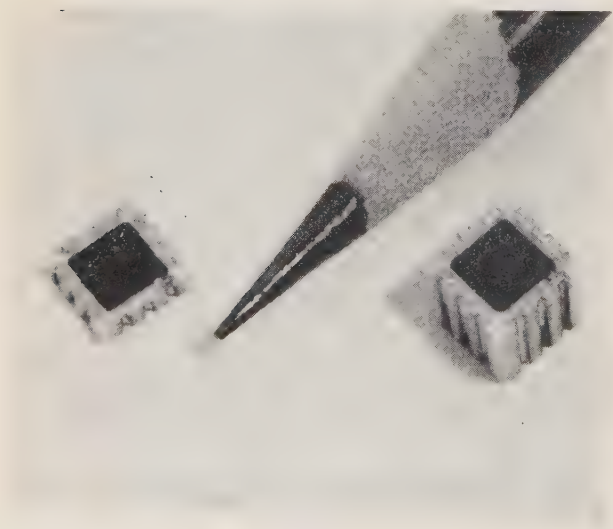


FIG. 6.



FIG. 7.

Ce type de construction est généralement connu sous le nom de circuit « swiss cheese » ou circuit « dot ».

L'extension ultérieure de cette miniaturisation reste discutable du fait des limitations pour réaliser des composants et de la difficulté de manipulation des composants non enrobés et de la nécessité de rééduquer périodiquement les techniciens.

Les circuits micro-modulaires à base de céramique sont pleins de promesses pour l'avenir. Cette version améliorée de circuit imprimé à base céramique peut incorporer des résistances à fil métallique de précision (tolérance 1 %) et une grande variété de capacités céramiques.

Les transistors, diodes et condensateurs au tantale sec, sont déposés dans les rainures.

La figure 8 montre un module typique Sprague (Ceracircuit) qui contient 22 composants dans un volume de 12,5 mm × 12,5 mm × 12,7 mm.

La voie d'avant garde prise par la SPRAGUE dans ces circuits micro-modulaires à films minces type 2D est encouragée par l'annonce récente de fabricants américains de composants et d'équipements qui viennent de se lancer dans cette nouvelle technique.

Récemment, une revue fit état de deux nouvelles technologies révolutionnaires incorporant l'emploi de films très minces dans des dispositifs solides. Ceux-ci sont assemblés pour accomplir une variété de fonctions de circuit : de préférence digitales plutôt que linéaires. De telles combinaisons nécessitent une miniaturisation plus poussée que les modules minia-

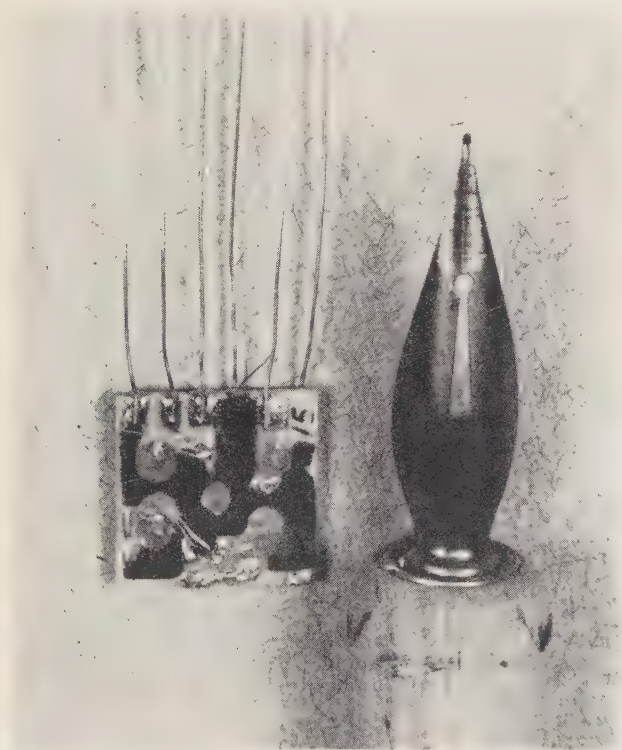


FIG. 8.

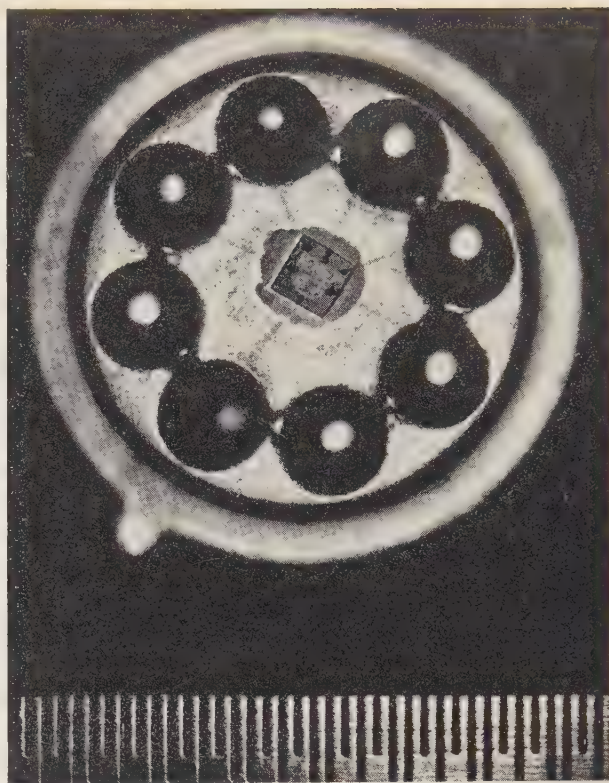


FIG. 9.

tures des composants séparés ou des micro-modules céramiques 2D.

En plus de ces dispositifs à technique avancée, on peut utiliser une plaquette de base en cristal semi-conducteur sur laquelle on dispose les éléments du circuit.

La figure 9 représente 2 transistors planar au silicium et 2 diodes planar au silicium montés et interconnectés sur la même base.

Cette technique peut être étendue à la réalisation de capacités à partir de jonction P.N.

Des résistances ou éléments à résistances peuvent être obtenues par évaporation de films métalliques.

Tout ceci implique des procédures très complexes qui se situent essentiellement au stade laboratoire et qui ne permettent pas une production efficiente à l'heure actuelle.

Ceci inclut des procédés compliqués comme la diffusion, les alliages, la gravure, la galvanoplastie et le dépôt de films minces de l'ordre du micron. Ceci est évidemment très coûteux; plus compliqué est le circuit fabriqué, plus faible est son rendement, plus élevé est son prix.

Il y a, pourtant, des applications où le facteur déterminant est bien la dimension, le prix ne constituant qu'un facteur secondaire.

Ces dispositifs nouveaux trouvent leur application dans des systèmes électroniques avancés tels que satellites et équipements similaires.

Un des principaux obstacles à franchir avant qu'un de ces dispositifs avancés puisse être utilisé à grande

échelle est l'épineux problème de la standardisation du circuit.

Evidemment ces dispositifs doivent être compétitifs avec les circuits miniatures de forme moins avancée, déjà employés.

Il semble peu probable que la production bon marché de types plus compliqués puisse être réalisée sans passer par des stades de pré-assemblages. Ceci n'est pas possible sans une plus grande standardisation des circuits.

Depuis plusieurs années on a essayé, sans notable succès, de standardiser davantage les composants passifs, les tubes électroniques, les transistors et les diodes, ceci dans l'intérêt de l'économie et de la fiabilité.

Il y a également d'autres problèmes importants tels que l'interconnexion des micro-circuits entre eux. Voilà où en est l'état actuel de la miniaturisation. Pour ce qui est de l'avenir, il y a tout le domaine des assemblages modulaires miniatures.

La deuxième application est une combinaison

d'assemblage modulaire avec des technologies plus avancées qui sont élaborées au stade laboratoire de recherches.

Cela accroîtra l'usage de circuits solides intégrés de tout genre.

En 1962 l'industrie électronique américaine produira environ pour une valeur de 3,7 milliards de dollars, dont environ 2,3 % (85 millions de dollars) utilisés dans les micro-circuits avancés. Vers la fin de 1972, la production de micro-circuits constitués sera environ 1 milliard de dollars-soit 15 % du total. L'industrie des composants continuera son extension plus compétitive que jamais. Il y aura toujours une place dans l'évolution des circuits électroniques pour la fabrication de composants et de leurs dérivés.

Cependant il est impératif qu'un fabricant de composants acquière une grande compétence dans la technologie des semi-conducteurs et films minces.

SPRAGUE ELECTRIC a fait un grand effort dans ce domaine. Forte de son expérience elle envisage l'avenir avec confiance.

LE MICROMODULE

PAR

R. COCHAIN

*Ingénieur des Travaux des Télécommunications
à la Section d'Etudes et de Fabrication
des Télécommunications*

J. SCHWEITZER

Chef de laboratoire à la C.S.F.

Introduction

Le type de « Micromodule » préconisé par la R.C.A. a été réalisé dans un programme du Signal Corps avec la collaboration d'un grand nombre de sociétés américaines. Il entre dans la catégorie des micro-circuits formés de composants distincts et de forme géométrique imposée.

On sait, en effet, que la réalisation de circuits miniature oblige, à la fois, à diminuer la taille des composants élémentaires et à perdre le moins de place possible en les interconnectant.

Des circuits peuvent être réalisés par un assemblage aussi compact que possible des composants de forme erratique que produit normalement l'industrie électronique. De tels entassements sont rarement satisfaisants, à moins qu'on impose certaines caractéristiques dimensionnelles aux éléments qui devront, dès lors, être tous conçus spécialement en vue d'un mode d'assemblage déterminé.

De nombreuses solutions ont été proposées ces dernières années pour atteindre le degré de compacité minimale de 200 000 composants par pied cube ⁽¹⁾ qui est généralement considéré comme le seuil du domaine de la microminiaturisation.

Les « Micromodules », dont il sera question ici, sont réalisés par l'empilement de microcomposants (ou microéléments) ayant tous le même contour en plan (fig. 1).

La voie des modes d'assemblages compacts conduit aux circuits intégrés dont les composants, qui ne sont plus extérieurement discernables, sont tous réalisés sur le même support.

Le micromodule est donc à mi-chemin entre les agglomérats de composants classiques et les circuits intégrés.

Lorsqu'il a été conçu en 1957, le « Micromodule Program » a voulu délibérément rester dans le domaine strict « des techniques acquises, de façon qu'un système pratique de micromodules puisse être réalisé dans le plus bref délai possible » [1]. On fixait à l'époque la date de sortie d'une production de masse pour 1962 [2] et le fait que ce délai soit sensiblement tenu [3]⁽²⁾ semble montrer qu'effectivement, ce programme, engagé avec des moyens importants,

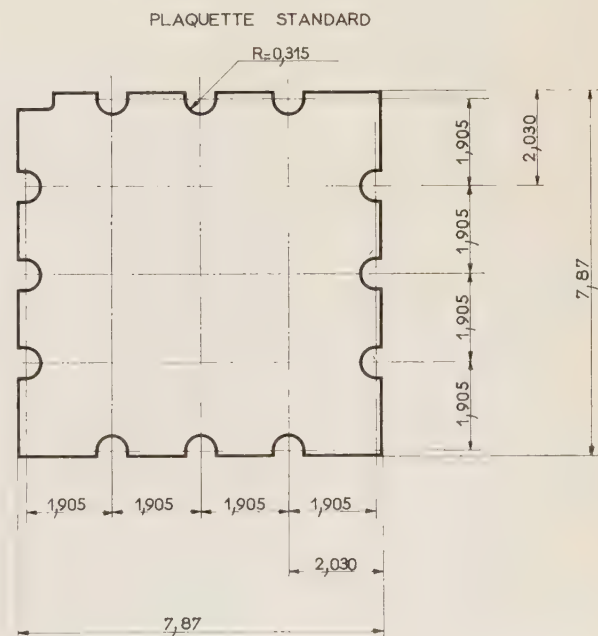


FIG. 1. — Plan de la plaquette microélément standard.

⁽¹⁾ L'emploi d'unités non métriques n'est tolérable que si elles aident la compréhension. Les 28 litres du pied cube correspondent à la contenance d'un tiroir d'électronique.

⁽²⁾ "Chief signal officer said last week that the micromodule program begun in 1958 is a success and that it is going into production of micro-module equipment and systems..." (Electronics 7 sept. 1962 p. 7).

n'a pas dû rencontrer de gros obstacles imprévisibles. En fait, l'industrie américaine a été très rapidement capable de réaliser une gamme complète de micro-composants.

A l'échelle européenne actuelle, le même travail semble davantage une question d'adaptation que de conception nouvelle. Le tableau I montre les résultats acquis par C.S.F. ⁽²⁾, avec des moyens relativement modestes, au bout des douze premiers mois d'étude. Ces résultats ne sont pas complètement disproportionnés avec ceux obtenus aux Etats-Unis pendant l'étape correspondante.

Principes de base

Initialement (en 1957) le problème de miniaturisation qui a abouti au micromodule se posait ainsi [2] :

1) On voulait réaliser un système rationnel qui, tout en conservant l'acquis technique des composants classiques, soit assez souple pour s'adapter aux tendances futures, et permettre, au départ, un gain de volume de l'ordre de 10 par rapport aux circuits fonctionnels classiques.

2) On fixait comme objectifs :

- une dissipation de l'ordre du watt par module ;
- la possibilité de fonctionner à une fréquence voisine de 100 MHz ;
- une tension maximale de service de 75 V, suffisante pour les applications des semiconducteurs ;
- la possibilité de réaliser, dans les limites ci-dessus, tous les types de circuits fonctionnels nécessaires au traitement de l'information (circuits HF, moyenne fréquence, basse fréquence, filtres, oscillateurs, circuits logiques, etc.).

3) L'étude du mode de connexion et de la forme des composants réalisables conduit naturellement à envisager des opérations automatisables, ce qui suppose de grosses séries.

4) La manipulation et la soudure de très petites pièces par des monteurs ou des dépanneurs non spécialisés est pratiquement à proscrire. Les opérations de montage des composants doivent donc être faites en usine et l'utilisateur de l'équipement ne doit avoir à sa disposition que des ensembles relativement robustes. L'unité de base n'est plus le composant, mais un « module » qui contient presque toujours un circuit fonctionnel de caractéristiques définies. Il est généralement constitué par un ou deux transistors et la dizaine de composants qui les accompagnent.

C'est au stade du module fonctionnel qu'il faut comparer les différents systèmes possibles de miniaturisation.

Il est nécessaire que le module ait une bonne stabilité de fonctionnement, qu'il conserve ses caractéristiques dans des conditions climatiques très diverses. De plus, il faut qu'il ait une durée de vie et un prix de revient tels que la maintenance ne soit pas d'un

coût prohibitif devant le remplacement individuel des composants défectueux d'un ensemble conventionnel.

Le pourcentage de défauts, par composant, au bout de 1 000 heures devrait être inférieur à 0,5 %.

Les défaillances du module peuvent être attribuées aux composants ou à leurs soudures. La tendance à profiter de l'acquis technique pousse à l'usage de composants séparés, soigneusement contrôlés avant montage. Une moins grande confiance dans la fiabilité des soudures conduit aux circuits intégrés : l'accent est alors mis sur la possibilité, en réalisant tous les composants dans la même opération, de limiter au maximum les dégradations dues aux manipulations et aux déformations, tout en ayant par évaporation sous vide de métal conducteur, des connexions irréprochables dans leur principe.

Dans le micromodule, tel qu'il a été finalement réalisé, le mode de connexion des composants provoque peu de contraintes et l'enrobage dans une résine protectrice diminue les risques de corrosion des soudures qui sont, classiquement, à l'étain-plomb.

5) Le paragraphe précédent impose pratiquement que les modules ne contiennent que des micro-composants de très bonne qualité. Cette nécessité est encore renforcée par la difficulté d'évacuer la chaleur dans les microcircuits. L'énergie dégradée doit être évacuée dans l'air ambiant et l'élévation de température interne du module est la somme de deux termes qui sont respectivement en L^{-2} et L^{-1} ce qui est défavorable à une miniaturisation qui serait seulement homothétique.

Ces considérations obligent à éliminer les diélectriques organiques et à prendre comme support des microcomposants des diélectriques céramiques dont la stabilité à chaud et la conductibilité thermique sont bien meilleures.

6) Il est nécessaire qu'un procédé d'assemblage rationnel soit compatible avec tous les composants susceptibles d'être mis en module. Les performances de l'ensemble sont donc limitées par celles du terme le plus médiocre.

A l'heure actuelle, les inductances sont les composants les plus réfractaires à la miniaturisation [3 G]. Elles sont cependant compatibles avec le degré de compacité choisi pour le micromodule. Celui-ci peut donc comporter des circuits accordés stables et être utilisé (par exemple) dans les étages H.F..

Description

Le principe du micromodule repose sur l'empilement de microéléments reliés par des connexions transversales. On a repris là certaines idées utilisées en 1954 par la Marine américaine dans la conception du système « Tinkertoy ». De nombreux circuits ont été réalisés depuis, de façon massive, suivant cette technique.

L'élément de base est ici une plaquette carrée en céramique de 8 mm (.3") de côté comportant trois encoches sur chaque côté (voir fig. 1). A l'époque de

⁽²⁾ Contrat SEFT 501/077/50.

ce choix, il paraissait impossible de réaliser une plaquette plus grande (12 mm par exemple) ayant à la fois la précision nécessaire (de l'ordre de 0,01 mm sur certaines cotes) et l'épaisseur minimale souhaitable (1/4 mm). Il aurait été facilement possible de mettre plusieurs composants sur la même plaquette. La dimension de 8 mm était alors la taille minimale compatible avec tous les composants envisageables.

Le choix de la nuance de céramique convenant à chaque composant oblige à résoudre des problèmes technologiques. On doit tenir compte de caractéristiques physiques comme la rigidité diélectrique, la constante diélectrique, l'angle de perte, la conductibilité thermique, et aussi de caractéristiques telles que la résistance mécanique, le degré de poli admissible, la constance du retrait après cuisson.

La réalisation d'une gamme étendue de composants exige l'emploi simultané de nombreuses nuances de céramique telles que l'alumine frittée, la stéatite, la forstérite, les pérovskites, etc. Les études américaines portèrent aussi sur les verres, le fotocéram, la glucine, etc.

Sur chacun des « timbres-poste » en céramique, on réalise un ou plusieurs composants. Une métallisation précise effectuée autour de chaque encoche permet la soudure d'un fil conducteur.

Les condensateurs sont réalisés simplement en disposant une électrode sur chaque face de la plaquette de céramique à haute constante diélectrique. Il est possible de réaliser des condensateurs multicouche pour obtenir des capacités de valeur élevée.

Les résistances sont faites par évaporation sous vide de métal résistant, au besoin à travers un masque

suivant une technique très employée dans les circuits intégrés.

D'autres composants, comme les condensateurs électrochimiques ou les inductances sont disposés sur la plaquette ou enchassés dans une cavité.

Les semiconducteurs (transistors et diodes) ont été conçus en 1958 de façon à être logés dans des plaquettes évidées de moins de 2 mm d'épaisseur. L'ensemble était rendu strictement étanche par des procédés de fermeture céramique-métal analogues à ceux utilisés pour les tubes à vide UHF. Heureusement, l'évolution technique depuis 1958 permet d'envisager des solutions moins malaisées. Ces progrès expliquent la facilité (très relative) avec laquelle on peut envisager le micromodule en 1962.

Les figures 2 et 3 montrent certaines réalisations.

Les techniques employées pour la plupart des microéléments sont directement dérivées de celles des composants classiques, moyennant un raffinement de précautions et l'emploi systématique d'une technologie qui se rapproche de l'horlogerie ou de l'orfèvrerie. Les rendements qu'on peut escompter sont donc de l'ordre de ceux des composants classiques équivalents.

Il a été pratiquement possible de réaliser par ces techniques les parties actives de tous les composants avec un encombrement maximal de 5×5 mm et une épaisseur variant de 0,2 mm pour certains condensateurs céramique à 2 mm au plus pour les éléments les plus encombrants, soit un encombrement utile de l'ordre de 25 millimètres cubes en moyenne.

On réalise un circuit fonctionnel en empilant plusieurs de ces microéléments et en soudant une cage de douze fils de connexion dans les encoches alignées

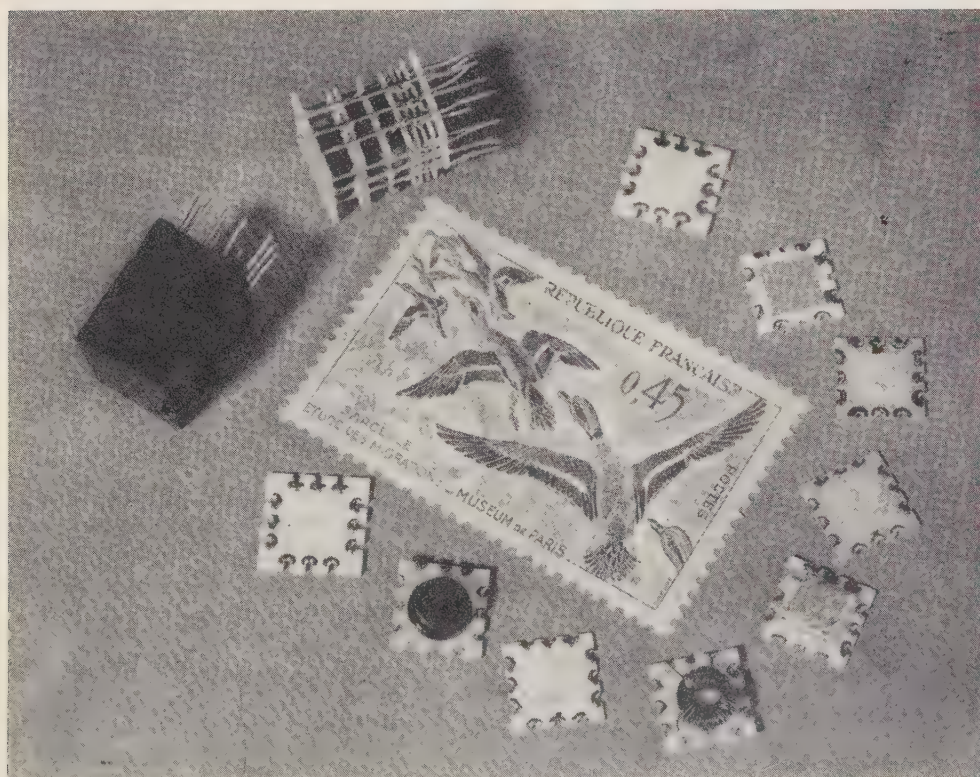


FIG. 2. — En tournant dans le sens des aiguilles d'une montre on reconnaît, au-dessus du timbre poste, une plaquette terminale qui joue un rôle purement mécanique dans le montage ; et successivement, une résistance, deux condensateurs céramique. Dans l'angle inférieur droit un condensateur électrolytique sec au tantale ($2,2 \mu\text{F}$ sous 25 V) un transformateur sur tore ferrique, puis après le condensateur céramique, un transistor et une plaquette d'extrémité. Dans l'angle supérieur gauche, les mêmes éléments montés « en cage » et le micromodule enrobé.

des microéléments superposés. Les parties actives des microéléments doivent être reliées aux encoches convenables, de façon que chacun des fils de la cage matérialise un des nœuds du circuit à réaliser.

Cette disposition se prête bien à la soudure du module sur circuit imprimé.

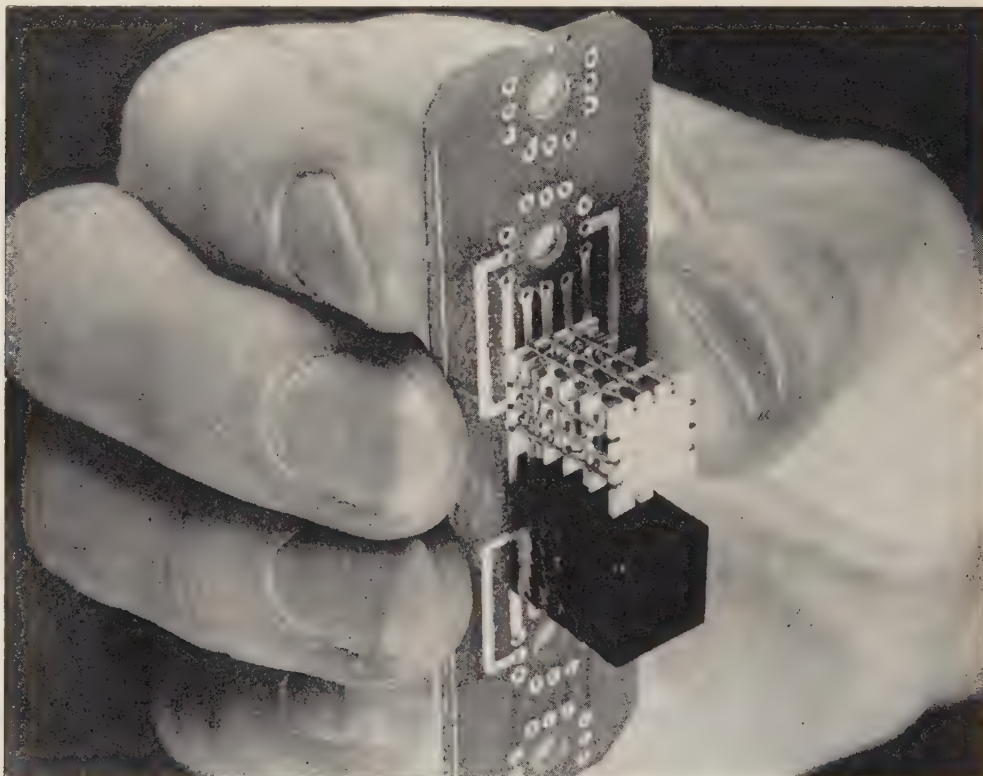
Le même mode d'empilement a été utilisé par ailleurs avec des plaquettes hexagonales [4] ou rondes [3 F], et on peut pratiquement leur appliquer toutes les considérations relatives au « Micromodule ».

On conçoit que chacune des opérations élémentaires

En 1959 DANKO, DOXEY et McNAUL pouvaient écrire que le degré de compacité du micromodule était « suffisant pour satisfaire les besoins à long terme de l'Armée » de leur pays [2].

Depuis trois ans le micromodule a fait l'objet d'une littérature en langue anglaise copieuse qui est probablement partiellement connue du lecteur et qu'on ne peut résumer que très rapidement [2, 6]. Le tableau II donne la liste des composants réalisés sous forme de microéléments par la R.C.A. On en déduit aisément les possibilités électroniques.

FIG. 3. — Micromodules sur panneau de circuit imprimé. La disposition de la figure permet de bien voir, sur le micromodule non enrobé, le mode d'empilement des microéléments et de soudure des fils de la cage. La disposition du panneau est évidemment factice.



soit susceptible d'être réalisée mécaniquement, à cause :

- de la forme des plaquettes ;
- de la bonne définition de leurs dimensions ;
- de la simplicité du mode de connexion des microéléments.

Le micromodule est enrobé dans une résine protectrice. Le module moyen d'une dizaine de composants a un volume moyen de l'ordre du centimètre cube pour une hauteur légèrement supérieure au centimètre.

Avec les unités habituellement employées cela correspond à une compacité minimale de 10 composants / cm³ ou de 300 000 au pied cubique. Cette valeur est dix fois plus grande que celle obtenue avec des composants classiques. On pourrait l'augmenter sans remettre le système en cause.

Les objectifs fixés ont été assez bien tenus :

- L'automatisation des opérations paraît en vue.

— Le degré de fiabilité initialement souhaitable est largement dépassé ; une récente analyse de défauts [5, XV] portant sur plus de 400 modules maintenus en essai d'endurance pendant près de 8 000 heures, ce qui donne un total de près de 3 000 000 de module $\times$ heures, présente 10 défauts. Le module de 10 microéléments aurait donc une durée moyenne de service de 270 000 heures et le microélément une probabilité de défauts de 0,036 % au bout de 1 000 heures.

Sur ce total, aucun défaut n'était attribuable aux soudures.

- La disposition parallèle des plaquettes et des fils n'amène pas de fréquence de coupure avant 70 MHz.

— À la température ambiante, il est possible de dissiper de l'ordre du demi-watt par module, ce qui est plus que suffisant pour le traitement de l'information. Le fonctionnement à des températures supérieures est possible, à condition de conserver la même température « à cœur ».

Le micromodule a été d'abord adapté par la R.C.A. à un émetteur récepteur portatif (adaptable au casque du fantassin) fonctionnant dans la gamme des 50 MHz avec une puissance modulée de 150 mW.

Un calculateur « Micropac » contenant entre autres 2 000 micromodules a été développé et plusieurs applications ont été trouvées dans des domaines tels que la réalisation des tables de guidage par inertie, le matériel aéronautique de bord, etc.

Possibilités

La conception du micromodule répond bien aux exigences des essais climatiques les plus sévères. Le tableau III donne une liste d'applications possibles des micromodules avec les caractéristiques de fiabilité prévues :

— la stabilité de fonctionnement à 85° d'ambiance est acquise et les derniers rapports américains [5], semblent indiquer que les conditions de fonctionnement dans une ambiance de 125° sont bien définies.

— la tenue aux chocs, aux vibrations et aux accélérations est bonne, à cause de l'armature constituée par les fils de la cage de connexion enrobée dans du plastique ;

— l'étanchéité du revêtement garantit pratiquement la tenue à très haute altitude et en atmosphère humide, même de façon prolongée.

Le micromodule constitue donc un moyen d'attaque concret des problèmes que pose actuellement la miniaturisation des équipements.

L'existence de circuits fonctionnels modulaires obligera à concevoir les circuits électroniques davantage comme des assemblages de fonctions prédéterminées que comme des câblages de composants. Leur mise sur le marché, quel qu'en soit le mode de réalisation, amènera pratiquement à sélectionner certains d'entre eux qui, fabriqués préférentiellement en grande série seront, au moins en fait, normalisés. Un certain nombre des systèmes actuellement envisagés ne sont guère concevables qu'avec une normalisation préalable des circuits fonctionnels. Pour le micromodule (ce qui est spécialement intéressant dans l'optique européenne actuelle) ce changement de conception n'oblige pas à une normalisation préalable et peut être progressif. Au stade du montage du micromodule, on conserve en effet la souplesse de réalisation des circuits électroniques conventionnels. Il est donc possible pendant les phases préliminaires de développement d'un matériel, de réaliser des micromodules pratiquement à la demande, à partir d'un stock de microéléments. Moyennant quelques précautions technologiques, ce montage peut d'ailleurs être fait par le réalisateur de l'équipement.

On peut ainsi construire des matériels à l'unité, avec un degré de miniaturisation valable. Cela permettra d'attendre le moment où la normalisation inévitable des circuits fonctionnels sera le plus souhaitable. On préparera ainsi la voie à des solutions plus compactes, mais qui se prêtent mal aux tâtonnements.

Tendances

Le micromodule constitue actuellement une solution rationnelle des problèmes de microminiaturisation. C'est un système qui, tout en conservant des possibilités d'évolution, permet d'utiliser les caractéristiques les plus intéressantes des meilleurs composants conventionnels en leur procurant, par la mise en module étanche, une stabilité et une tenue climatiques excellentes.

Quelle peut en être l'évolution ?

On peut augmenter la compacité des micromodules en employant systématiquement des plaquettes à plusieurs composants ; un gain en volume de 30 à 50 % peut être attendu du développement normal des possibilités actuelles. La limite est de parvenir à réaliser un étage fonctionnel par plaquette. Ce n'est pas un objectif irréalisable (3 E) : On aurait ainsi un étage fonctionnel occupant moins de 200 mm³. Mais il serait sans doute préférable de « digérer » d'abord le bond en avant que constitue le passage actuel, pour un circuit fonctionnel, de 10 à 1 centimètre cube, car le « foisonnement » qui se produit inévitablement dans les équipements leur donne une compacité pratique moins bonne, de plusieurs ordres de grandeur, que celle des circuits fonctionnels séparés. C'est ainsi que PRIOR [3 B] limite pratiquement à 20 000 le nombre de composants que peut contenir un tiroir d'un pied cubique.

La microminiaturisation n'a de sens qu'à l'échelle d'un matériel complet, et même si l'électronique en constitue la partie la plus importante, il faut inclure dans le bilan tout ce qui est nécessaire à la réalisation de la fonction, notamment les piles (ou l'ensemble génératrice + combustible) [3 D].

D'après DANKO *et Alii* [2] la microminiaturisation peut affecter 70 à 80 % des circuits, mais la partie non miniaturisable de l'équipement pèsera d'un poids considérable dans le bilan total. Le gain en encombrement (ou en poids) de l'équipement complet, obtenu au prix d'une réduction dans le rapport 10 de l'électronique, ne peut guère dépasser le facteur 3. Il faut donc chercher des solutions réduisant dans une proportion comparable l'encombrement des composants périphériques des antennes [3 G], des transducteurs électro-mécaniques, etc.

Faut-il attendre des composants périphériques « le lent et sporadique rétrécissement dimensionnel soumis aux fluctuations de techniques à la limite de l'art » que DANKO *et Alii* [2] déploraient, il y a trois ans, des composants conventionnels ?

Les conditions qui ont alors nécessité la mise sur pied d'un programme cohérent de réduction dimensionnel et de compactage des composants électroniques se trouvent également réunies pour les com-

posants périphériques, les transducteurs électromécaniques, les générateurs ou les batteries, etc.

Les problèmes de connexion sont également importants. L'encombrement d'un composant obtenu par les techniques conventionnelles peut être de l'ordre de 25 mm³, ce qui représente le volume de 3 centimètres de conducteur isolé et moins que celui de tous les connecteurs démontables connus de nous. La demi-douzaine de fils qui relie obligatoirement un circuit fonctionnel au monde extérieur est actuellement moins encombrante qu'un micromodule, mais tout gain nouveau de compacité des circuits posera de façon grave le problème de l'encombrement des fils de connexion. Il y aura donc une difficulté à réaliser à la fois des circuits fonctionnels suffisamment simples pour avoir des possibilités d'emploi générales et à les placer en grand nombre dans des équipements, avec la concentration qu'on pourrait en attendre.

La diminution de l'espace inutilisé dans un équipement oblige aussi à résoudre des problèmes de transfert de chaleur qui se traduisent actuellement par une élévation de la température interne. Il y a certainement un gain à espérer de révisions fondamentales de la conception des circuits permettant de diminuer la puissance nécessaire au traitement de l'information, c'est-à-dire pratiquement de réduire le niveau du bruit de fond [7]. On peut en dire autant de diminutions de la puissance nécessaire aux transducteurs électromécaniques qui soulageraient les étages de sortie, allégeraient les batteries, etc.

Dans l'état actuel, c'est sans doute la solution de ces problèmes marginaux qui pourrait le mieux permettre la réalisation d'équipements miniaturisés de façon cohérente.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Second engineering analysis report for micromodule production programm. R.C.A. Camden N.J., nov. 30, 1961.

[2] DANKO S.F., DOXEY W.L., McNAUL J.P., The micromodule. A logical approach to microminiaturization. *Proc. of I.R.E.* 1959, may, p. 894-903.

[3] Microminiaturization. Proceedings of the 1961 Agard Conference (Pergamon 1962).

A) DANKO S.F., p. 96-115. The micromodule approach to microminiaturization.

B) PRIOR H.T., p. 121-136. A flexible approach to micro-modular construction.

C) PARKER H.B., p. 24-32. Microelectronics : from feasibility to use.

D) BERTRAIS J., p. 45-65. Méthodes d'optimisation appliquées à la microminiaturisation (voir aussi C.R. Acad. Sci. 1957, 27 mai, p. 2695-2698).

E) KIHN H., p. 65-94. Some recent developments in integrated electronics and systems.

F) DUNN S.C., p. 115-121. The design of a standard microelement.

G) APSTEIN M., p. 194-197. Recent progress in micro-electronics.

[4] CHASSMANN E.R. *Siemens Zeitschrift*, 34, 1960, 11, p. 766-771.

[5] Micromodule Production programm. Quaterly progress reports R.C.A. Camden N.J. Signal Corps Contract, n° DA 36-039 SC 75968. Rapports I à XVI couvrant la période d'avril 1958 à avril 1962.

[6] *X Electronics*, nov. 25, 1960, p. 87-91. Microminiaturization. New form factors.

[7] GROSVALET J. — Communication personnelle.

TABLEAU I

Composant	Principales caractéristiques		Observations
	Type		
Résistance	haute stabilité	100 Ω à 100 kΩ par résistance 1/10 W par résistance $K \theta = 200.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ Tolérance 5 %	1 ou 2 résistances par plaquette
Condensateurs	céramique type I	$U_n = 25 \text{ V}$ $C_n 0 - 1\,600 \text{ pF}$ tolérance $\pm 10 \%$ $\text{tg } \delta \leq 10.10^{-4}$ $K \theta$ de $+ 100$ à $- 700.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Condensateurs monocoques, les valeurs plus classiques sont obtenues par empilage.
	céramique type II	$U_n = 25 \text{ V}$ $C \leq 5\,000 \text{ pF}$ Variation dans la gamme de température de fonctionnement $+ 30 - 50 \%$ $\pm 30 \%$	»
	au tantale sec	$U_n \leq 35 \text{ V}$ Charge de 50 à 100 μC $\text{tg } \delta \leq 6 \%$ $I_f \leq 0,01 \mu\text{A}/\mu\text{F.V}$	
Quartz		$f \geq 45 \text{ MHz}$ Stabilité 0,001 %	au stade prototype
Transistors		Mesa Germanium sous boîtier TO 46 Série 2N 1 398 à 2N 1 402	en cours de développement
Diodes		Or Germanium	»

TABEAU II

Composant	Principales caractéristiques		Observations
	Type		
Résistances	type haute stabilité	10 Ω à 400 kΩ par résistance 1/8 W par résistance $K \theta = 200.10^{-6} / ^\circ\text{C}$ Tolérance 1 %	Jusqu'à 4 résistances par plaquettes
	usage courant	10 Ω à 600 kΩ par résistance 1/8 W par résistance $K \theta = 300.10^{-6} / ^\circ\text{C}$ Tolérance 2 %	»
Condensateurs	céramique type I	$U_n = 50 \text{ V}$ $C_n \leq 2\,200 \text{ pF}$ $\text{tg} \delta < 0,1 \text{ \%}$	à 1 MHz
	céramique type II	$U_n = 50 \text{ V}$ $C \leq 0,02 \text{ }\mu\text{F}$ $U_n = 25 \text{ V}$ $C \leq 0,5 \text{ }\mu\text{F}$ $\text{tg} \delta \leq 1,5 \text{ \%}$	à 1 MHz
		$\frac{\Delta C}{C}$ dans la gamme de température de fonctionnement $\pm 15 \text{ \%}$ ou + 30 % — 50 %	
	céramique de prévi- sion	$U_n = 50 \text{ V}$ $C_n \leq 5\,000 \text{ pF}$ $\text{tg} \delta < 0,01 \text{ \%}$	à 1 MHz
	au tantale sec	$U_n \leq 35 \text{ V}$ $\text{tg} \delta \leq 5 \text{ \%}$ $I_n \leq 0,94 \text{ }\mu\text{A} / \mu\text{F.V.}$ charge 60 μC à 450 μC	
	Trimmer	$U_n = 50 \text{ V}$ $Q \geq 500$ $K \theta \pm 50.10^{-6} / ^\circ\text{C}$ Gamme 1,5 à 5 pF — 3 à 10 pF 7,5 à 25 pF	
Quartz		Gamme 7 à 70 MHz Stabilité 0,005 %	
Inductance	Inductance Transformateur pour impulsion	$K \theta < 50.10^{-6} / ^\circ\text{C}$ $L \leq 100 \text{ }\mu\text{H}$ $K \theta > 350.10^{-6} / ^\circ\text{C}$ $L \geq 1,5 \text{ mH}$	en cours de dévelop- pement
Diodes	usage général	Tension crête inverse 100 V 400 mA Type équivalent aux 1N 277 et 1N 658	
	Commutation rapide	Tension crête inverse 40 V 50 mA Type équivalent au 1N 914	
	Redresseur de puissance	Tension crête inverse 600 V 750 mA Type équivalent au 1N 547	
Diodes	Zener	1 W 6,2 V et 400 mW 4,9 V Type équivalent au 1N 750	
Transistors	HF	Ampli HF — oscillateur 70 MHz Type équivalent au 2N 1 225	
	de puissance	1/2 W à 70 MHz	en cours de dévelop- pement
	Commu- tation	1 à 5 μs 120 V Types équivalents aux 2N 404 et 2N 699 < 1 μs 100 mA Types équivalents aux 2N 1 132, 2N 706, 2N 705 et 2N 501	

TABLEAU III

Utilisation	Gamme de température de fonctionnement	Vibrations	Altitude	Vie moyenne pour un module de 50 composants	Chocs	Centrifugation
Télécommunications terrestres matériel porté	— 55 °C + 85 °C	10 à 55 Hz	3 000 m	15 000 h portées par la suite à 100 000 h	50 g front 10 ms	
Télécommunications terrestres Matériel sur véhicule	— 55 °C + 85 °C porté ultérieurement à 125 puis 200 °C	10 à 55 Hz	4 000 m	15 000 h portées ultérieurement à 100 000 h	50 g front 10 ms	
Missiles	»	10 à 2 000 Hz	50 000 m	8 000 h	»	
Fusées de proximité	— 55 °C + 85 °C	10 à 2 000 Hz		8 000 h	15 000 g front 4 ms durée totale 8 ms	20 000 tr/mn et 25 mm de rayon
Satellites	— 55 °C + 85 °C	10 à 2000 Hz		15 000 h portés ultérieurement à 100 000 h	»	»

MICROMINIATURISATION ÉLECTRONIQUE

PAR

A. BOBENRIETH

*Chef du Service Dispositifs Spéciaux
SESCO*

1. Introduction

L'idée de réduire le plus possible le volume et le poids des appareils électroniques est aussi vieille que l'Électronique elle-même. Mais jusqu'à ces dernières années cette tendance, souhaitable pour faciliter le logement et le déplacement des ensembles électroniques, n'était pas imposée par des nécessités impérieuses et était par ailleurs freinée par le volume important et la consommation élevée des tubes électroniques, même de ceux dits « miniature ».

C'est l'avènement de l'ère spatiale qui a rendu indispensable le développement de la microminiaturisation pour l'équipement électronique des engins : missiles, satellites etc., dans lesquels le volume libre est très limité et pour lesquels chaque kilogramme de charge utile exige un poids important de superstructure et de combustible.

C'est par ailleurs le développement industriel des dispositifs à semiconducteurs petits, légers et peu gourmands en énergie qui a permis d'envisager sérieusement cette réduction en volume et en poids des ensembles électroniques.

Il est donc heureux que deux techniques aussi dissemblables, l'une, celle des engins spatiaux tournée vers l'infiniment grand et l'autre, celle des semiconducteurs orientée vers l'infiniment petit, aient pris leur essor au cours de la même décennie : 1950-1960.

Depuis la reconnaissance ($\simeq 1957$) de la nécessité et de la possibilité de réaliser la microminiaturisation d'ensembles électroniques, on assiste à une course spectaculaire dans ce sens entre les chercheurs de quelques grands laboratoires mondiaux, la plupart aux U.S.A., spécialisés en Électronique et en particulier dans l'étude et la fabrication des semiconducteurs. Nous donnerons un peu plus loin quelques indications sur les principales méthodes de microminiaturisation actuellement en développement dans

le Monde, avant de décrire celle retenue à C.F.T.H.-SESCO.

En plus de la réduction du volume et du poids qui en est le résultat le plus immédiat, les buts de la microminiaturisation sont les suivants :

— Améliorer la fiabilité par suite de la diminution du nombre d'interconnexions, de la plus grande rigidité des ensembles, de la possibilité de réaliser plus tard une fabrication plus ou moins automatique. Ce but est considéré par beaucoup comme le plus important et il est certain par exemple que pour des satellites à longue durée il est fondamental.

— Diminuer la durée du traitement de l'information dans les calculateurs. Etant donnée la vitesse finie de propagation des signaux dans les conducteurs ($1 \text{ ns} \text{ — lumière } \simeq 30 \text{ cm}$) il y a intérêt à construire des ensembles petits pour augmenter la vitesse de manipulation des informations. Cet aspect fondamental de la microminiaturisation deviendra important pour la prochaine génération de calculateurs (cycles d'une dizaine de nanosecondes).

— Enfin réduire le prix de revient avec l'augmentation des cadences de fabrication, par une automatisation poussée. Mais la mise au point des diverses méthodes à coûté et coûtera encore très cher.

2. Les principales méthodes de microminiaturisation

2.1. DENSITÉ DE COMPOSANTS

La performance en microminiaturisation s'exprime par la densité de composants obtenue. Elle est donnée Outre-Atlantique par pied-cube ou inch-cube.

Nous l'indiquerons par dm^3 ou cm^3 , unités plus courantes sur le Marché Européen... Il faut se méfier de ce « jeu du nombre » qui peut être fallacieux si l'on ne précise pas à quels types de composants et à

quel stade d'assemblage il se rapporte : partie utile d'un circuit fonctionnel ; circuit fonctionnel terminé, sous-ensemble ou petit ensemble, gros ensemble. Les chiffres que nous indiquerons sont approximativement valables pour des sous-ensembles ou petits ensembles comportant une centaine de composants.

Alors qu'avant 1940, cette densité ne dépassait guère quelques composants par dm^3 elle est passée progressivement à quelques dizaines après le lancement des tubes et composants miniatures (1945-1950), puis à quelques centaines après le développement industriel des dispositifs à semiconducteurs (1955-1959 : poste radio classique) et peut atteindre et même dépasser, aujourd'hui environ $1\,000/\text{dm}^3$ ou $1/\text{cm}^3$ en utilisant les composants « subminiatures » (transistors, diodes, résistances, condensateurs les plus récents 1960-61 : aide-ouïe par exemple) assemblés de façon classique (soudure à l'étain) ou mieux par soudure électrique plus propre, plus rapide et plus fiable :

Au delà débute la microminiaturisation qui se caractérise :

— Soit par l'utilisation de composants de forme et constitutions spéciales, assemblés de façon particulière.

— Soit par l'emploi de méthodes nouvelles pour réaliser non plus des composants séparés, assemblés ultérieurement, mais directement des circuits fonctionnels monolithiques sur des supports isolants ou semiconducteurs. Ces procédés d'avant garde constituent plus particulièrement ce qu'il est convenu d'appeler : l'Électronique moléculaire ou « Moléculaire » ou « angstronique ».

A un récent Congrès de spécialistes qui a eu lieu à Oslo (juillet 1961) il a été convenu de classer les diverses méthodes en développement dans le monde en trois grandes catégories :

- les micromodules
- les microcircuits
- les circuits solides

Nous allons indiquer brièvement les principes de base de ces trois grandes catégories, ce qui nous permettra plus loin de mieux situer la méthode développée à C.F.T.H.-SESCO.

2.2. MICROMODULES

Ce système est caractérisé par l'utilisation de composants électroniques séparés mais ayant tous une forme commune et qui sont assemblés en modules fonctionnels de façon compacte. Le type le plus connu et dont le développement est le plus avancé est le micromodule R.C.A. étudié sous contrat du Signal Corps de l'U.S. Army. C'est le descendant « transistorisé » des Tinkertoys développés vers 1950-1953 par l'U.S. Navy et qui employaient des tubes « miniatures ».

Il est caractérisé par l'utilisation de composants ayant tous une base carrée identique ($0,31'' \times 0,31'' \simeq 8 \times 8 \text{ mm}^2$) mais une épaisseur variable suivant

le type de composants. Les supports carrés sont généralement en verre ou en alumine, plus rarement en céramique ferroélectrique ou en ferrite, selon le type de composant. Ils sont munis de 12 encoches (3 par côté) métallisées dont quelques unes sont réunies aux pôles du composant. Les supports de résistances sont minces $\simeq 0,25 \text{ mm}$ et peuvent en comporter 4, ce qui correspond à la densité assez importante d'environ $100/\text{cm}^3$. Par contre, il n'y a qu'un transistor par plaquette de 8×8 et l'épaisseur est alors de 2 à 2,5 mm, ce qui donne à peu près 5 transistors/ cm^3 (le capot TO 18 permet $6/\text{cm}^3$). Quant aux transformateurs H.F. et M.F. et aux inductances ils sont réalisés sur des tores en ferrite doux fixés sur un support de 8×8 et l'ensemble a une épaisseur de 3 à 4 mm ($3/\text{cm}^3$).

Les modules fonctionnels sont obtenus par empilement selon un ordre rationnel des divers composants entrant dans le schéma et par interconnexions appropriées entre composants par des fils latéraux réunissant certaines des encoches métallisées. Les liaisons sont faites par soudure à l'étain, ce qui paraît être un inconvénient du procédé du fait de l'échauffement important des composants et de la nécessité d'éliminer complètement le flux utilisé. L'ensemble est enrobé dans un plastique et capoté. Un circuit fonctionnel moyen (1 étage M.F., 2 étages B.F., une bascule, etc.) comportant une dizaine de composants divers se présente sous la forme d'un cube d'un volume de l'ordre du cm^3 . La densité obtenue à ce stade n'est donc que d'environ $10/\text{cm}^3$, ce qui est suffisant pour des appareils de télécommunications, mais un peu faible pour des circuits de calculateurs. Cependant la méthode est assez souple et ce chiffre pourra être amélioré dans l'avenir, par exemple en montant sur les plaquettes des circuits solides dont nous parlerons plus loin.

Signalons qu'à la fin du contrat qui s'étale sur 6 ans (1958-1963) R.C.A. et ses sous-traitants auront perçu de l'U.S. Army la bagatelle de 15×10^6 \$ ($\simeq 10^{10}$ anciens francs). L'un des avantages présumés de cette méthode est la possibilité d'automatiser la fabrication des composants et leur assemblage en modules fonctionnels. C'est ce que R.C.A. doit encore démontrer d'ici l'année prochaine. Pour l'instant cette firme a déjà réalisé en prototypes : un poste récepteur individuel d'infanterie et un petit calculateur car la méthode a, comme autre avantage, celui de permettre la fabrication de ces deux types de circuits.

2.3. MICROCIRCUITS

Il a été convenu de réserver le nom de microcircuits à ceux qui sont élaborés sur des supports plans généralement en verre ou céramique, par divers procédés dont le plus prometteur est l'évaporation sous vide. A la différence du micromodule R.C.A. il y a un circuit fonctionnel complet sur chaque support qui est généralement un peu plus grand ($12,5 \times 12,5 \text{ mm}^2$) que celui des micromodules ($8 \times 8 \text{ mm}^2$).

De tels circuits, sous des appellations et des variantes diverses sont en étude dans de nombreux

laboratoires officiels (D.O.F.L. aux U.S.A., R.R.E. en U.K.) ou privés (GECO, I.B.M., B.T.L., SYLVANIA, MULLARD, R.C.A., VARO, etc.). Ce développement paraît devoir s'effectuer en deux étapes :

a) Le microcircuit *partiel* parce que seules les connexions, les résistances et les petites capacités sont déposées sur le support plan par : peinture, impression à l'écran de soie ou évaporation sous vide, alors que les composants semiconducteurs enrobés ou encapsulés dans des microcapots, ainsi que les gros condensateurs (céramique, tantale) et éventuellement les inductances sont rapportés et logés en général dans des alvéoles pratiqués dans la plaque support. C'est le stade actuel de développement des microcircuits.

b) Le microcircuit *complet* c'est-à-dire dans lequel tous les composants seront réalisés par dépôt sur le support, probablement par évaporation sous vide. C'est le but final vers lequel tendent les efforts des chercheurs engagés dans cette méthode de micro-miniaturisation. Devant la difficulté de réaliser des couches monocristallines par évaporation sous vide et épitaxie, il est possible que les composants actifs ne soient pas des diodes et des transistors classiques mais soient du type sandwich métal-diélectrique (tunneltron GECO et Republic Aviation) ou semiconducteur diélectrique-métal (Metal Interface Amplifier de PHILCO) ou encore en sulfure de cadmium évaporé en couche polycristalline (transistor à effet de champ R.C.A.).

Cette méthode du circuit plan complet est certainement appelée à un grand avenir. Elle supplantera probablement un jour le circuit solide ou en tout cas le complétera, mais les difficultés à vaincre sont encore importantes avant d'atteindre le stade industriel.

La densité de composants obtenue avec le circuit plan partiel oscille entre 10 et 100 par cm^2 . Celle du circuit plan complet pourra être considérable 1 000 à 10 000 par cm^2 si d'ici sa mise au point le problème de la microconsommation est résolu. Cette haute densité n'a d'intérêt, comme on l'indiquera plus loin, que pour les calculateurs.

2.4. CIRCUIT SOLIDE

Dans ce procédé chaque circuit fonctionnel est réalisé sur un seul bloc de semiconducteur, en général du silicium (pour l'instant) par la mise en œuvre de divers procédés technologiques délicats tels que : l'usinage mécanique ou chimique, la diffusion, généralement avec masque d'oxyde obtenu par photogravure, l'évaporation sous vide (en particulier pour les interconnexions), l'alliage, l'épitaxie par pyrolyse, etc.

On conçoit qu'une telle méthode soit difficile à développer et surtout à industrialiser avec un bon rendement. Par contre elle permet d'obtenir une densité de composants considérable : $\simeq 10$ pour $0,1 \text{ mm}^2$ dans le bâtonnet de silicium constituant un circuit fonctionnel, ce qui peut conduire à écrire par une extrapolation hardie que la densité obtenue est

$\simeq 100$ millions/ dm^3 . Pratiquement trois raisons limitent, au moins provisoirement, cette densité à la valeur déjà respectable de quelques centaines de mille par dm^3 (quelques centaines par cm^3) :

— d'abord la nécessité de munir chaque circuit fonctionnel de quelques connexions, soit pour compléter celles qui ne sont pas faites par le bâtonnet lui-même, soit surtout pour le relier à la source d'alimentation et aux autres circuits constituant l'ensemble.

— ensuite l'obligation d'encapsuler chaque circuit solide dans une boîte étanche pour protéger les jonctions et ne pas compromettre la bonne fiabilité que permet d'espérer par ailleurs cette méthode du fait qu'elle diminue le nombre d'interconnexions entre composants.

— enfin l'échauffement résultant de l'énergie dissipée. L'étude en cours de circuits à microconsommation permettra de mieux utiliser les possibilités de cette méthode et de la précédente (microcircuit complet). (Voir plus loin).

Le procédé du circuit solide est en développement chez TEXAS INSTRUMENTS (U.S.A. et U.K.), soutenu par l'U.S. Air Force (Contrat du même ordre que celui de l'Army avec R.C.A.) chez Westinghouse (blocs fonctionnels), chez Plessey, chez Fairchild, chez P.S.I., à la GECO, etc.

On a annoncé récemment dans la presse technique que TEXAS INSTRUMENTS vient de livrer à l'U.S. Air Force un prototype de calculateur comportant environ 600 circuits logiques de chacun à peu près 10 à 15 composants et ayant un volume de l'ordre de 100 cm^3 , donc avec une densité de $80/\text{cm}^3$ environ.

On voit que le volume total est plus de 1 000 fois le volume utile par suite des trois raisons citées plus haut.

On peut reprocher à cette méthode, fort belle du point de vue technique, une certaine difficulté de transposition immédiate des circuits fonctionnels classiques d'autant plus, comme on le verra plus loin, que le problème des inductances doit être contourné. Il faut en général repenser les circuits à l'échelon fonction et faire une étude topologique assez difficile pour placer judicieusement les composants qui, souvent, ne sont plus localisés, mais répartis ou remplacés par des fonctions nouvelles. Tout ceci limitera un peu, au moins dans l'immédiat, la généralisation de ce procédé qui se partagera probablement l'électronique de l'avenir avec celui du microcircuit complet décrit plus haut.

D'une façon générale et malgré leur enthousiasme, les promoteurs ou représentants de ces diverses méthodes, présents à Oslo, ont convenu que le stade industriel et commercial ne serait pas atteint avant un ou deux ans.

2.5. QUELQUES PROBLÈMES GÉNÉRAUX LIÉS À LA MICROMINIATURISATION

Nous terminerons ce chapitre par quelques brèves remarques sur un certain nombre de questions classiques liées à la Microminiaturisation.

2.5.1. Inductance

L'ennemi N° 1 du miniaturiste est l'inductance (choc, transfo H.F. et M.F.). Les tentatives faites pour obtenir des inductances par évaporation dans le cas des microcircuits ont été jusqu'ici assez décevantes (Q trop bas). En ce qui concerne le circuit solide, la réalisation d'une inductance classique ne paraissant pas possible, on essaie de contourner le problème en remplaçant ce composant par une fonction équivalente. A TEXAS INSTRUMENTS par exemple on a construit un amplificateur sélectif grâce à une contre-réaction à travers un filtre $R-C$ réparti, constitué par une couche diffusée de forme appropriée. Cependant avec ce procédé le remplacement de l'inductance paraît poser des problèmes délicats dans chaque cas.

Même dans les méthodes moins évoluées comme le micromodule R.C.A. ARMY, l'inductance (transfo H.F., M.F. etc.) est le composant le plus épais (3 mm) donc le plus volumineux (200 mm³) et l'utilisation d'un tore, outre les difficultés de bobinage, impose certaines limitations (par exemple difficultés pour réaliser un couplage lâche).

2.5.2. Circuits de calculateurs. Circuits de Télécommunications.

Les hautes densités indiquées plus haut, ne tiennent pas compte, bien entendu, des composants qui ne sont pas ou sont difficilement microminiaturisables : haut-parleur, microphone, écouteur, pile, condensateur variable, potentiomètre, interrupteur, guide d'onde, etc.

Il est donc clair que la Microminiaturisation poussée s'applique avant tout aux circuits de calculateurs qui ne comportent que des résistances, des petites capacités, des diodes et des transistors et qui, de plus, consomment peu, plutôt qu'aux circuits de télécommunications. C'est bien d'ailleurs en premier lieu pour réaliser des calculateurs d'engins spatiaux que ces méthodes avancées ont été développées. On ne voit pas, par exemple, l'intérêt de construire un poste récepteur militaire ou civil, qui comporte environ une centaine de composants, dans un volume inférieur à celui d'une petite boîte d'allumettes : $\simeq 25 \text{ cm}^3$ (4/cm³). Par conséquent, étant donné les dimensions de l'Homme, une densité de l'ordre de 10/cm³ au maximum paraît amplement suffisante pour réaliser du matériel mobile de télécommunications. Même sur un engin non habité une telle densité paraît suffisante pour la partie télécommunication qui est généralement assez réduite. Par contre pour les calculateurs qui pourront peut-être comporter dans l'avenir jusqu'à 10⁶ composants, il est souhaitable d'augmenter cette densité. Cependant là aussi il y a évidemment une limite raisonnable qu'il ne semble pas nécessaire de dépasser. Elle nous paraît être de l'ordre de 100/cm³ (10 fois celle des appareils de télécommunications) ce qui donne un volume de 10 dm³ pour un calculateur complexe qui comporterait 10⁶ composants.

2.5.3. Dissipation

Il y a d'ailleurs une autre raison, celle là impérative actuellement, pour ne pas dépasser cette densité : c'est l'échauffement résultant de l'énergie dissipée dans les circuits. On peut estimer que la consommation dans les circuits modernes évolués est de l'ordre de 1 mW en moyenne par composant, soit 1 kW pour le calculateur de 10⁶ composants envisagé plus haut. Il serait déjà difficile dans ce cas d'évacuer l'énergie dissipée dans un volume de 10 dm³ (forme plate de grande surface : $10 \times 10 \times 0,1 \text{ dm}^3$).

La pleine utilisation des possibilités du circuit solide et du microcircuit est donc liée à une réduction de la consommation. Des études dans ce sens sont en cours, par exemple chez FAIRCHILD où l'utilisation de transistors type 2 N 917 semble permettre un fonctionnement correct avec un courant collecteur de 10 μA et une tension de 3 V ($3 \times 10^{-5} \text{ W}$). Ceci se paie cependant par une baisse importante de la vitesse de commutation (1 μs à 10 μA au lieu de quelques nanosecondes à quelques mA). Il paraît donc difficile d'obtenir simultanément dans un proche avenir une grande vitesse de manipulation et une faible consommation. La solution de ce problème sera peut-être possible avec la troisième génération de composants actifs, ceux du genre Metal Interface Amplifier (PHILCO) qui sont en étude et prendront probablement la relève (au moins partielle) des tubes à vide et des transistors dans quelques années.

En tous cas, dans l'immédiat, on peut conclure des remarques ci-dessus, que les densités suivantes : 5 à 10/cm³ pour les appareils de télécommunications, 50 à 100/cm³ pour les manipulateurs d'informations sont suffisantes.

2.5.4. Interconnexions

L'un des problèmes importants que pose la microminiaturisation est celui de l'interconnexion des circuits fonctionnels entre eux pour constituer des sous-ensembles puis des ensembles. Il serait évidemment ridicule de réduire considérablement les dimensions des circuits élémentaires si un effort parallèle n'était pas fait en ce qui concerne leurs liaisons.

On peut envisager pour obtenir cette interconnexion un certain nombre de procédés classiques ou plus ou moins nouveaux.

Le procédé le plus immédiat consiste à enficher les circuits élémentaires généralement présentés sous forme de modules dans des supports appropriés, supports qui sont préalablement interconnectés, soit par le procédé conventionnel soit par un circuit imprimé, soit par soudure électrique. Le dépannage par changement d'un circuit défaillant est commode mais la multiplicité des contacts par pression dans les supports est évidemment contraire à une bonne fiabilité.

Pour éviter cet inconvénient on peut enfiler les sorties des modules dans les trous d'un circuit imprimé et réaliser simultanément les soudures par trempé au bain d'étain. Cependant ce procédé un peu barbare risque de provoquer une dégradation

immédiate ou progressive de certains composants, ce qui est également contraire à une bonne fiabilité.

En utilisant le même procédé du circuit imprimé, on peut remplacer la soudure à l'étain par des gouttes d'encre conductrice (argent) reliant les connexions des modules au circuit imprimé. Après séchage ou polymérisation certaines de ces encres ont une bonne tenue mécanique.

Mais le procédé de choix pour obtenir l'interconnexion des divers microcircuits d'un sous-ensemble ou d'un petit ensemble (quelques dizaines de modules), nous paraît être la soudure électrique par point : rapide, propre et très fiable. Il est dommage que ce procédé d'assemblage utilisé depuis 40 ans dans la fabrication des tubes à vide ne se soit pas répandu plus tôt en technique des circuits. Il aurait déjà permis depuis longtemps de réaliser une pré-miniaturisation des appareils électroniques avec les composants classiques car il autorise des assemblages très tassés. Il est utilisé dans ce sens aux U.S.A. depuis quelques années. La mise en œuvre de ce procédé nécessite évidemment un matériel plus cher et un entraînement plus long des opérateurs que les procédés conventionnels. Par ailleurs le dépannage d'un circuit est également un peu plus délicat. Mais ces quelques inconvénients sont largement compensés par les avantages suivants : rapidité, donc pas d'échauffement des composants ou des circuits fonctionnels, pas de flux plus ou moins corrosif ou dangereux, haute fiabilité (1 mauvaise soudure non décelée sur 10^7).

Pour réaliser de gros ensembles à partir de sous-ensembles, on peut envisager l'utilisation de micro-connecteurs multiples circulaires, rectangulaires ou linéaires dont il existe actuellement de nombreux exemplaires dans le commerce. Mais on peut aussi généraliser la soudure électrique jusqu'à ce stade d'assemblage ce qui donnera des ensembles moins faciles à dépanner mais de fonctionnement beaucoup plus sûr.

2.5.5. Hybridation

Un autre aspect de la microminiaturisation qui a eu certains défenseurs au Congrès d'Oslo est l'hybridation. Au début de l'ère de la Microminiaturisation (1958) chacun des promoteurs des diverses méthodes avait présenté la sienne comme la meilleure et la seule capable de se développer dans l'avenir.

Aujourd'hui après la mise en évidence des difficultés de développement et des limitations propres à chacune des méthodes, tous les promoteurs paraissent disposer à mettre en commun leur expérience pour mélanger judicieusement les divers procédés afin d'aboutir dans chaque cas particulier à la solution la plus rationnelle et la plus économique. C'est ainsi qu'on envisage de placer des circuits solides sur des plaquettes de micromodules R.C.A. ou dans des boîtiers plus commodes à réaliser (TO 5), de les compléter par des inductances classiques, etc. De plus on admet également le mariage de la microminiaturisation avec des ensembles difficilement réductibles comme des guides d'ondes centimétriques par exemple.

2.5.6. Prix

Le développement des diverses méthodes de microminiaturisation a coûté et coûtera encore cher. En plus du soutien des différentes Armes, les Compagnies qui ont entrepris ces développements ont dû investir des capitaux importants qu'il faut amortir rapidement. De plus le rendement de fabrication des premières séries est faible. Il en résulte que le prix commercial actuel des circuits microminiaturisés est élevé (environ 300 à 600 NF pour une bascule) soit au moins 10 fois le prix du même circuit réalisé avec des composants du commerce par les méthodes conventionnelles. Cependant ce rapport est déjà faussé à la base d'un facteur 2 au moins car la bascule classique est faite avec des diodes et transistors au Germanium peu stables et limités en température positive (+ 55 °C) alors que la plupart des circuits microminiaturisés sont à base de Silicium. Ils sont donc beaucoup plus stables et peuvent fonctionner au moins jusqu'à 125 °C (stockage 200 °C). L'utilisation du Germanium pour le matériel professionnel, même terrestre, ne paraît pas souhaitable.

Par ailleurs on peut penser que d'ici deux ans le prix des circuits microminiaturisés baissera considérablement ($\approx 80\%$) mais à la condition évidemment que la production de ces deux premières années soit vendue pour amortir les investissements. Il y a là un cercle vicieux dont on ne pourra sortir que par une entente entre les fabricants de circuits microminiaturisés, ceux qui les assemblent, et les utilisateurs des ensembles électroniques réalisés.

3. La méthode C.F.T.H. — SESCO.

3.1. GÉNÉRALITÉS

Comme dans la plupart des grandes Sociétés qui fabriquent des dispositifs semiconducteurs on s'est penché depuis quelques années sur le problème de la microminiaturisation électronique au Département Semiconducteurs de la C.F.T.H. qui est devenu depuis la S.E.S.C.O.

Les premiers travaux ont commencé au début de 1960, mais le départ effectif de cette étude a été donné par la notification, en septembre 1960, d'un premier Marché du Service des Télécommunications de l'Air ayant pour but la réalisation de circuits logiques élémentaires et, à partir d'eux, de sous-ensembles de calculateurs arithmétiques assez rapides et pouvant fonctionner dans les conditions mécaniques et climatiques sévères que doivent supporter les matériels pour engins.

Ces circuits ont l'avantage de ne comporter comme composants que des résistances, des petites capacités, des diodes des transistors ce qui était déjà bien suffisant pour un premier contact avec la microminiaturisation.

Aussi il n'a pas paru raisonnable à l'époque, étant donné les moyens et les délais prévus pour l'aboutissement de l'étude, d'aborder directement les

méthodes d'avant-garde telles que le circuit solide et le microcircuit, qui nécessitent la parfaite maîtrise d'un grand nombre de procédés technologiques, très divers et très délicats à mettre en œuvre, pour être attaquées avec quelques chances de succès.

On s'est donc contenté dans une première étape d'essayer différentes variantes d'une méthode s'apparentant aux micromodules, au sens large, puisque les composants sont séparés, mais néanmoins orientés vers le circuit solide par l'utilisation de composants tous en silicium monocristallin.

Les diverses variantes essayées au cours de la première année d'études ont été décrites brièvement dans deux communications : l'une faite au Colloque International sur les Semiconducteurs (Paris, février 1961) l'autre prononcée au Congrès de l'AGARD (OTAN) sur la Microminiaturisation (Oslo, juillet 1961).

3.2. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

La méthode C.F.T.H.-S.E.S.C.O. se situe à peu près à égale distance du micromodule (au sens large) et du circuit solide entier. En effet, chacun des microcomposants utilisés (résistances, petites capacités, diodes et transistors) est constitué par un petit bloc de silicium monocristallin de structure appropriée, mais tous les composants d'un circuit sont séparés et ont sensiblement le même format, le même module, celui d'un petit parallélépipède ayant comme dimensions maximales $0,5 \times 0,5 \times 2,5 \text{ mm}^3$ et terminé par deux rubans métalliques brasés à l'or, plus un fil de base pour les transistors (fig. 1).

Ce principe mixte a conduit à baptiser humoristiquement cette méthode « le circuit solide en morceaux ».

Les résistances sont constituées par un bloc de

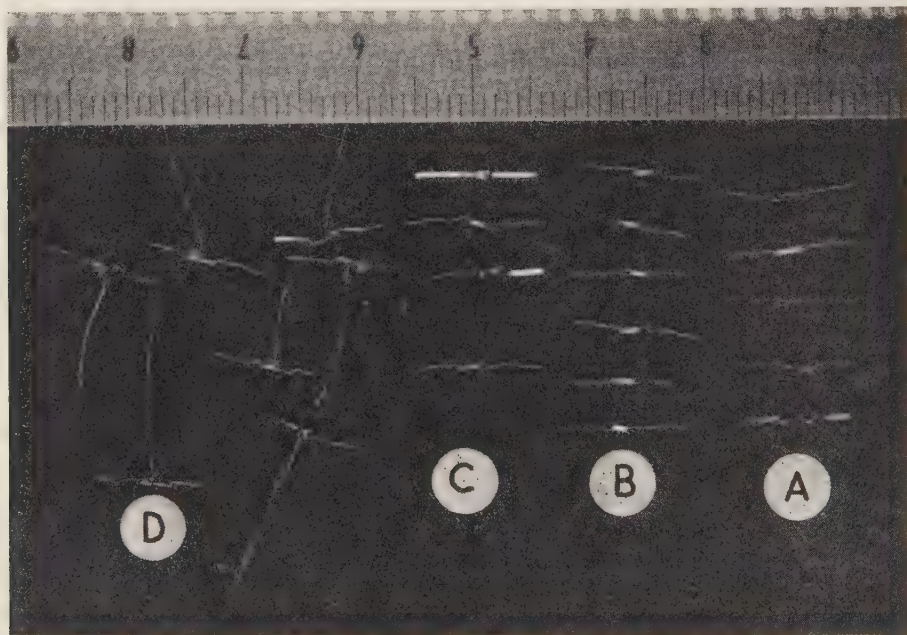


FIG. 1. — Microcomposants. A — Résistances. B — Capacités. C — Diodes. D — Transistors.

Nous donnerons ici quelques détails complémentaires sur la variante retenue qui a été améliorée et industrialisée au cours de la seconde année d'études dans le cadre d'un deuxième Marché du STTA.

Cette méthode est simple et souple ce qui lui confère l'important avantage d'être immédiatement et facilement industrialisable : une ligne de fabrication a, en effet, été lancée dès le mois d'octobre 1961, soit un an après le début de l'étude et a réalisé depuis quelques milliers de micromodules pour calculateurs, ce qui est un chiffre très honorable à l'échelle de notre pays. Par ailleurs, des études sont en cours pour améliorer la méthode et l'étendre aux mémoires à diode tunnel et aux circuits linéaires, en particulier pour télécommunications. Elle paraît donc pouvoir résoudre la plupart des problèmes de microminiaturisation électronique qui se posent dans les matériels militaires ou civils, terrestres ou spatiaux.

silicium homogène de résistivité appropriée selon la valeur de la résistance désirée.

Les petites capacités sont des pastilles de structure NPN obtenue par diffusion.

Les diodes sont du type « mesa » ou « planar » à faible temps de recouvrement.

Les transistors au silicium, de structure NPN obtenue par diffusion en cours de tirage, ont sensiblement les caractéristiques du 2N 338, mais avec une résistance de saturation plus faible (40 à 80 Ω).

L'assemblage et l'interconnexion des divers composants d'un circuit s'effectuent par soudure électrique des rubans ou fils métalliques sur les 8 passages d'une embase spéciale de dimensions TO 5 (fig. 2) selon un processus très analogue à celui du montage des tubes « subminiature ».

La haute fiabilité de la soudure électrique a



FIG. 2. — Montage sur embase TO 5 (Cliché La Photothèque).

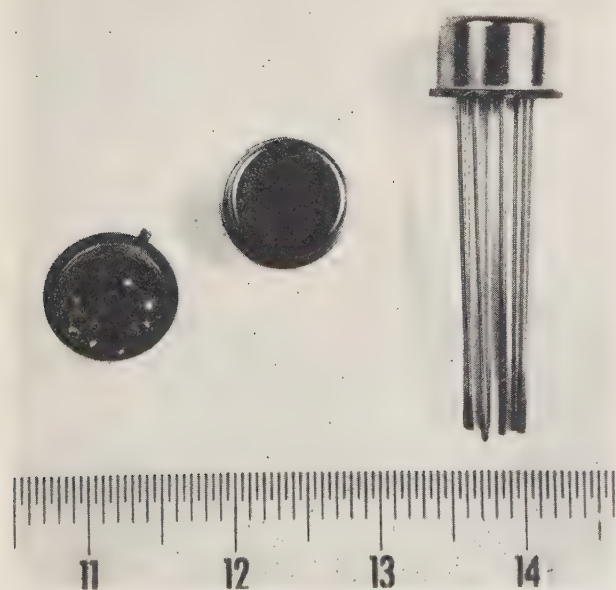


FIG. 3. — Micromodule TO 5 terminé.

précisément été démontrée par 40 années de fabrication de tubes à vide.

Après un traitement thermique approprié pour stabiliser les jonctions le circuit est capoté, également par soudure électrique (étanchéité vérifiée sur des millions de transistors) et se présente sous la forme d'un transistor classique alors qu'il comporte entre 7 et 12 composants (fig. 3).

Cette présentation en enceinte TO 5 est un premier stade qui conduit déjà à la densité honorable d'environ 10 composants/cm³ dans un sous-ensemble, donc du même ordre que celle obtenue, par exemple, avec le micromodule RCA-Army.

Nous avons d'ailleurs constaté, avec satisfaction, que plusieurs firmes importantes aux U.S.A. ont adopté à peu près à la même époque (début 1961), la même présentation extérieure, entre autres : GENERAL INSTRUMENTS, FAIRCHILD, RAYTHEON, et plus récemment : TEXAS INSTRUMENTS pour certaines applications, MOTOROLA, etc. Il faut dire que cette solution est assez évidente pour un spécialiste et elle a l'avantage d'être immédiate.

3.3. AVANTAGES

La méthode du « circuit solide en morceaux » présente un certain nombre d'avantages par rapport aux trois grandes catégories décrites plus haut qui sont en développement dans de nombreux laboratoires :

Les micromodules, les microcircuits, les circuits solides.

3.3.1. Elle a été immédiatement et facilement industrialisable et permet aux utilisateurs de réaliser, dès maintenant, un premier pas en microminiaturisation. Elle doit cet important avantage au fait qu'elle est extrêmement simple à mettre en œuvre dans une usine de semiconducteurs. En effet, elle utilise :

- les mêmes matériaux
- les mêmes pièces détachées
- le même genre de machines
- le même type de technologie

que ceux employés dans la fabrication des diodes et transistors classiques.

Elle n'exige pas en particulier :

a) Une nouvelle étude technologique difficile du montage des composants sur des supports spéciaux (verre ou céramique) comme, par exemple, le micromodule RCA-Army.

b) L'utilisation d'un matériel à vide complexe manipulable seulement par des spécialistes très entraînés comme pour réaliser des microcircuits.

c) La mise en œuvre des nombreuses techniques difficiles à bien maîtriser qu'exige le développement des circuits solides.

3.3.2. Elle est beaucoup plus souple que les méthodes du circuit solide entier ou du microcircuit.

Or, le développement industriel de la microminiaturisation paraît lié à un aspect humain, psychologique, de cette question qui était prévisible mais dont l'importance semble avoir été sous-estimée par les promoteurs des méthodes d'avant-garde de microminiaturisation. Cet aspect est le suivant : l'ingénieur électronicien tient, et cela est bien compréhensible, à étudier lui-même les divers circuits des ensembles électroniques qu'il est chargé de réaliser et il faut donc que le « physicien miniaturiste » lui laisse cette possibilité s'il veut lui vendre ses produits. Cet état de faits qui résulte de la division traditionnelle de l'industrie électronique en deux activités nettement distinctes : d'une part la fabrication des divers composants, d'autre part l'assemblage de ces composants en ensembles fonctionnels, est probablement regrettable puisqu'il constitue un frein à l'expansion de la microminiaturisation. Néanmoins une politique industrielle et commerciale réaliste doit en tenir compte. La solution future bien évidente à ce problème est la suppression du mur qui sépare les deux activités, indiquées plus haut, par la formation de « Physiciens électroniciens » capables à la fois de projeter et de réaliser les circuits microminiaturisés dont ils auront besoin pour constituer les ensembles électroniques de plus en plus complexes qui leur seront demandés. Il y a là un problème pédagogique très important, à notre avis, et qui doit être résolu de toute urgence.

Pour revenir au temps présent il est assez évident que les méthodes d'avant-garde : circuit solide entier et microcircuit n'ont pas la souplesse exigée par l'électronicien. L'étude topologique d'un nouveau circuit peut être assez longue et difficile, sa réalisation exige la création d'un nouvel outillage (masque de diffusion ou (et) d'évaporation) qui ne peut s'amortir que sur une série importante. Par ailleurs, dans le cas du circuit solide la réalisation des divers composants sur un même bloc de silicium nécessite un compromis dans le choix de la résistivité du bloc initial, ceci en général au détriment de certaines performances (vitesse de commutation par exemple).

Certains fabricants de circuits solides qui ont maintenant bien compris cet aspect humain de la microminiaturisation ont fait un pas en arrière et proposent soit des composants séparés en capot TO 5 pour l'étude préalable des circuits à intégrer, soit des matrices de composants divers initialement isolés et qui peuvent être interconnectés à la demande de l'électronicien par une seule opération de photo-gravure.

La méthode C.F.T.H.-S.E.S.C.O. qui utilise des composants séparés est, de ce fait, beaucoup plus souple et permet de satisfaire rapidement et sans outillage onéreux les demandes de l'Ingénieur des circuits. En effet :

Les microcomposants peuvent être livrés séparés en boîtier TO 18 ou TO 5 ou simplement enrobés (mais alors sans garantie de fiabilité) pour une étude préalable, par son créateur, du circuit à microminiaturiser.

— L'étude topologique, par le miniaturiste, du nouveau circuit pour sa mise en boîtier TO 5 est très rapide.

— Par ailleurs, on choisit pour chaque composant la résistivité optimale en fonction des performances demandées ou des dimensions souhaitées, par exemple :

pour les résistances de 1 000 Ω :	$\rho \simeq$	10 Ωcm
pour des résistances de 10 000 Ω :	$\rho \simeq$	100 Ωcm
pour des capacités ($\simeq$ 200 pF/mm ²) :	$\rho \simeq$	1/100 Ωcm
pour les diodes rapides :	$\rho \simeq$	1/10 Ωcm
pour les collecteurs de transistors :	$\rho \simeq$	1 Ωcm

— On peut remplacer très rapidement, pour une nouvelle série de circuits un certain composant par un autre de performances améliorées. C'est ainsi que les transistors 2N 338 que nous utilisons jusqu'ici vont être remplacés incessamment par des transistors planars passivés beaucoup plus rapides et plus fiables (2N 708 – 2N 914, etc.) et qui sont actuellement en fin de mise au point au laboratoire d'étude des transistors de la S.E.S.C.O.

3.3.3. Elle permet d'obtenir un rendement élevé grâce à la possibilité de contrôler individuellement chaque composant avant montage et même de trier les composants dans leur dispersion normale, afin de les apparier rationnellement selon le type de circuit à réaliser. Ce sont de très gros avantages par rapport au microcircuit ou au circuit solide.

3.3.4. Elle doit permettre d'atteindre la densité de composants maximale de 100/cm³ compatible avec la dissipation des circuits logiques actuels évolués qui est d'environ 1 mW. par composant (100 W/dm³). Cette possibilité est très mal exploitée dans l'enceinte TO 5 qui a été utilisée parce qu'elle avait le mérite d'exister afin d'obtenir immédiatement une première étape réelle de microminiaturisation avec un boîtier de fiabilité éprouvée. Mais l'étape suivante prévue consiste à employer une enceinte plane (fig. 4) métallique dont le coefficient de remplissage est évidemment bien meilleur que celui de l'enceinte TO 5. Ces dimensions sont les suivantes : $8 \times 8 \times 1,25 \simeq 80 \text{ mm}^3$ pour 8 composants, soit une densité de 100 composants/cm³, du même ordre que celle obtenue avec le circuit solide entier. Par exemple : la densité du calculateur livré récemment par TEXAS INSTRUMENTS à l'USAF est de l'ordre de 80/cm³ ($\simeq$ 8 000 composants pour $\simeq$ 100 cm³). La méthode S.E.S.C.O. en micromodules plans permettrait d'obtenir pour un tel ensemble, compte tenu des interconnexions entre circuits, connexions qui seraient réalisées par soudure électrique, une densité d'environ 50/cm³. Ces hautes densités ne paraissent nécessaires que pour les calculateurs qui pourront comporter, dans l'avenir, un très grand nombre de composants.

3.3.5. Enfin en ce qui concerne la fiabilité, la méthode décrite ici paraît bien placée malgré le nombre important de points de connexions :

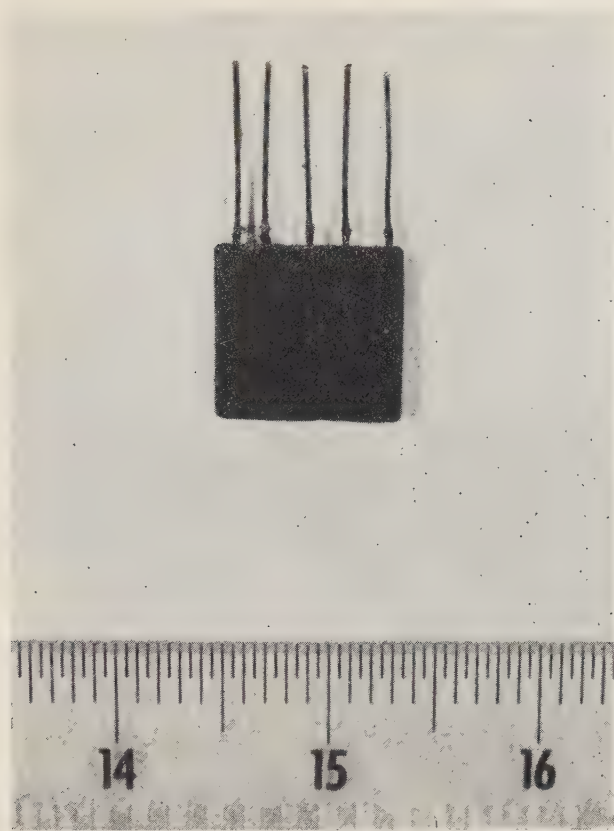


Fig. 4. — Micromodule plan.

— En effet, l'assemblage et l'interconnexion des composants par soudure électrique est extrêmement fiable comme on l'a dit plus haut. C'est la seule méthode qui permet de réaliser avec une grande sécurité de fonctionnement des assemblages inaccessibles donc indépannables après leur finition, comme l'ont toujours été les tubes à vide et comme le sont maintenant nos micromodules. Seule l'expérience sur un grand nombre d'exemplaires pourra montrer si cette fiabilité est équivalente à celle du circuit solide entier. Il ne faut pas oublier, en effet, que dans ce dernier, certaines interconnexions qui ne peuvent être faites par le bloc de silicium, ainsi que les liaisons avec les autres circuits et l'alimentation sont faites par thermocompression de petits fils d'or, procédé dont la fiabilité n'a pas encore été mesurée statistiquement (procédé trop récent), mais qui paraît nettement moins bonne que celle de la soudure électrique.

— Le fait que tous les composants sont constitués par des blocs monocristallins en silicium leur assure une parfaite stabilité interne dans le temps, alors que les couches très minces (quelques dizaines d'ångströms) évaporées pour constituer les microcircuits ont tendance à évoluer en vieillissant, en particulier en fonction des cycles thermiques.

— La stabilité à long terme de l'état de surface des jonctions, donc des caractéristiques des composants qui en comportent (capacités, diodes, transistors) était jusqu'ici un problème assez difficile à

résoudre. Comme pour la première génération de dispositifs semiconducteurs (1950-1960), nous avons utilisé jusqu'ici pour nos micromodules le palliatif, évidemment provisoire, de l'enrobage avec un vernis, ici un vernis au silicone particulièrement stable et donnant une bonne fiabilité au moins à court et moyen terme.

Mais la mise au point de la méthode « planar » qui passive les jonctions par une couche de silice formée « in situ » permet d'escompter maintenant une excellente fiabilité à long terme. Nous avons donc prévu de remplacer progressivement, au fur et à mesure de leur mise au point, tous les composants comportant des jonctions par des composants « planar ».

Quoi qu'il en soit, les micromodules pour calculateurs fabriqués actuellement en TO 5 ont subi avec succès les tests sévères réservés aux matériels pour engins : chocs 500 g répétés (20), vibrations 100 à 2 000 Hz, 20 g, stockage à 200 °C, cycles thermiques de -65 °C à +150 °C (à condition de réduire le vernis au minimum à cause de son coefficient de dilatation élevé), fonctionnement correct dans la gamme de température de -40 °C à +125 °C. Des essais de durée sont en cours et les premiers résultats très satisfaisants : 3 mois de fonctionnement à 125 °C sans modifications dépassant les tolérances permises.

Une étude de fiabilité portant sur plusieurs centaines de micromodules est actuellement en cours au laboratoire d'évaluation de la S.E.S.C.O. et permettra de se faire une opinion valable sur la fiabilité de la méthode avant la fin de l'année. Par ailleurs, presque un millier de ces micromodules sont ou vont être testés par les Ingénieurs d'un grand laboratoire d'Électronique afin d'en jauger les possibilités et d'envisager leur utilisation sous une forme éventuellement améliorée, pour la réalisation de calculateurs d'engins.

3.4. CHAÎNE DE FABRICATION. CIRCUITS FABRIQUÉS

La figure 5 montre l'ensemble de la ligne de fabrication des micromodules pour calculateurs. La figure 6 représente d'une des micromachines servant à réaliser des divers microcomposants et la figure 7 une soudeuse électrique utilisée pour assembler les composants en circuits sur une embase TO 5 à 8 passages. Enfin la figure 8 montre un poste de mesure comprenant principalement un générateur d'impulsion et un oscilloscope rapide.

La capacité de production de cette chaîne est de l'ordre de 300 à 400 micromodules bons par mois. Les rendements obtenus sont approximativement les suivants :

- résistances 80 %
- diodes 50 %
- capacités 60 %
- transistors 40 %
- montage 60 %

Les types de circuits logiques fabriqués actuellement sont les suivants :



FIG. 5. — Ligne de fabrication.

- Porte ou à 2 entrées (fig. 9)
- Porte et à 2 entrées (fig. 10)
- Double inverseur (fig. 11)
- Double inverseur partiel (fig. 12)
- Multivibrateur (fig. 13)
- Bascule compteur (fig. 14)
- Porte NOR à diodes à 3 entrées (fig. 15)

- Porte ou à 3 entrées (fig. 16)
- Flip flop ou bascule registre (fig. 17)

Ces circuits logiques fonctionnent sous 3 volts,

Par combinaisons de certains de ces circuits on peut réaliser d'autres fonctions, par exemple.

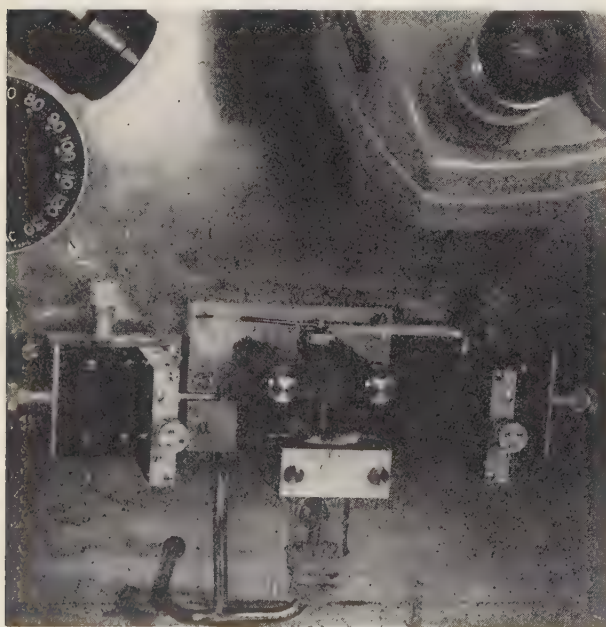


FIG. 6. — Machine pour fabriquer les microcomposants.



FIG. 7. — Soudeuse électrique.

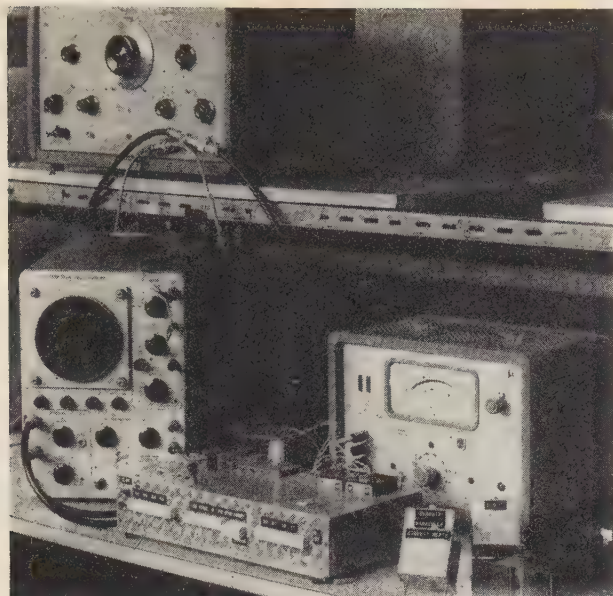


FIG. 8. — Poste de mesures.

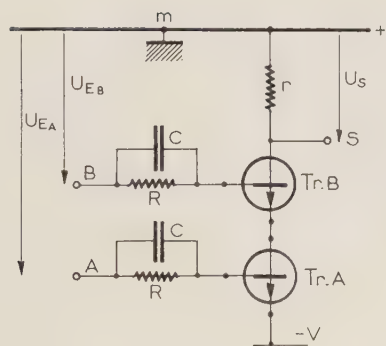
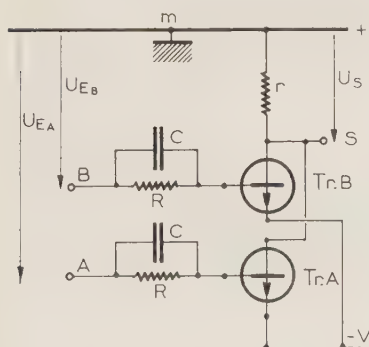
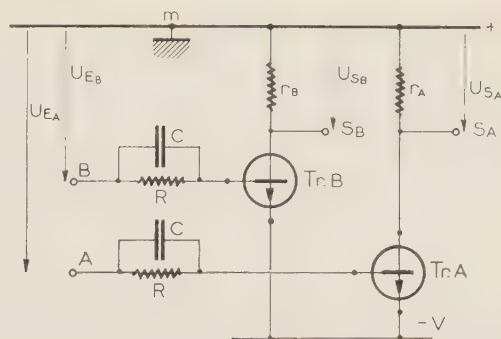
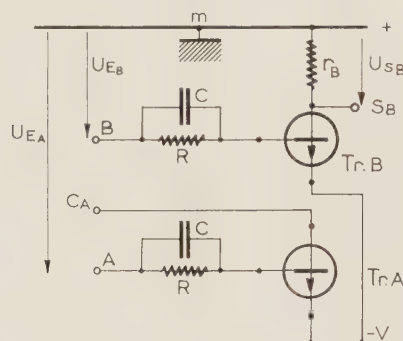
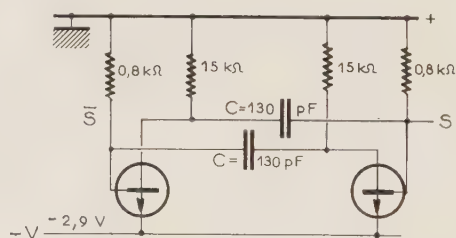
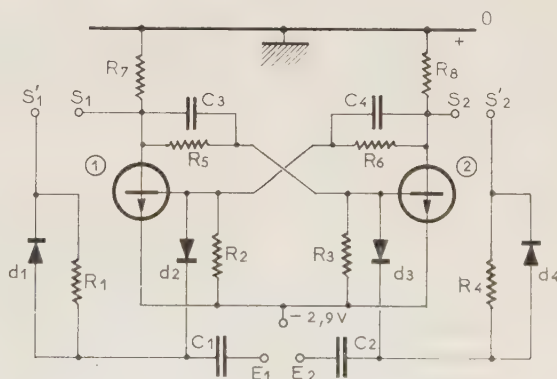
FIG. 9. — Circuit « ou ». Tr : Transistors 2N338 Si (npn) — $R = 10 \text{ k}\Omega$ (Si) — $C = 130 \text{ pF}$ (Si npn) — $r = 1,2 \text{ k}\Omega$ (Si) — $V = -2,9 \text{ V}$.FIG. 10. — Circuit « et ». Tr : Transistor 2N338 Si (npn) — $R = 10 \text{ k}\Omega$ (Si) — $C = 130 \text{ pF}$ (Si npn) — $r = 1,1 \text{ k}\Omega$ (Si) — $V = -2,9 \text{ V}$.FIG. 11. — Circuit « d.n.c. ». Tr : Transistors 2N338 Si (npn) — $R = 10 \text{ k}\Omega$ (Si) — $C = 130 \text{ pF}$ (Si npn) — $r = 1,1 \text{ k}\Omega$ (Si) — $V = -2,9 \text{ V}$.FIG. 12. — Circuit « d.n.p. ». Tr : Transistors 2N338 Si (npn) — $R = 10 \text{ k}\Omega$ (Si) — $C = 130 \text{ pF}$ (Si npn) — $r = 1,1 \text{ k}\Omega$ (Si) — $V = -2,9 \text{ V}$.

FIG. 13. — Multivibrateur. Capacités : Si — Résistances : Si — Tr : 2N338.

FIG. 14. — Bascule compteur = 1 MHz. 1 et 2 : Transistors 2N338 — d_1, d_2, d_3, d_4 : diodes rapides — C_1, C_2, C_3, C_4 : Capacités silicium 130 pF — $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$: résistances silicium 10 k Ω — R_7, R_8 : résistances silicium 1 k Ω .

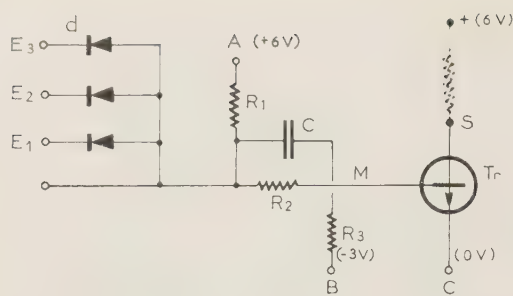


FIG. 15. — Porte « NOR » à 3 entrées à diodes et 1 directe. Tr : Transistor 2N338 (npn) — d : diodes Si Mesa diffusée — C : Capacité npn (Si) 13 pF $R_1 = 33\text{ k}\Omega$ (Si) n. $R_2 = 4,7\text{ k}\Omega$ (Si) n. $R_3 = 2,2\text{ k}\Omega$ (Si) n.

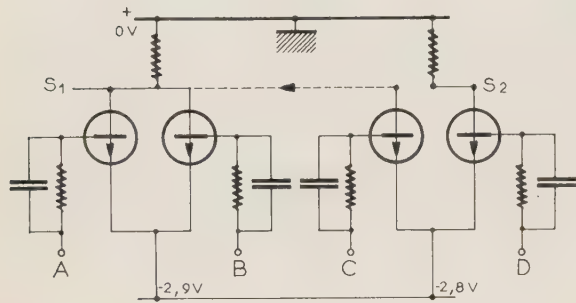


FIG. 16. — Porte « NOR » à 3 entrées plus inverseur — S_1 : sortie porte — A, B, C : Entrées porte — D : Entrée inverseur — S_2 : Sortie inverseur.

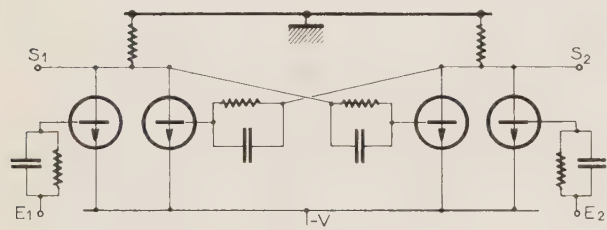


FIG. 17. — Flip - flop.

consommant 8 mW en débloquent, commutent en 200 nanosecondes à 25 °C et ont un facteur pyramidal (fan-out) de 5(4 pour les bascules). Un « buffer » qui portera le fan-out à 25 est en développement.

Ils permettent de réaliser toute la partie logique des calculateurs et d'une façon plus générale des manipulateurs d'informations.

3.5. RÉALISATION ET INTERCONNEXIONS DE SOUS-ENSEMBLES ET D'ENSEMBLES

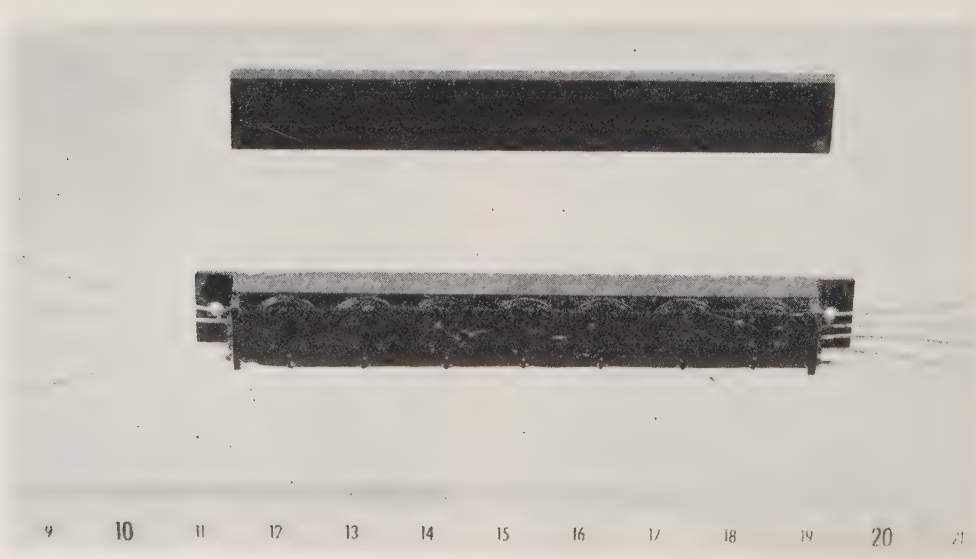
Pour la réalisation de sous-ensembles deux méthodes principales sont conseillées aux utilisateurs :

a) Les différents micromodules constituant le sous-ensemble sont placés dans des trous pratiqués dans une plaquette métallique par exemple en aluminium et les interconnexions sont réalisées par soudure électrique. Cette solution donne des sous-ensembles de haute fiabilité mais assez difficile à dépanner. Elle est particulièrement indiquée pour les matériels militaires.

Comme exemple, la figure 18 représente un additeur monodigit à 3 entrées et deux sorties. Cette « boîte noire » reçoit les digits A_N et B_N de rang n des deux nombres binaires à additionner ainsi que la retenue R_{N-1} venant du rang précédent. Elle restitue la somme binaire de ces trois chiffres comportant le digit de rang n et la retenue R_N à injecter à l'une des entrées du rang suivant. La figure 19 indique le diagramme de ce sous-ensemble comportant 7 circuits logiques de certains des types indiqués plus haut (49 composants pour $\approx 6\text{ cm}^3$ soit 8 composants par cm^3). On distingue les interconnexions faites par soudure électrique qui sont normalement enrobées dans une résine ou protégées par un couvercle métallique.

b) La Société SOURIAU a, sur notre demande, développé un petit support extra plat à 8 contacts en octogone ($r = 1/10''$) qui permet de réaliser des sous-ensembles par enfichage des micromodules

FIG. 18. Sous-ensemble : additeur.



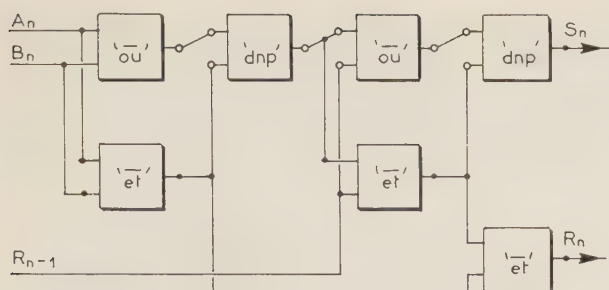


FIG. 19. — Diagramme de l'additeur.

TO 5 (fig. 20). Les interconnexions entre supports peuvent être effectuées par les procédés classiques, par circuit imprimé, ou par soudures électriques. Cette solution moins fiable que la précédente (multiplicité des contacts par pression) est par contre plus commode pour développer l'étude d'un nouveau



FIG. 20. — Microsupport « Souriau » à 8 trous pour micromodules TO 5.

sous-ensemble et elle peut être suffisante dans de nombreuses applications non militaires.

Pour la constitution d'ensembles complexes à partir de sous-ensembles on peut envisager comme on l'a dit en 2-5-4, l'utilisation de microconnecteurs multiples circulaires, rectangulaires ou linéaires dont il existe actuellement de nombreux exemplaires dans le commerce. Mais on peut aussi généraliser la soudure électrique jusqu'à ce stade d'assemblage ce qui donnera des ensembles moins faciles à dépanner mais de fonctionnement beaucoup plus sûr, qualité hautement souhaitable pour les matériels militaires.

3.6. AMÉLIORATIONS ET EXTENSIONS

La méthode de microminiaturisation que nous venons de décrire peut facilement et rapidement :

— être améliorée en ce qui concerne les circuits logiques ;

— étendue à certains types de mémoire ;

— étendue aux circuits linéaires en particulier pour ensembles émetteurs et récepteurs de télécommunications.

Ces différents points sont actuellement en développement.

a) Circuits logiques

Les améliorations prévues ont été indiquées au cours de l'exposé ; nous les rappelons brièvement :

— augmentation de vitesse de commutation en remplaçant les transistors 2 N 338 par un transistor planar passivé de la série 2 N 708 — 2 N 914, etc. et les diodes actuelles par des diodes ultra-rapides planar (1 N 3604). Quelques bascules prototypes déjà réalisées ont fonctionné correctement jusqu'à 10 MHz au lieu de 1 MHz actuellement.

— amélioration de la fiabilité en généralisant la structure planar à tous les composants : capacités, résistance (coefficient de température plus faible : $2 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ que le silicium en bloc : $10^{-2}/^{\circ}\text{C}$) et en réalisant une intégration partielle ne dépassant pas 3 composants pour conserver un rendement raisonnable et une certaine souplesse (2 transistors, 3 diodes, 3 résistances, etc.) (réalisation courant 1963).

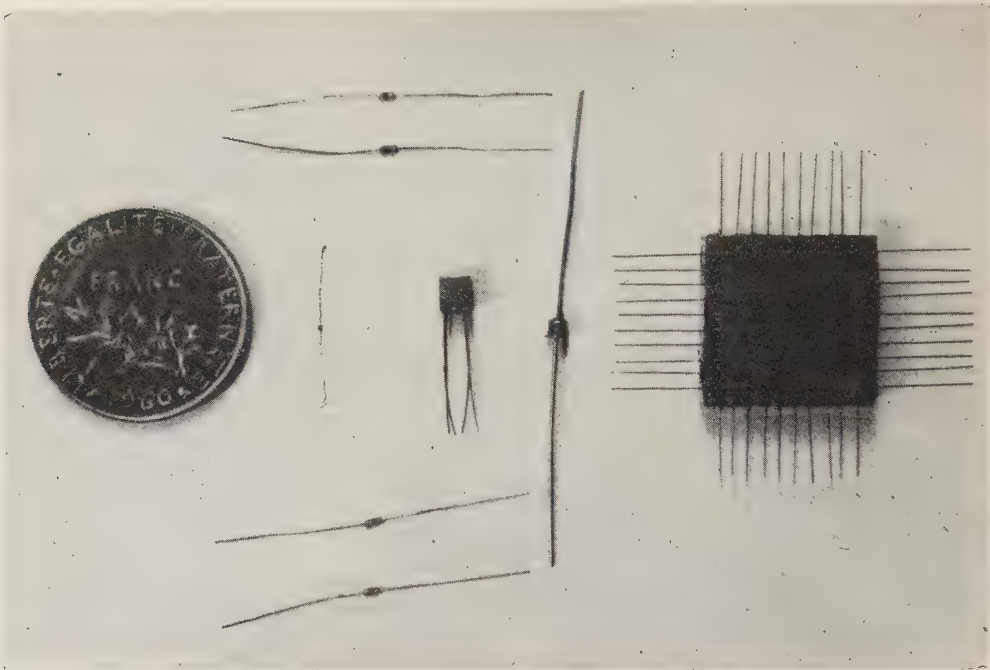
— augmentation de la densité de composants jusque vers la limite de 100/cm² compatible avec la consommation des circuits logiques actuels rapides (≈ 1 mW par composant soit 100 W/dm² pour 10⁵ composants) par utilisation d'une enceinte plane étanche ayant un rendement volumétrique bien meilleur que l'enceinte TO 5 (réalisation fin 1963).

b) Mémoire à diode tunnel

Toujours dans le cadre du Marché d'Etudes STTA sur la microminiaturisation, nous avons réalisé des points mémoires à base de diode tunnel (fig. 21). La mise au point de ce type de circuit a nécessité l'étude et la fabrication de résistances à coefficient de température faible $\leq 5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ afin que les points mémoires puissent fonctionner dans une gamme de température étendue. Ces résistances sont constituées par une couche déposée sur un support tubulaire en alumine ayant 0,6 mm de diamètre et 1,2 mm de long. Deux fils de nickel de 2/10 scellés par un ciment conducteur aux deux extrémités de la résistance permettent de la connecter par soudure électrique aux autres composants. Le point mémoire comporte 6 composants dont une microdiode tunnel au germanium et le tout est enfermé dans une boîte métallique parallélépipédique ayant pour dimensions : $3,2 \times 3,2 \times 4 \approx 40$ mm³, ce qui correspond à ce stade à une densité de 150 composants/cm³. Assemblés en matrices planes et compte-tenu des interconnexions et du cadre support la densité sera de l'ordre de 15 points mémoires par cm³ (soit 90 composants/cm³), qui approche ce que l'on sait faire de mieux actuellement avec des microtores (30 à 50/cm³).

Ces points mémoires fonctionnent sous 2 volts et consomment en permanence environ 1 mW par point.

FIG. 21. — Mémoire à base de diode tunnel : éléments, point, matrice.



Les avantages présumés d'une mémoire à diode tunnel par rapport aux mémoires à ferrites ou à couches minces sont les suivantes :

- a) Grande rapidité : basculement en une durée de l'ordre de la nanoseconde.
- b) Courant de fonctionnement très faible d'où adaptation directe à une logique à faible niveau telle que celle réalisable avec les micromodules décrits plus haut. Ceci paraît essentiel pour un calculateur microminiaturisé.
- c) Gamme de température de fonctionnement plus étendue.

Cependant l'étude des mémoires à diodes tunnel en est à ses débuts et seule la réalisation de mémoires assez importantes permettra de bien mettre en évidence les qualités et probablement aussi les défauts de ce type de mémoire, en particulier son prix plus élevé que celui des mémoires magnétiques.

c) *Circuits de télécommunications*

Pour étendre la méthode aux circuits de télécommunications, il suffit de lui adjoindre quelques pièces détachées en particulier (fig. 22).

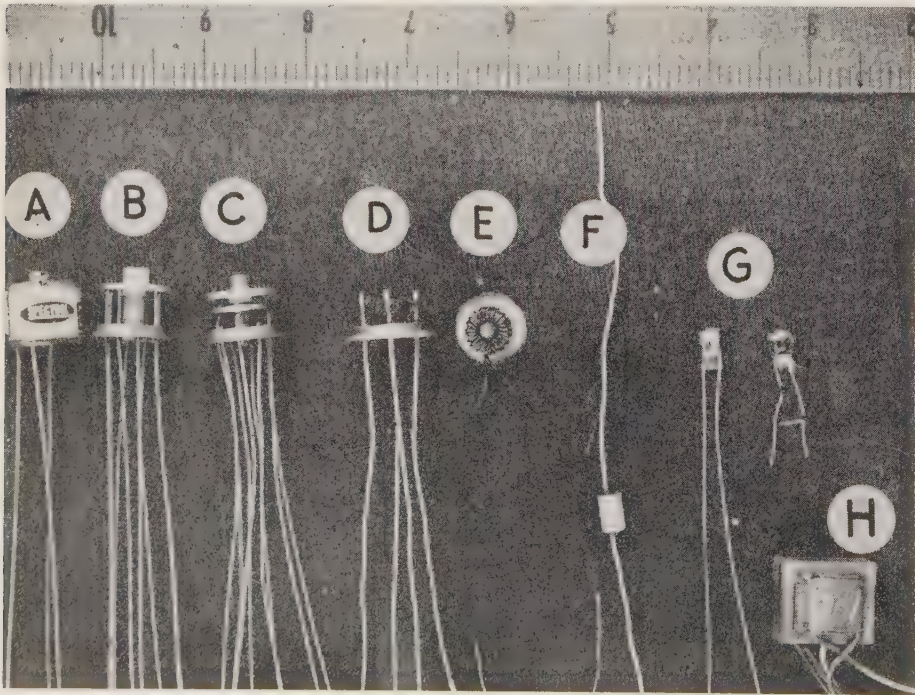


FIG. 22. — Pièces détachées pour circuits de télécommunications.

— des tores ou poulies en ferrite doux pour les inductances transfo H.F. et M.F.

— des microcondensateurs divers : mica, céramiques, tantale ;

— des microcondensateurs variables ;

— des micropotentiomètres.

Dans ce type de circuits une densité moyenne de $10/\text{cm}^3$ est amplement suffisante car, par exemple, un récepteur militaire déjà assez complexe ne comporte guère plus d'une centaine de composants ce qui conduit à un volume de 10 cm^3 . Il paraît inutile, étant donné les dimensions de l'homme, de pousser la microminiaturisation au-delà. On pense donc conserver, dans ce cas, la forme TO 5, d'autant plus :

— que cette forme se prête bien à la réalisation de transfo H.F.M.F., sur tore ou poulie en ferrite doux, de quartz, de condensateurs variables, et même de microphones et d'écouteurs.

— que l'on trouve déjà dans le commerce des potentiomètres ayant la forme et les dimensions de l'enceinte TO 5.

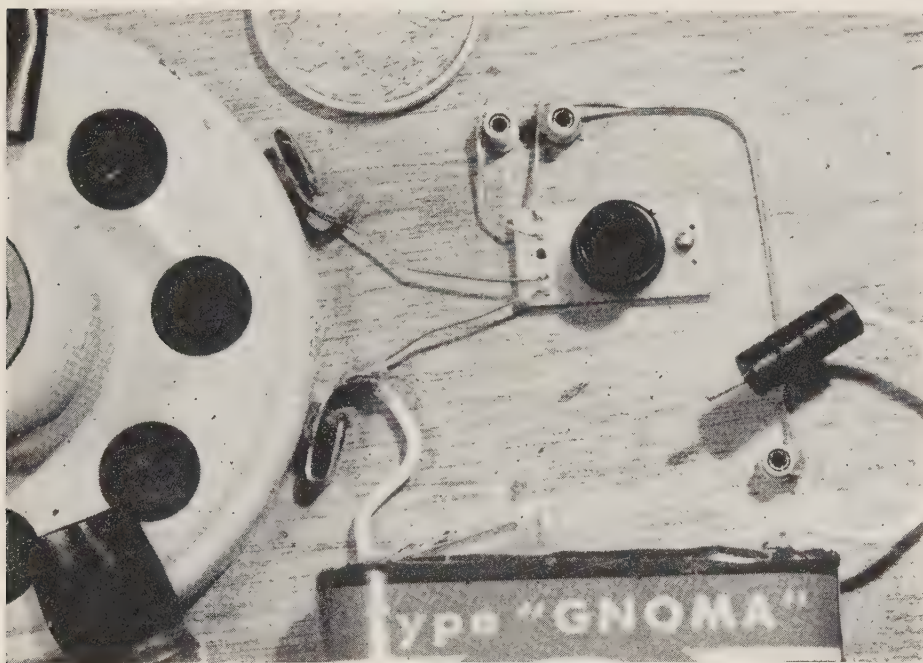
Afin de montrer les possibilités de la méthode, nous avons réalisé à titre d'exemple :

— des amplificateurs basse fréquence à 3 étages en un seul TO 5. L'un d'eux, qui est montré par la figure 23, est un amplificateur à forte impédance d'entrée (1^{er} étage, à collecteur commun). Il peut être attaqué, par exemple, par un pick-up à cristal et délivrer quelques dizaines de mW à la sortie. Un autre est un préamplificateur de haute qualité développé à la demande d'un fabricant de microphones. Un troisième, un amplificateur pour prothèse auditive.

— une maquette de superhétérodyne sur 6 MHz dont la figure 24 donne le schéma et la figure 25 les dimensions.

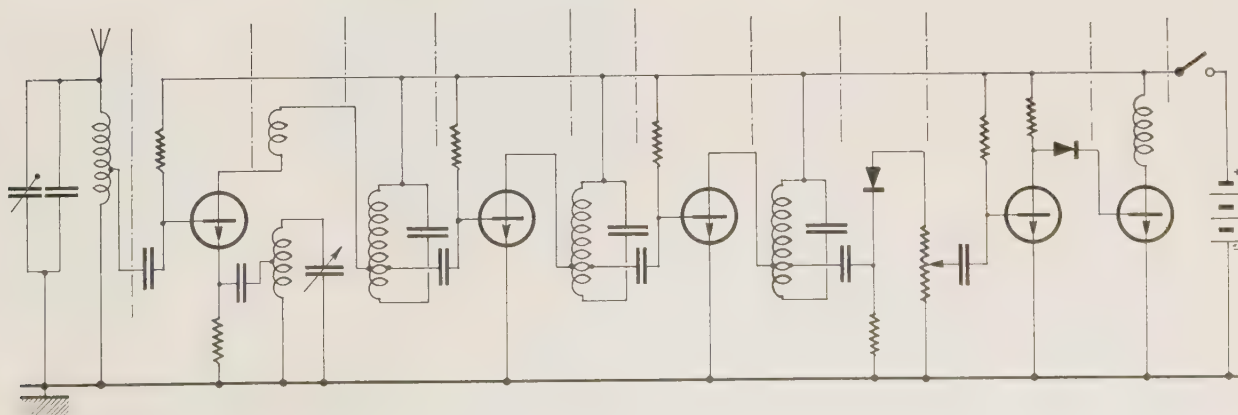
4. Conclusion

Au début nous n'avons choisi cette méthode « du circuit solide en morceaux » que parce que les moyens et le temps dont nous disposions ne nous permettaient pas d'envisager l'attaque de front des



← FIG. 23. — Amplificateur B.F.

FIG. 24. — Schéma d'un microsuperhétérodyne.



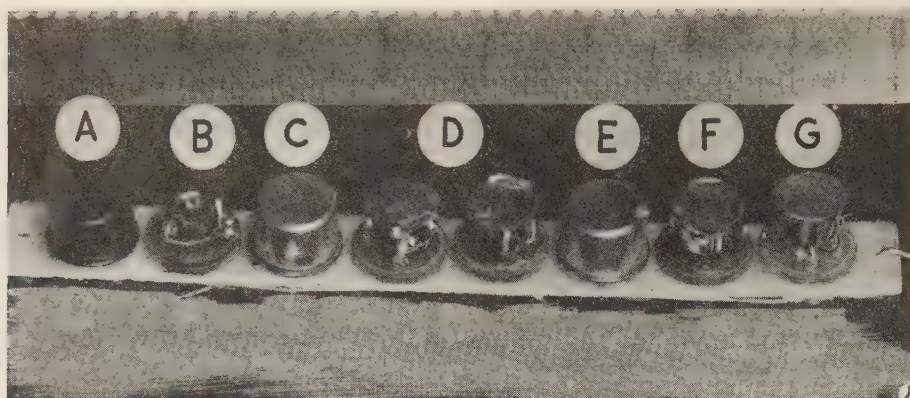


FIG. 25. — Maquette d'un microsuperhétérodyne.

procédés d'avant-garde circuit solide et microcircuit partiel ou complet. Aujourd'hui avec le recul du temps et compte-tenu de l'aspect psychologique de cette question que nous avons évoqué plus haut, il nous semble que cette première étape de micro-miniaturisation était nécessaire, l'évolution en toute chose n'étant jamais immédiate.

Aussi tout en reconnaissant la beauté technique et les mérites du circuit solide et du futur microcircuit complet (c'est-à-dire celui sur lequel les composants actifs seront également évaporés) que nous attaquons progressivement, nous pensons que la méthode SESCO actuelle est intéressante par sa simplicité et sa souplesse. Elle donne dès maintenant aux fabricants de calculateurs la possibilité de pré-étudier et de faire réaliser immédiatement et sans frais d'outillage les circuits logiques de leur choix. Par ses extensions possibles aux mémoires et

aux circuits linéaires, elle doit pouvoir résoudre rapidement la plupart des problèmes de micro-miniaturisation que peuvent poser les matériels électroniques de tous types (militaires, spatiaux, civils).

5. Remerciements

L'aboutissement de cette étude est évidemment le résultat d'un travail d'équipe. Nous tenons à remercier ici tous ceux qui ont participé à ce développement, en particulier MM. DESAGE, FUMÉE, DURPOIX, PROVOST, LAGORSSE, LANTAIRES et PILEUR, ainsi que la Direction de la SESCO qui a permis la publication des résultats obtenus. Nous remercions également vivement la Direction du STTA qui continue à soutenir notre effort pour améliorer, industrialiser et étendre, cette méthode de micro-miniaturisation électronique.



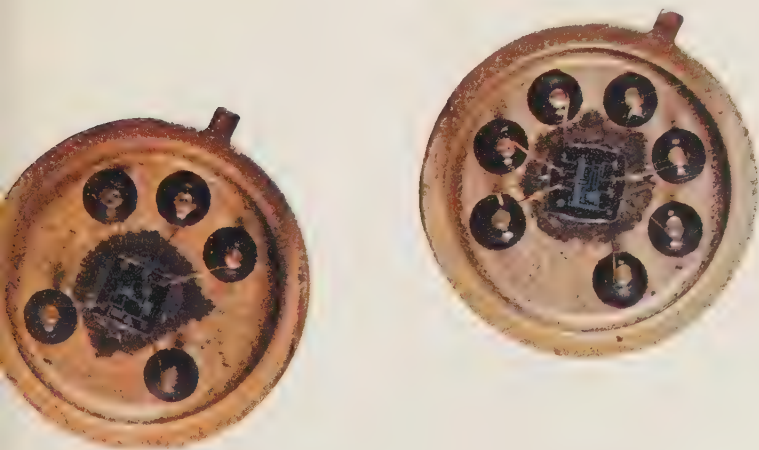
Les éléments micrologiques constituent une famille de blocs logiques de dimensions miniatures, chacun d'eux étant entièrement contenu à l'intérieur d'un petit morceau de silicium monocristallin de 1,5 mm de côté. Le montage utilisé est un montage logique à transistors à couplages directs par résistances. Il a été utilisé pour cinq raisons principales :

- 1° Il demande un nombre minimum de composants ;
- 2° Il demande un minimum de types de composants ;
- 3° Les valeurs des composants ne sont pas critiques ;
- 4° La consommation en puissance est faible ;
- 5° La tension d'alimentation est réduite.

Cette famille d'éléments fonctionnels peut être utilisée pour remplir à bas prix toutes les fonctions que l'on rencontre dans la section logique d'un ordinateur électronique de grande fiabilité, sans utiliser aucun autre composant.

Ils fonctionnent à 1 MHZ (retard par étage 50 nanosecondes), dans une gamme de température allant de -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$. Ce texte vous guidera à travers la fabrication d'un ELEMENT MICROLOGIQUE, le « HALF SHIFT REGISTER », depuis le cristal jusqu'au contrôle final. Il a pour but de démontrer les possibilités de FAIRCHILD.

LES ELEMENTS MICROLOGIQUES FAIRCHILD



TAILLE RÉELLE

TIRAGE DU MONOCRISTAL

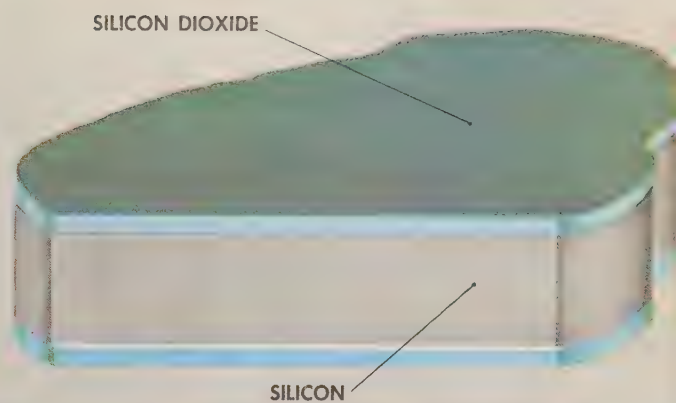
Le matériau de départ pour les éléments micrologiques est le même silicium à très haute pureté que celui utilisé par FAIRCHILD dans la production des transistors, il contient un nombre très faible de dislocations et d'imperfections. La méthode classique (méthode Czochralski) de fabrication par tirage depuis une masse de silicium fondu est utilisée pour produire des lingots monocristallins longs de 15 cm environ et dont le diamètre est de l'ordre de 2,5 cm. Pour les éléments micrologiques, où le cristal doit être du type N, l'impureté ajoutée est du phosphore.





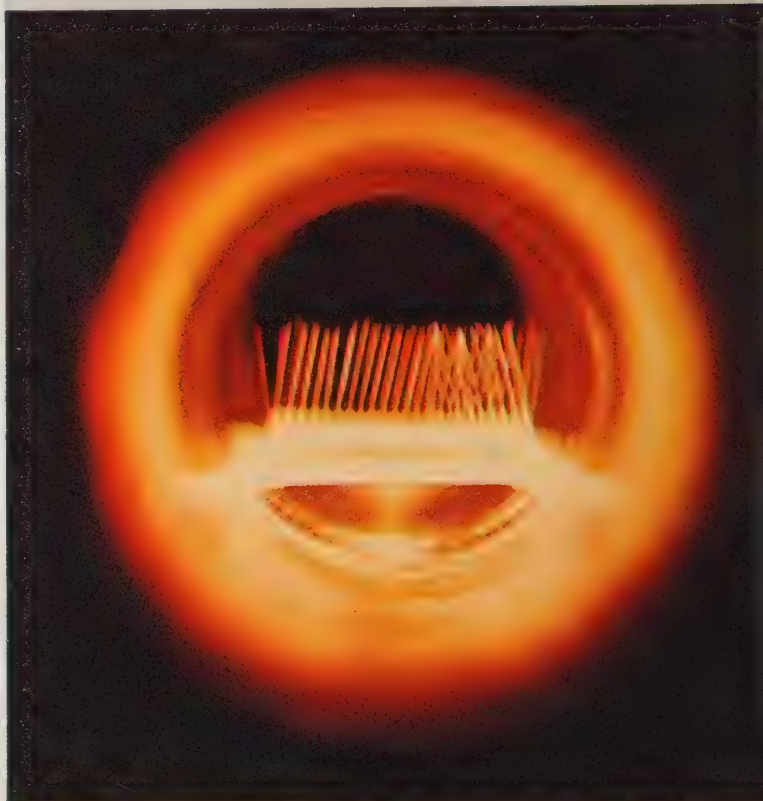
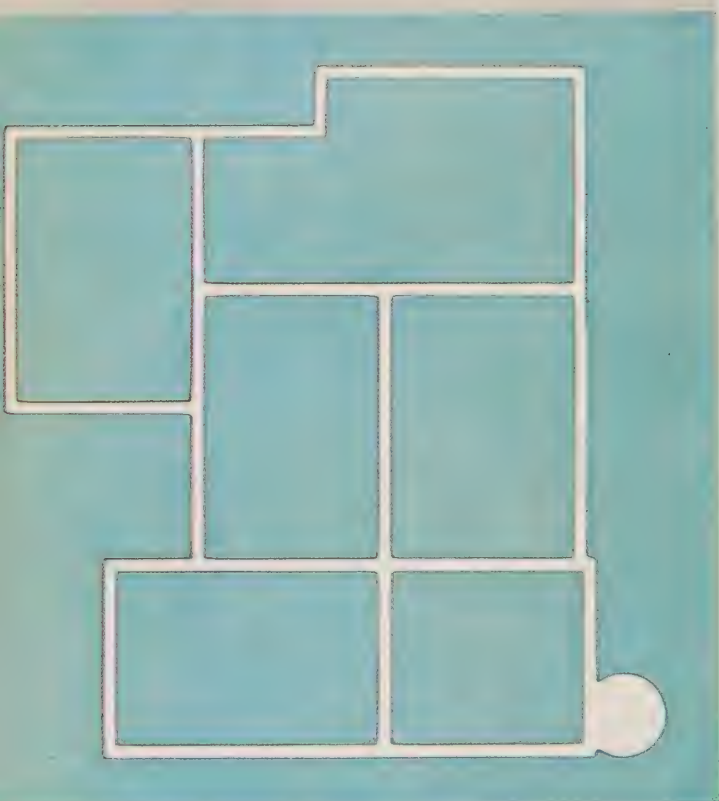
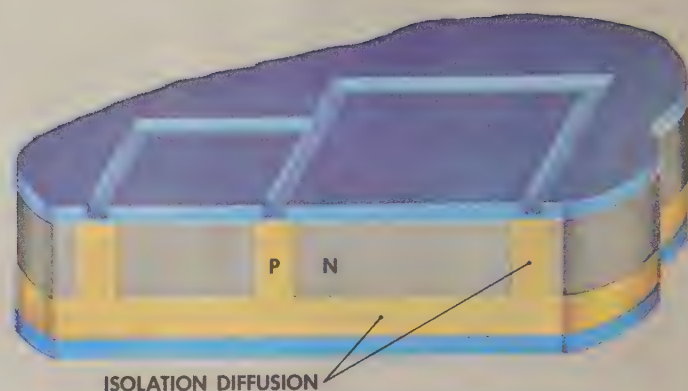
COUPE ET MEULAGE

Le cristal ainsi obtenu est découpé en lamelles d'une épaisseur approximative de 0,2 mm à l'aide d'une scie au diamant. Chaque lamelle est ensuite meulée à l'aide d'un abrasif très fin pour obtenir une surface très plane. Le polissage mécanique est suivi d'une attaque chimique qui produit une plaquette de 0,075 mm d'épaisseur avec une surface très lisse et brillante. Cette méthode est celle utilisée pour la fabrication des transistors PLANAR-FAIRCHILD.



OXYDATION

Les lamelles ainsi obtenues sont placées en atmosphère oxydante dans un four à 1200°C. L'oxygène pénètre dans le réseau cristallin en surface et se combine chimiquement au silicium pour former du bioxyde de silicium SiO_2 , qui est stable et inerte. Grâce à ce procédé classique chez FAIRCHILD, les lamelles sont « encapsulées » et les surfaces ainsi obtenues totalement passivées. Cette première étape, début du processus PLANAR, est la clef d'une production économique et fiable.



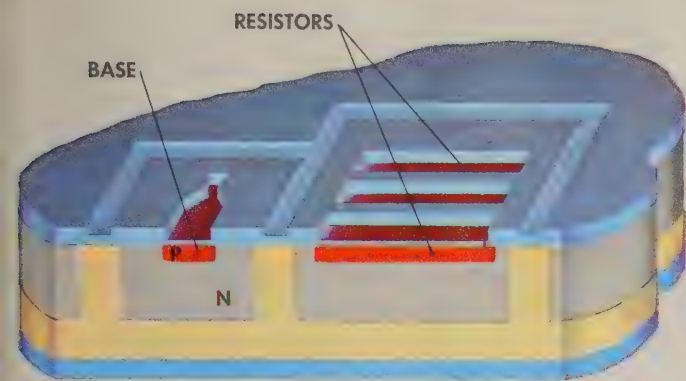
MASQUAGE PREPARATOIRE A L'ISOLEMENT

Une technique particulière est étudiée pour isoler électriquement les transistors individuels et les résistances. Les lamelles sont recouvertes d'une couche bioxyde de silicium. Elles sont ensuite exposées à la lumière à travers un masque à haute résolution. Les parties non exposées sont solubles et facilement éliminées à l'aide d'un solvant. Puis, une attaque chimique dissout le bioxyde de silicium de la surface qui n'a pas été protégée par le film photosensible. De cette manière, on obtient par photogravure des bandes minces, ou fenêtres, entourant la surface des transistors, qui apparaissent en creux à travers le bioxyde de silicium protecteur.

DIFFUSION D'ISOLEMENT

Les lamelles sont placées dans un four spécial à haute température dont l'atmosphère contient du bore à l'état gazeux. Le bore diffuse dans la surface du silicium, seulement aux endroits où cette surface a été mise à nu par le procédé de photogravure précédemment expliqué. Même aux températures élevées la couche de bioxyde de silicium est suffisante pour que cette impureté ne puisse pas atteindre le métal qu'elle recouvre. La température est alors élevée jusqu'à 1300°C ; l'oxygène est introduit, et le bore diffuse simultanément des deux côtés de la lamelle pour la traverser entièrement. Il laisse toutefois des poches du matériau originel de type N aux endroits protégés ; elles deviendront les régions de collecteur des transistors.

Ces régions sont séparées les unes des autres par la présence de l'isolement diffusé. Dans les surfaces où le bioxyde de silicium a été éliminé, une nouvelle couche est formée par oxydation de surface au cours de la diffusion.

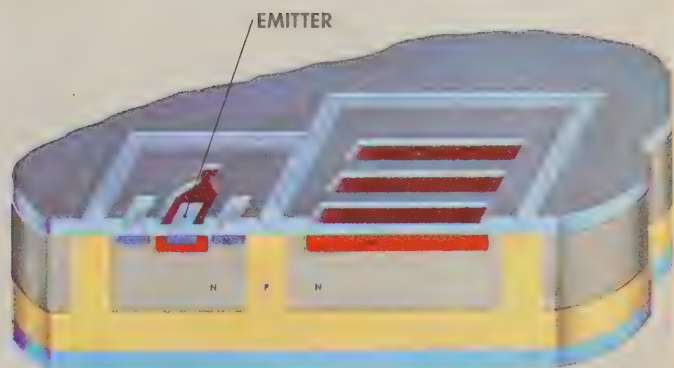


MASQUAGE ET DIFFUSION DES BASES

Pour obtenir les bases, on utilise une méthode identique de « masquage » et de diffusion. La lamelle est masquée et attaquée pour la diffusion simultanée des régions de base et des résistances. On utilise encore le bore comme impureté dans une diffusion à haute température. Les régions de base sont diffusées dans le matériau originel de type N, de façon à former les diodes collecteur-base des transistors, ainsi que les résistances du montage.

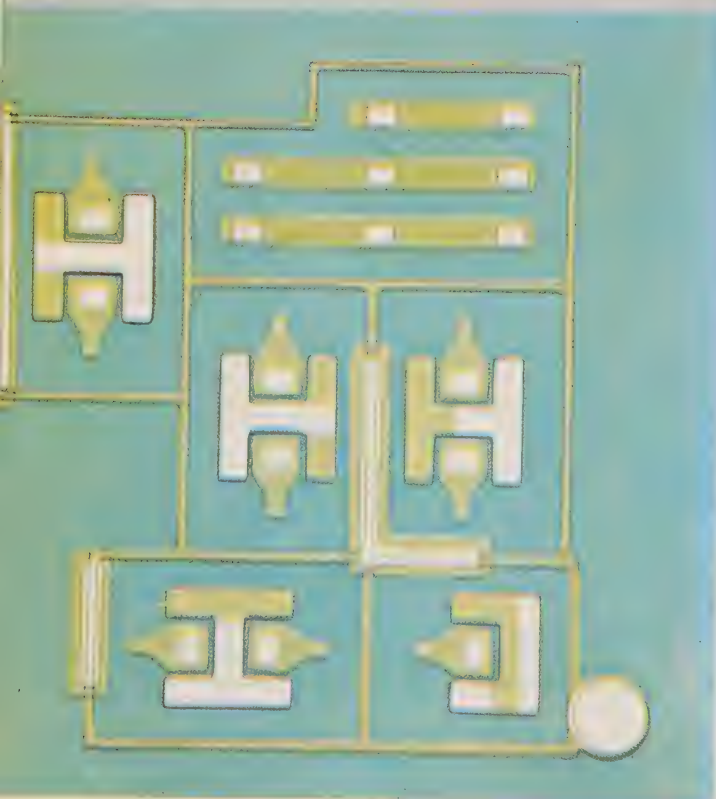
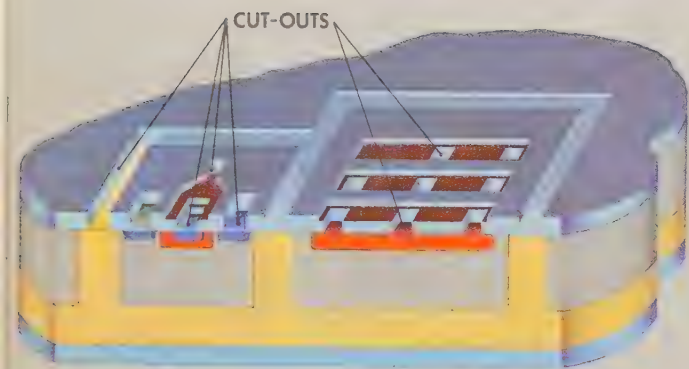
Au fur et à mesure que la diffusion avance, l'atmosphère d'oxygène du four oxyde à nouveau les parties de la surface qui ont été exposées et les protège contre toutes contaminations. La diffusion n'avance pas seulement en profondeur, elle progresse aussi latéralement, de telle sorte qu'elle pénètre dans le silicium recouvert par la couche d'oxyde protecteur. Le pourcentage d'impureté utilisé dans la base des transistors micrologiques est similaire à celui utilisé pour les transistors PLANAR FAIRCHILD.

La résistivité des zones ainsi diffusées est d'une valeur convenable pour l'utilisation comme résistance.



MASQUAGE ET DIFFUSION DES ÉMETTEURS

La méthode de « masquage » et diffusion précédemment décrite est également employée pour produire les émetteurs. L'oxyde est enlevé par « masquage » et photo-gravure pour dégager les surfaces des émetteurs et les contacts supérieurs des collecteurs. Une impureté de type N, (phosphore) est déposée sur la surface à haute température. La diffusion à lieu à 1 200° C environ. A nouveau, du bioxyde de silicium se forme pendant que la diffusion progresse, couvrant ainsi la surface photo-gravée et en assurant la protection. La diffusion latérale fait que les jonctions se produisent sous la couche de protection. On remarquera que dans chaque cas, l'extrémité de la région diffusée se termine sous la couche d'oxyde qui existait précédemment. Cette couche d'oxyde protège en permanence les jonctions contre toute exposition aux agents extérieurs en cours de fabrication ou en cours d'utilisation.



DEGAGEMENT DES SURFACES DE CONTACT POUR LES INTERCONNEXIONS

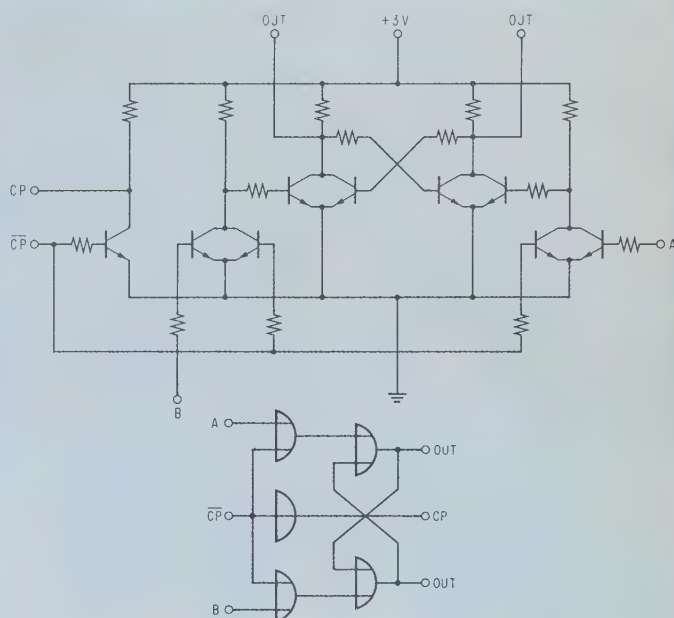
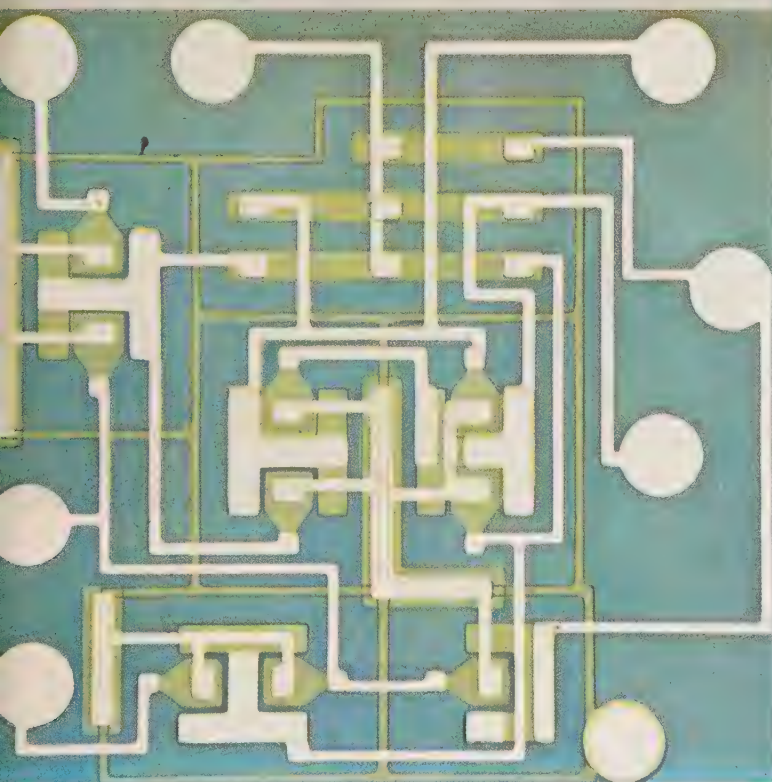
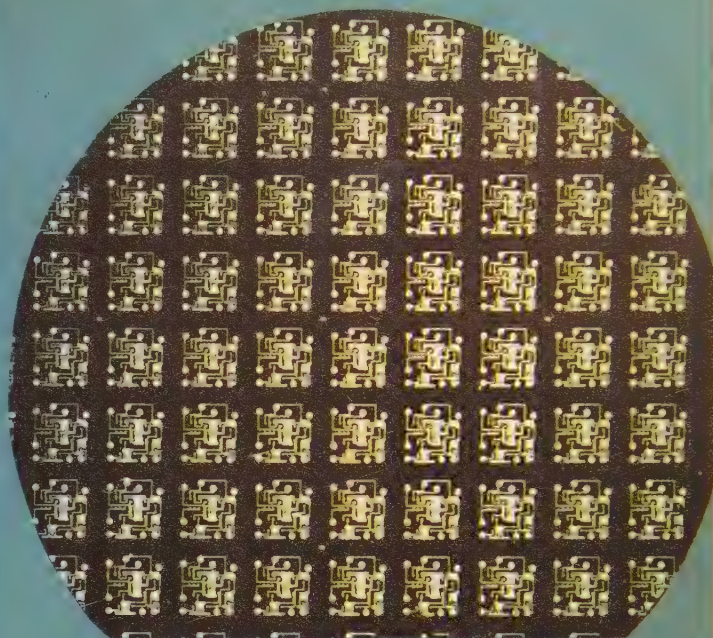
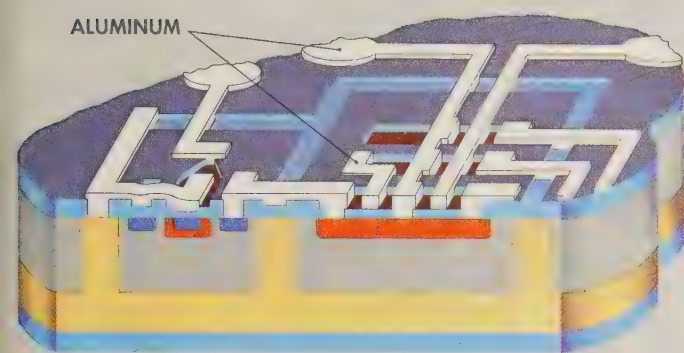
Les différentes étapes de fabrication ont produit les transistors et les résistances des **éléments micrologiques**. Il reste maintenant à les relier entre eux pour obtenir le montage logique désiré. Ceci est obtenu par l'évaporation d'interconnexion métallique sur la surface de la lamelle de silicium. Avant cette opération, il est nécessaire de graver photomécaniquement des trous dans l'oxyde de silicium au-dessus des régions appropriées des dispositifs, pour que le métal évaporé puisse faire contact. Pour cela on utilise la méthode de « masquage » précédemment décrite.



METALLISATION

Les lamelles sont placées sous une cloche dans laquelle on réalise un vide poussé. De l'aluminium est chauffé fortement sur un filament de tungstène. L'aluminium s'évapore et se dépose sous forme d'un film mince sur toute la surface de la lamelle. Beaucoup de lamelles, comprenant des centaines d'éléments micrologiques peuvent être traitées simultanément de cette façon.

ALUMINUM



INTERCONNEXIONS

A l'aide d'une nouvelle opération de photogravure, la couche d'aluminium est masquée, impressionnée et attaquée pour laisser un réseau d'interconnexions entre les transistors et les résistances du montage logique. Maintenant la lamelle d'éléments micrologiques (HALF-SHIRT REGISTER) est électriquement terminée, il ne reste qu'à la découper en circuits individuels et mettre ceux-ci sous capot. Jusqu'ici toutes les opérations ont été faites sur plusieurs lamelles. L'élimination de la manipulation séparée de chaque pièce est un facteur important de la réduction du coût de production. Ce procédé augmente également la fiabilité et l'interchangeabilité des éléments.

Comparons le schéma électrique et la microphotographie en couleur de l'élément terminé. Remarquons la section « Flip-Flop » au centre de l'image avec les interconnexions métalliques allant du collecteur d'un côté à la base de l'autre. On peut voir les collecteurs de chaque porte connectés à la base du « Flip-Flop » correspondant. Toutes les connexions vers l'extérieur (entrées, sorties, alimentation et masse) sont reliées à la périphérie à de grands cercles d'aluminium permettant des contacts faciles et fiables. Le point d'alimentation est relié au centre de la résistance de 1200 ohms et par conséquent à travers 600 ohms à chaque collecteur. Tous les émetteurs sont connectés à la zone d'isolement agissant comme masse commune.



MISE SUR EMBASE

L'opération de fixation utilise une technique dont la fiabilité a été largement vérifiée sur les transistors. La lamelle est coupée en petites plaquettes en utilisant une technique similaire à la coupe du verre. Une pointe de diamant est utilisée pour faire de fines rayures à la surface de la lamelle entre les circuits. Ensuite on brise la lamelle suivant ces rayures et l'on obtient des petites plaquettes carrées uniformes qui sont nettoyées, séchées et examinées au microscope à grande puissance avant toute manipulation couteuse.

L'élément est alors fixé par soudure eutectique au centre d'une embase type TO-5 à 8 fils de sortie. On procède ensuite à la pose des fils de liaison. En utilisant la thermo-compression, éprouvée par 5 années d'expériences FAIRCHILD, un fin fil d'or est fixé aux cercles d'aluminium d'entrée, de sortie et d'alimentation. Chaque fil est fixé sur une sortie de l'embase avec une soudure par point de haute sécurité.



CONTROLE FINAL ET MISE SOUS BOITIER

L'élément est alors soumis à un contrôle optique très sévère, de façon à s'assurer qu'il n'a pas été endommagé au cours des opérations de fixation. Il est ensuite lavé, séché, et chauffé sous vide de façon à éliminer toute humidité. Ensuite, et toujours sous vide le capot est soudé sur l'embase, ce qui assure l'étanchéité et la protection mécanique.

Toutes ces étapes sont identiques à celles utilisées pour la fabrication des transistors FAIRCHILD Standards. Les éléments micrologiques ou les transistors PLANAR peuvent être faits sur les mêmes lignes de production.

Après scellement final 100 % des éléments subissent les tests suivant :

- chocs mécaniques
 - cycles de température
 - accélération centrifuge
- ensuite,
- vérification de tous les paramètres électriques
 - essai de fonctionnement dans les conditions les plus défavorables.

Le contrôle de qualité effectue alors des prélèvements pour vérifier la conformité aux spécifications. Chaque semaine un échantillonnage est soumis d'un essai de durée de vie à 125°C.

MONTAGES LOGIQUES A TRANSISTORS

A COUPLAGE DIRECT

PAR

M. R. DANIEL
SGS — Fairchild SA

Les éléments Micrologic de FAIRCHILD utilisent des montages à couplage direct. Par exemple, la figure 1 représente le symbole logique et le schéma de principe d'une porte NOR. Ce schéma constitue l'élément logique de base utilisé. Il est particulièrement simple, puisqu'il ne contient qu'un transistor pour chaque entrée et une seule résistance de collecteur. Le signal de sortie de la porte est un 1, c'est-à-dire un potentiel positif, si aucun des signaux d'entrée n'est un 1.

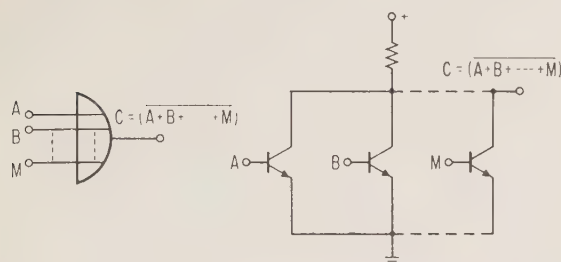


FIG. 1. — Symbole logique et schéma d'une porte NOR à couplages directs à transistors.

Le montage à couplage direct a été choisi pour les éléments Micrologic en raison de sa simplicité, de sa faible consommation, de sa vitesse élevée et de son insensibilité à des variations importantes de certains paramètres. Une des limitations du montage est qu'il exige un type de transistor ayant d'étroites tolérances du courant de base pour une valeur déterminée de la tension de base en position fermée. Cette exigence est imposée par une caractéristique particulière du courant, ainsi qu'on va le voir dans un instant. Une des phases du programme Micrologic était précisément le développement d'un transistor convenable.

La figure 2 représente à la fois le montage et la caractéristique tension-courant correspondante.

Dans ce montage, le transistor Q_1 attaque N charges. Une de ces charges est un simple inverseur.

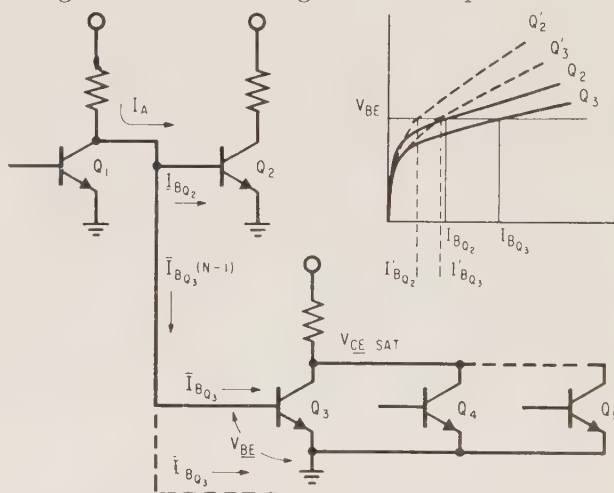


FIG. 2. — Effet de la dispersion du courant de base en position de conduction (Q_1 : bloqué, Q_2 : saturé, Q_3, Q_4, Q_5 : saturés).

$(N - 1)$ de ces charges sont des portes à entrées multiples. Tous les transistors de la charge sont en position fermée, donc à la saturation. L'inverseur simple a la caractéristique identifiée Q_2 sur les courbes. Les autres $(N - 1)$ charges ont la caractéristique d'entrée Q_3 , car leurs collecteurs sont communs à une même résistance de charge. Pour une tension base-émetteur déterminée, par suite, la base de l'inverseur consommera un courant $I_B(Q_2)$. Les autres $(N - 1)$ bases consommeront chacune un courant bien plus important $I_B(Q_3)$. Il existe par conséquent une forte possibilité que le courant intense consommé par les $(N - 1)$ charges ne permette pas à la tension

base-émetteur d'atteindre une valeur suffisante pour amener complètement Q_2 en conduction.

Cependant, si les caractéristiques d'entrées des bases sont à très peu près uniformes et si la résistance d'entrée de la base est modérément augmentée, la disparité des courants d'entrée est considérablement réduite, ainsi qu'il est indiqué par les courbes en pointillés. Il est donc nécessaire qu'un transistor pour montages logiques à couplage direct offre cette particularité des caractéristiques.

Dans l'établissement d'un circuit logique, il est nécessaire de spécifier le niveau des signaux représentant les 1 et les 0. Dans les montages logiques à transistors à couplage direct, un 1 est représenté par un potentiel positif, dont le niveau est largement déterminé par les bases attaquées. Un 0 est représenté par un potentiel voisin de la masse, sa valeur étant déterminée par la tension de saturation des transistors de sortie et par le nombre de transistors de sortie en parallèle.

Le degré de saturation en condition fermée, et l'intensité permise du courant de collecteur dans la condition ouverte, sont à la discrétion de l'ingénieur dans certaines limites. Il existe bien des combinaisons de niveaux de 1 et 0 qui semblent convenir. Quelles sont donc exactement les limites ?

Dans les montages considérés ici, nous traitons naturellement d'un système distribué, entièrement composé de portes très similaires.

Lorsque l'on détermine les valeurs limites que peuvent prendre les niveaux du signal, il est évident que la solution doit être satisfaisante pour tout circuit logique dans un système entier. Le problème à résoudre peut être envisagé de cette façon : supposons une cascade infinie d'étages logiques à couplage direct. Quelle est la tension de mise en conduction la plus faible, et la tension de mise en coupure la plus élevée, qui puissent apparaître sur une base quelconque, sous la condition que tous les étages suivants de la cascade soient alternativement fermés et ouverts. En se référant à la figure 3, quelle est la tension la plus élevée que l'on peut appliquer à la base de Q_0 , tout en respectant la condition que Q_0 et tous les transistors pairs soient à la coupure, et que Q_1 et tous les transistors impairs soient en conduction ?

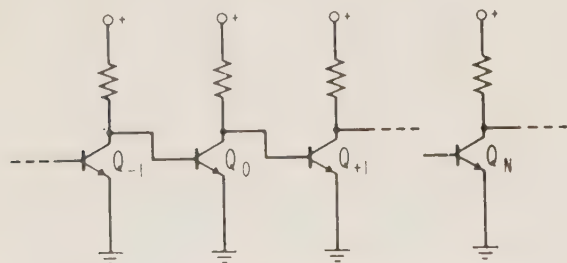


FIG. 3. — Montage en cascade d'une série d'inverseurs.

De même, quelle est la tension de base la plus faible que l'on puisse appliquer à Q_0 pour assurer que Q_0 et tous les transistors pairs conduisent suffisamment pour maintenir les transistors impairs à la coupure ?

Ce problème peut être analysé graphiquement en se référant au montage de la figure 4 et aux courbes de la figure 5. Les courbes donnent V_{CE} en fonction de V_{BE} pour un groupe représentatif de transistors appropriés avec des résistances de collecteur. Les limites supérieures et inférieures correspondant au point 3σ de la distribution. La boucle de réaction à deux transistors de la figure 4 simule une cascade

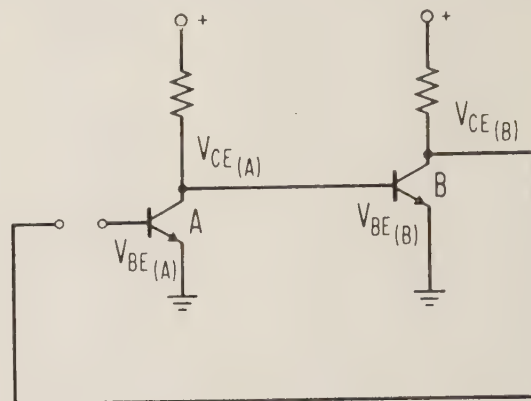


FIG. 4. — Boucle de réaction contenant deux transistors.

infinie. Le transistor A a une caractéristique correspondant à la courbe supérieure de la figure 5. Le transistor B est représenté par la courbe inférieure.

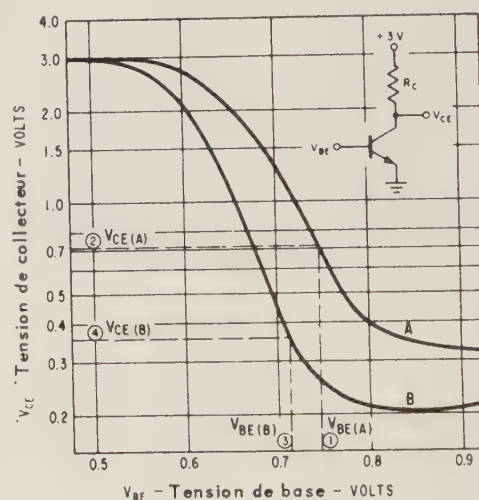


FIG. 5. — Courbe illustrant les limites à 3σ de la dispersion de V_{CE} en fonction de V_{BE} pour un groupe de transistors avec des résistances de collecteur.

Supposons au départ que A soit à la coupure, B en conduction et que la boucle de réaction soit ouverte. Une tension d'essai de mise en conduction 1 appliquée à A produit une tension 2 au collecteur de A et à la base de B. Pour une tension 3 sur la base de B égale à la tension 2 sur le collecteur de A, on voit que le niveau de sortie de B correspond à 4, dont la valeur est inférieure à la tension appliquée initiale. Par suite, la tension appliquée était insuffisante pour commuter les états stables si la boucle de réaction avait été connectée ; cette tension aurait été insuffisante pour commander une longue cascade.

Dans la figure 6, on a choisi une valeur plus élevée pour la tension de départ en 1. Si l'on répète le raisonnement précédent en passant de 1 à 2 à 3 à 4, on trouve que la tension résultante 4 est plus élevée que la tension initiale appliquée. Par suite, cette tension initiale était suffisante pour assurer le basculement des états stables si la boucle de réaction avait été connectée. Cette solution est indiquée par les lignes en pointillés longs de la figure 6. On peut répéter cette procédure graphique pour des valeurs intermédiaires de la tension de commande appliquée, afin de déterminer la valeur limite qui produit le basculement en position fermée. Cette condition limite est représentée par les lignes en pointillés courts de la figure 6. Comme A offre la caractéristique la plus mauvaise de mise en conduction, on voit que l'on a traité le cas le plus défavorable, et que tous les transistors seront basculés en conduction pour la valeur limite déterminée.

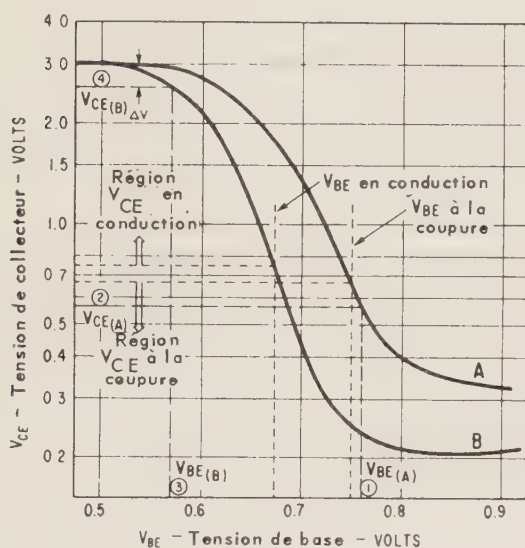


FIG. 6. — Courbes représentant V_{CE} en fonction de V_{BE} pour la solution graphique, et point de fonctionnement limite.

Le choix de la valeur limite de la tension de mise en conduction détermine aussi de façon implicite la tension maximale qui peut apparaître sur la base d'un transistor à la coupure. En choisissant la tension limite de commande base-émetteur, on a défini la condition fermée comme la condition pour laquelle la tension collecteur-émetteur est égale à la tension collecteur-émetteur en position fermée, ou à une valeur inférieure, ainsi qu'il est apparent dans la région « fermée » de la tension collecteur-émetteur de la figure 6. Comme cette tension est égale à la tension de base de l'étage suivant, on voit que la tension de base d'un transistor à la coupure doit être égale ou inférieure à la tension base-émetteur en position ouverte.

Par conséquent, la valeur de la tension base-émetteur en position fermée et en position ouverte définit les niveaux limites pour les transistors ouverts et fermés dans la boucle de réaction ou dans la cascade. On obtiendrait les mêmes valeurs si l'on partait d'une tension initiale appliquée à B pour le basculer en position de coupure.

Cette solution graphique est une solution préliminaire qui a pour but d'éclairer le fonctionnement fondamental du montage et la méthode d'analyse de cascades de transistors en considérant la dispersion des paramètres. Cette solution ne tient pas compte des effets de charge ou de la nécessité d'éliminer le bruit. Ces considérations vont être maintenant abordées.

Pour la solution graphique en tenant compte de la charge, considérons la boucle de réaction à deux transistors de la figure 7 et les courbes de la figure 6. Ici, la sortie du transistor B a une charge en courant. Comme précédemment, on choisit une tension d'essai de mise en conduction supérieure à la valeur limite. Si l'on suit les points 1 à 2 à 3 à 4 de la figure, on voit que la tension initialement appliquée résulte en l'apparition d'une tension V_{CE} (B) au collecteur de B.

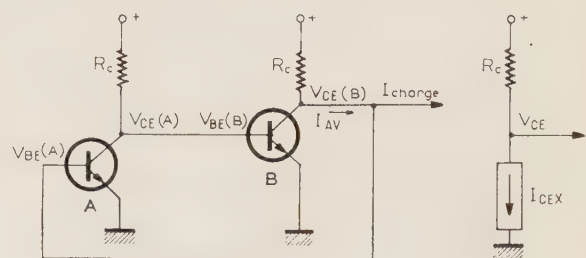


FIG. 7. — Boucle de réaction à deux transistors avec courant de charge, et circuit équivalent du second transistor.

Ces courbes ont été relevées pour un collecteur non chargé. Il est évident que, dans le montage de la figure 7, la base du transistor A ne permettra pas au collecteur du transistor B d'atteindre la valeur indiquée par le graphique, mais l'alignera à une valeur plus faible, correspondant à la tension base-émetteur du transistor A en position de conduction.

On peut toutefois retirer une information intéressante de la valeur de V_{CE} (B). Elle indique le courant de collecteur consommé par le transistor B lorsqu'une tension V_{BE} (B) est appliquée à sa base. Ce courant est

$$I_{CEX} = \frac{\Delta V}{R_C}$$

En première approximation par suite, on peut considérer le transistor B comme un générateur de courant consommant un courant I_{CEX} à sa sortie, ainsi qu'on l'a indiqué figure 7. De façon que la tension supposée V_{BE} (A) soit maintenue lorsqu'un courant de charge est prélevé à la sortie de B, on doit avoir :

$$I_{AV} = \frac{V_{CC} - V_{BE}(A)}{R_C} - I_{CEX}$$

où I_{AV} et le courant disponible à la sortie de B pour attaquer la base de A et pour fournir tout courant de charge non spécifié sous une tension V_{BE} (A). Ce courant est facilement calculé. Si le courant disponible pour l'attaque de la charge est représenté en

fonction de la tension base-émetteur, on obtient une courbe comme celle de la figure 8, dans laquelle on a également représenté la dispersion de I_B . Le courant I_{AV} sur cette figure est le courant disponible à la sortie de B pour une tension base-émetteur déterminée, cette même tension étant appliquée à la base de A. On voit que, au fur et à mesure que le point de fonctionnement de la tension base-émetteur descend à partir d'une valeur élevée, le courant disponible augmente graduellement, puisqu'à travers R_C on peut obtenir davantage de courant pour une

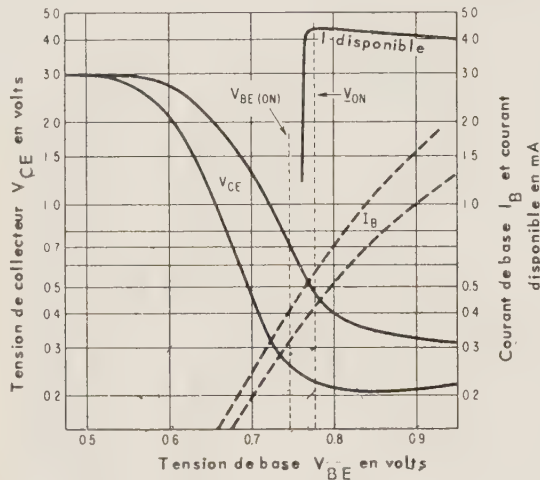


FIG. 8. — Tension de collecteur, courant de base, et courant disponible en fonction de la tension de base.

tension plus faible. Cependant, lorsque l'on approche du point de fonctionnement correspondant à la tension base-émetteur en position de conduction, le courant de fuite consommé par le transistor B à la coupure devient dominant, et le courant disponible diminue brutalement.

Lorsque l'on connaît le courant disponible et le courant base-émetteur en fonction de la tension base-émetteur, on peut rapidement déterminer les possibilités de charge, c'est-à-dire le nombre de connexions en éventail à la sortie, en fonction de la tension base-émetteur. Il est évident que pour tout point de fonctionnement de V_{BE} le nombre des bases de transistors qui peuvent être attaquées par la sortie est égal au courant total disponible divisé par le courant nécessaire pour chaque base. Le nombre de branches de l'éventail de sortie N est par suite donné par l'équation

$$N = \frac{I_{AV}}{I_B} \bigg|_{V_{BE}}$$

Dans cette équation I_B est la valeur supérieure 3σ du courant de base pour la tension V_{BE} donnée.

Comme cette fonction passe par un maximum au voisinage de la valeur maximale de I_{AV} , la valeur spécifiée du minimum acceptable pour V_{BE} en position de conduction est prise en ce point. Cette valeur est définie comme V_{ON} . A son tour, elle spécifie la valeur acceptable maximale de V_{BE} pour la mise à la coupure.

Pour récapituler, la tension sur la base en conduction a une valeur minimale autorisée V_{ON} qui est la tension nécessaire pour mettre en conduction tous les transistors, de sorte que tous les collecteurs soient à une tension V_{OFF} ou à une tension inférieure. Cette tension, est à son tour, suffisamment basse pour que tous les transistors auxquels elle est appliquée aient une tension V_{CE} égale à V_{ON} alors qu'ils fournissent le courant nécessaire pour attaquer l'éventail spécifié.

On remarquera que, alors que V_{ON} est la tension nécessaire pour basculer en conduction un inverseur à la limite des caractéristiques, les courants de charge I_B utilisés pour déterminer le nombre de branche de l'éventail de sortie sont ceux exigés par des transistors avec des collecteurs alignés. Les calculs ont donc été basés sur les conditions les plus sévères d'éventail de sortie.

En résumé, on a graphiquement analysé les distributions de V_{CE} et de I_B en fonction de V_{BE} de façon à évaluer le courant disponible et l'éventail possible en fonction de V_{BE} . En déterminant la tension de mise en conduction minimale et la tension de mise à la coupure maximale qui sont autorisées à apparaître sur la base d'un transistor, on s'est assuré que la valeur calculée de l'éventail sera applicable à chaque sortie.

Les méthodes de calcul du courant disponible et de l'éventail possible qui viennent d'être présentées offrent un intérêt essentiellement théorique. Elles permettent d'obtenir une meilleure compréhension du fonctionnement des montages logiques à couplage direct à transistors, et illustrent les procédures d'évaluation utilisées au cours du développement d'un transistor spécial pour les éléments Micrologic. Elles sont utiles pour l'évaluation des performances possibles, mais ne sont pas employées pour déterminer des limites d'acceptation au cours des essais. En effet, les essais d'acceptation sont basés sur des mesures qui donnent une indication directe du fait qu'un courant suffisant est disponible, plutôt que sur des valeurs calculées. L'emploi des méthodes de calcul exposées permet donc d'établir le projet d'un système, même complexe, avec la certitude que les résultats pratiques corroboreront les conclusions des calculs.

LES CIRCUITS INTÉGRÉS

PAR

J. BLANLUET

*Département de Recherches Physico-Chimiques
de la C. S. F.*

Introduction

L'avancement des études de base en Physique et en Métallurgie, l'important effort de développement des Composants Electroniques, en particulier des éléments semiconducteurs, la nécessité croissante de réaliser des matériels toujours plus petits bien que plus complexes, ainsi que la recherche des moyens propres à diminuer les causes de pannes des ensembles à grand nombre de composants, ont donné naissance à une nouvelle électronique, la *Microélectronique*.

La microélectronique est nouvelle en ce sens qu'elle oblige à repenser les moyens et les méthodes de réalisation des équipements électroniques en imposant une répartition différente des tâches entre le fabricant de composants et le réalisateur d'un ensemble, cette répartition s'accompagnant d'ailleurs d'une nécessaire collaboration.

De nombreux articles ont déjà été publiés au sujet de la Microélectronique. On trouvera, par exemple, d'intéressants articles dans les Communications du Colloque International sur les semiconducteurs tenu à Paris en février 1961 [1], ainsi que dans les « Proceedings of the Agard Conference », conférence tenue à Oslo en juillet 1961 [2], ou encore dans la revue spécialisée « Electronics Reliability and Microminiaturization » [3].

La microélectronique englobe les technologies nouvelles issues des efforts pour microminiaturiser les équipements des avions, des engins et des véhicules spatiaux.

L'objectif de base, la *Microminiaturisation*, est la réduction en volume et en poids [4] des équipements. Elle s'accompagne nécessairement d'une réduction des consommations pour avoir des puissances dissipées compatibles avec l'accroissement de densité des composants [5], [6].

La densité en composants peut atteindre le chiffre

de 1 000/cm³. En fait, quand on considère l'interconnection des éléments, on atteint environ le chiffre de 100/cm³.

Un second objectif est la recherche de la *Fiabilité*.

La *Fiabilité*, c'est d'abord la durée de vie, d'où la notion de « *circuits intégrés* » qui, en mettant en jeu des « fonctions composants » de fiabilité intrinsèque égale ou supérieure à celle des composants classiques, permet de réduire notablement le nombre d'interconnexions, cause de pannes fréquentes.

Comme l'absence totale de pannes est un leurre, la *fiabilité* c'est aussi la mise en œuvre de méthodes de redondance ou d'auto-dépannage, un circuit déficient étant remplacé automatiquement par un autre [7], [8].

C'est pourquoi, la *fiabilité* impose un *bas prix de revient* [9], la redondance ou l'auto-dépannage nécessitant en effet la multiplication des blocs fonctionnels élémentaires.

Réciproquement, pour le fabricant, les méthodes de redondance apportent un moyen de produire les blocs fonctionnels avec le rendement nécessaire à l'obtention de faible prix de revient.

C'est à ce titre que cette nouvelle électronique élargit son domaine d'intérêt vers les ensembles où la microminiaturisation ne s'impose pas forcément, tels que les calculateurs numériques très intéressés à la production de *blocs fonctionnels* à bas prix de revient, leurs prix conditionnant le coût de la maintenance.

Une fois admis l'intérêt de la microminiaturisation, les moyens mis à la disposition de l'utilisateur peuvent se classer en cinq groupes (¹).

(¹) Voir Article d'Introduction de M. X. AMEIL.

Parmi ceux-ci, deux utilisent les technologies de fabrication des semiconducteurs. Ce sont, d'une part, les procédés de réalisation des « *Microcircuits* » [10], [11] et [12] et, d'autre part, les procédés de réalisation des « *circuits solides* », nom donné par la Société Américaine TEXAS INSTRUMENTS, à la réalisation de blocs fonctionnels au sein d'un même monocristal.

Nous désignons par « *Circuits Intégrés* » l'ensemble de ces groupes.

Illustrons par un exemple ce qu'est un « *Circuit Intégré* ».

Les machines à calculer numériques peuvent être bâties à partir d'un circuit de base unique, le circuit NOR [13], [14]. Ce circuit peut être bâti pour ne comprendre que des éléments actifs identiques (transistors) et une résistance.

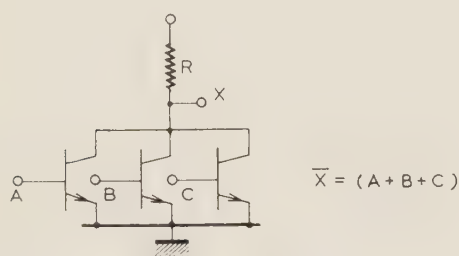


FIG. 1. — Circuit NOR.

Dans la conception traditionnelle, l'utilisateur achète séparément transistors et résistances et les assemble après contrôles.

La tentation est forte de demander aux fabricants de transistors de réaliser à la fois les 3 transistors ainsi que la résistance. Des précurseurs ont répondu par l'affirmative puisque l'on trouve dans le commerce sous différents noms de marques d'ailleurs, des blocs fonctionnels bâtis sur ce principe.

En fait, les blocs fonctionnels présentés sont plus élaborés qu'un simple circuit NOR et peuvent comprendre des diodes et des capacités comme nous le verrons plus loin.

« Les circuits solides » représentent une technique de fabrication riche en promesses. Nous verrons cependant qu'elle comporte des limitations importantes qui obligeront l'utilisateur soit à repenser la réalisation traditionnelle des circuits, soit à adopter des techniques hybrides de microminiaturisation.

En particulier, l'association des techniques du second et du troisième groupe peut fort bien être envisagée par un utilisateur [15]. De même, on peut prévoir l'assemblage des microcircuits comme l'empilement des plaquettes d'un micromodule.

Plus généralement, sur un « *circuit solide* » servant de support est déposé le reste du circuit sous forme de « *microcircuit* » et chaque circuit élémentaire ainsi réalisé est assemblé sous forme de « *micromodules* ».

C'est la classe des *circuits intégrés hybrides*.

Les problèmes de choix des circuits : la collaboration utilisateur-fabricant

Dès le moment où un circuit est « intégré », la modification du circuit pose de sérieux problèmes à l'utilisateur, qui ne peuvent trouver leurs solutions que dans un indispensable échange entre fabricant et utilisateur dans la mesure où l'on ne peut a priori normaliser tous les circuits sous peine d'en freiner le développement.

Avec les « *Circuits Intégrés* », la modification coûte cher tant par l'accroissement du prix de revient lors de l'étude du circuit que par le délai plus ou moins long qu'elle exige selon la technologie adoptée. En fait, l'utilisateur de matériels « miniaturisés » connaît déjà cette limitation. Et l'on sait combien l'étude initiale bien conduite d'un équipement et le choix de la technologie de réalisation au début d'une étude ont une grande importance, les modifications d'un matériel en cours de mise au point ne pouvant être que mineures.

On conçoit, dès lors, combien la collaboration entre utilisateur et fabricant a d'importance au départ au moment du découpage d'un équipement en « *blocs fonctionnels* ». Car, d'une part, le découpage impose les fonctions à réaliser et d'autre part, la possibilité ou non de réalisation de ces fonctions par le fabricant réagit sur l'étude du matériel, des « astuces » de circuit devant parfois compenser les insuffisances de certaines technologies pour réaliser les fonctions demandées. Citons par exemple l'impossibilité de réaliser en circuits solides des selfs et transformateurs, ainsi que les capacités de grosse valeur.

Peut-on dans ces conditions espérer faire l'étude d'un matériel dans un délai raisonnable et en espérer un prix de revient non exorbitant ?

Il est évidemment trop tôt pour le garantir ou le nier. Certains auteurs américains espèrent que le temps passé en sélection, passage des ordres de commande, stockage, inventaires, contrôles, etc., des pièces détachées sera récupéré et compensera le coût initial beaucoup plus élevé d'un circuit intégré.

Par ailleurs, un effort de normalisation des circuits standards peut être envisagé. Certains auteurs admettent que 30 fonctions au plus servent aux équipements électroniques [16].

En fait, si l'on considère la seule fonction « amplificateur », on doit déjà en trouver un certain nombre : video, FI, différentiel, etc., et il est probable qu'on définira plus de 30 fonctions élémentaires.

Il y a, en conséquence, un énorme travail à organiser si l'on veut éviter que les efforts des fabricants ne se dispersent trop au départ.

C'est pourquoi il importe que le fabricant connaisse rapidement les besoins futurs des utilisateurs afin d'organiser ses moyens de production pour satisfaire leurs demandes en circuits intégrés.

Le nombre de circuits produit par une chaîne conditionne en effet leur prix. Plus les productions seront importantes, plus les prix de revient diminueront, moins cher sera la maintenance d'un équipe-

ment, un circuit déficient étant remplacé par un autre conservé en stock sans qu'on cherche à récupérer le circuit en panne.

C'est le procédé de maintenance par « mise au rebut » des blocs fonctionnels interchangeables dans lequel on stoppe le dépannage à un niveau « d'outils » plus élaborés que les composants individuels.

La « standardisation » des circuits, c'est-à-dire la définition de circuits standards objets d'une production de masse, n'est cependant pas le seul problème à considérer.

Un matériel constitue un tout, et si la frontière du domaine du fabricant est bien définie quand on a normalisé les caractéristiques d'un certain nombre de circuits, l'assemblage des blocs fonctionnels est le souci majeur de l'utilisateur.

Il ne suffit pas de produire et de transformer les « signaux », il faut les transmettre, sans les perturber entre deux sous-ensembles d'un matériel et parfois ces liaisons sont longues. Là encore, la définition des niveaux des signaux et des impédances de fermeture des liaisons exigent une collaboration étroite entre fabricants et utilisateurs pour définir les circuits d'adaptation non standards.

Les problèmes techniques

LE « CIRCUIT SOLIDE »

Ainsi qu'il a été écrit précédemment, l'utilisateur a besoin de « Blocs Fonctionnels », de présentation et de conditionnement uniformes, si possible prévus, pour permettre l'interconnection commode des différents ensembles électroniques entre eux et avec le reste des équipements autres que les circuits.

Le circuit solide est un « *Circuit Intégré Fonctionnel* ». Une ou plusieurs « puces » d'un monocristal sont assemblées dans un même « boîtier » pour réaliser la fonction élémentaire désirée.

Chaque puce ou barreau de semiconducteur réalise l'intégration d'un certain nombre de composants passifs ou actifs du circuit initial, un composant correspondant à une zone du cristal plus ou moins distincte des autres.

Il arrive même qu'on ne puisse plus distinguer deux composants l'un de l'autre au sein du cristal. Par exemple, une résistance est associée à une capacité et constituent de plus des éléments « répartis » ou bien encore deux éléments actifs intégrés acquièrent du même coup des propriétés que n'auraient pas les deux éléments montés dans un circuit normal.

Il existe, il peut exister, et il existera sans doute, un grand nombre de « *Circuits Solides* » au fur et à mesure que les besoins seront plus importants.

Des précurseurs ont déjà réalisé en « circuits solides » un grand nombre de circuits tant logiques que linéaires [17] [18].

Le démarrage en France de cette technique de mi-

crominiaturisation est trop récent pour qu'on puisse disposer d'une expérience aussi grande.

L'étude des « *Circuits Solides* » est lancée avec comme objectif la réalisation de la « cellule de base » des calculateurs digitaux. C'est un circuit NOR qui doit permettre une cadence d'horloge de 10 MHz avec une puissance consommée de 15 mW. Ce circuit de base doit donner naissance à des circuits intégrés plus complexes pouvant combiner jusqu'à 5 à 7 circuits NOR dans le même boîtier sans modifier le processus de fabrication.

La même chaîne de fabrication pourra également fournir les circuits linéaires qui n'exigent d'y apporter que des modifications mineures pour satisfaire à l'exigence du bas prix de revient.

On trouvera dans l'article de MM. D.H. ROBERTS, B.L.H. WILSON et J.M. ALLEN les « fondements de la fabrication des circuits solides » [19].

MÉTHODES DE RÉALISATION

Diverses voies de réalisation sont actuellement étudiées au Laboratoire. Elles ont en commun un certain nombre de techniques de base que l'on peut ainsi résumer :

Matériaux

Le matériau de base est le silicium. Du monocristal à la plaquette qui sert de base à la fabrication du circuit solide, découpage, polissage, contrôles, sont du domaine des technologies des semiconducteurs.

Technique de fabrication

La fabrication du circuit utilise essentiellement le procédé de fabrication « Planar » bien qu'on puisse faire usage des procédés d'alliage ou « Mesa » quand ils s'imposent.

La diffusion a lieu en phase vapeur dans les fours à deux zones avec réservation par masques d'oxyde SiO₂.

On utilise éventuellement l'épitaxie. Les contacts sont obtenus par « métallisation sous vide » de la surface et éventuellement, certains autres procédés connus pour la fabrication des transistors silicium.

L'emploi de la thermocompression est courant pour les soudures. La « passivation » des surfaces est toujours recherchée.

Éléments actifs

On utilise comme éléments actifs de base aussi bien les transistors à jonctions que les transistors à effet de champ.

D'autres articles décrivent des circuits réalisés avec des transistors du type classique. Pour illustrer ces techniques, nous allons indiquer une façon de réaliser un bistable utilisant l'effet de champ.

L'ÉLÉMENT A EFFET DE CHAMP

On représente figure 2 l'élément à effet de champ isolé dans le reste du monocristal.

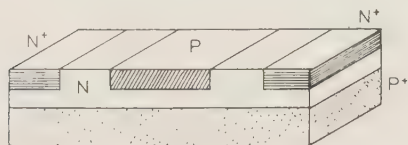


FIG. 2. — Réalisation d'un transistor à effet de champ.

La résistance du canal entre cathode et anode peut être modulée par la tension appliquée aux « grilles » de commande (fig. 3).

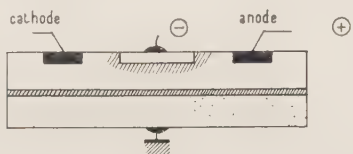


FIG. 3. — Fonctionnement physique du transistor à effet de champ. La résistance du canal entre anode et cathode est fonction de l'évolution de la charge d'espace sous chacune des grilles.

Pour un cristal dopé N, quand on rend les grilles « négatives » par rapport à la cathode, l'anode étant positive par rapport à celle-ci, on développe sous chaque grille une « charge d'espace » qui définit la section du canal de passage des porteurs (électrons) et en conséquence la résistance du barreau de silicium entre anode et cathode.

Le lecteur désireux de comprendre le mécanisme de ce phénomène pourra se reporter à l'article de M. J. GROSVALET [20].

On représente schématiquement ce « transistor à effet de champ » qui est un élément a priori « symétrique » de fabrication sinon par son utilisation, par la figure 4.

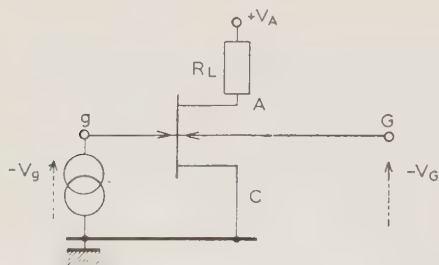


FIG. 4. — Représentation schématique du transistor à effet de champ.

Par ailleurs, on donne figure 5 le relevé des caractéristiques statiques.

On remarque que celles-ci ont l'allure de caractéristiques pentodes, ce qui explique l'utilisation des éléments à effet de champ en limiteur de courant, et

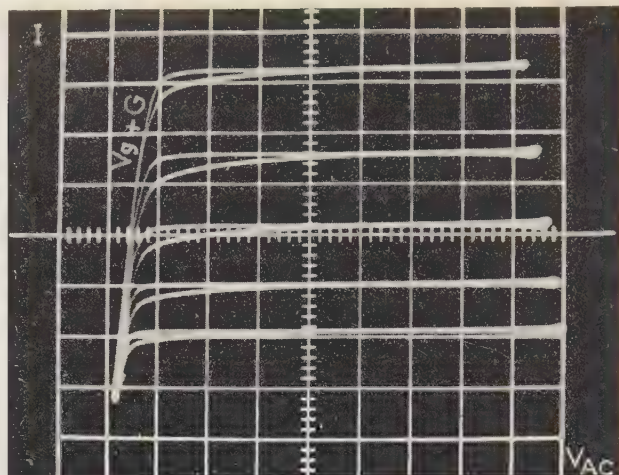


FIG. 5. — Caractéristiques statiques du transistor à effet de champ.

que la pente à l'origine des caractéristiques $I(V_{CA})$ est fonction de V_g , ce qui confère à l'élément des propriétés de résistance variable très utiles en circuits intégrés.

Pour une géométrie définie et un potentiel donné sur chaque grille au-delà d'une tension dite « tension de pinch-off », le courant reste quasi constant. Cette tension de pinch-off V_p est obtenue quand la vitesse des électrons a atteint dans le canal la « vitesse limite » imposée par le matériau au point de striction maximale [21].

Si l'on remarque par ailleurs que chaque grille est vis-à-vis de la cathode une diode polarisée en inverse, on conçoit que l'impédance d'entrée de cet élément puisse être élevée. On atteint couramment des valeurs supérieures à 10 MΩ. C'est donc un élément semiconducteur qui a des caractéristiques assez différentes des transistors jonctions. On en donne la photographie à la figure 6.



FIG. 6. — Transistor à effet de champ.

Le schéma équivalent en commutation peut se représenter comme sur la figure 7, en première approximation.

On voit que l'élément est essentiellement défini

par sa pente $g_m \mu\text{A/V}$ et ses capacités d'entrée : C_e , de transfert : C_T , de sortie : C_S .

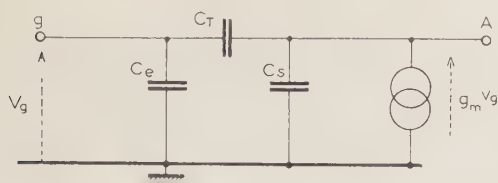


FIG. 7. — Schéma équivalent du transistor à effet de champ.

Les valeurs typiques de ces paramètres sont les suivantes :

$$\begin{aligned} g_m &= 500 \mu\text{A/V} \\ C_e &= 10 \text{ pF} \\ C_T &= 5 \text{ pF} \\ C_S &= 10 \text{ pF} \end{aligned}$$

LE CIRCUIT BISTABLE

Les caractéristiques

Le schéma du circuit bistable est donné ci-après. On le réalise par assemblage de deux circuits de base NI.

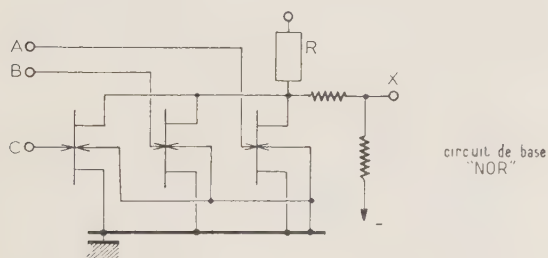


FIG. 8. — Circuit de base NOR.

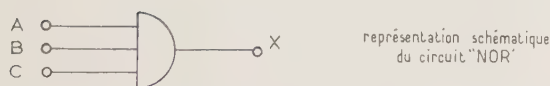


FIG. 9. — Représentation schématique du circuit NOR.

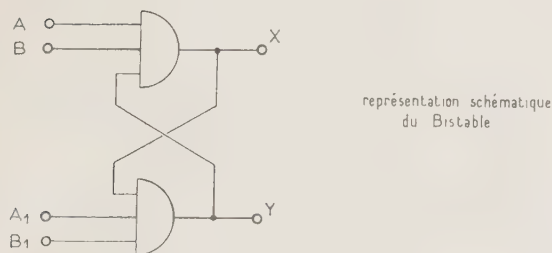


FIG. 10. — Représentation schématique du bistable.

Les entrées sont à haute impédance $\geq 1 \text{ M}\Omega$

Le signal « 0 » $V_0 \leq -0,2 \text{ V}$

Le signal « 1 » $-5 \leq V_1 \leq -1$

Les sorties sont à basse impédance pour faciliter l'attaque en parallèle de plusieurs autres circuits du même type ($N = 5$). Le gain de l'étage est ≥ 2 .

La fréquence d'horloge est de 0 à 1 MHz. Le temps de commutation est de l'ordre de 100 ns. La consommation est d'environ 30 mW.

La réalisation du circuit (fig. 11) :

On part d'une plaquette de monocristal de silicium de type P+ épitaxiée N sur une face ; on oxyde dans un four la partie N de la plaquette de façon à obtenir une épaisseur d'oxyde capable de servir de masque dans l'opération suivante, environ 3 000 Å. On dépose sur l'oxyde une couche photosensible (Kodak Photo Resist) qu'on isole à travers un cache de grande précision obtenu par réduction photographique. On réserve ainsi les espaces N+ sous forme de barres parallèles d'environ une trentaine de microns de large. On opère alors une prédiffusion de type N à forte concentration (phosphore). On oxyde à nouveau la surface pour y réserver les espaces de type P par un processus photo identique au précédent. Ces espaces réservés, on diffuse en atmosphère gazeuse de type P (Bore) pendant environ 2 heures (four à 2 zones).

On oxyde en fin de diffusion pour protéger la surface. Les éléments sont potentiellement terminés. En fait, chaque élément occupe une surface de plaquette d'environ 1 mm². On fabrique dans un même temps 100 éléments sur des plaquettes d'environ

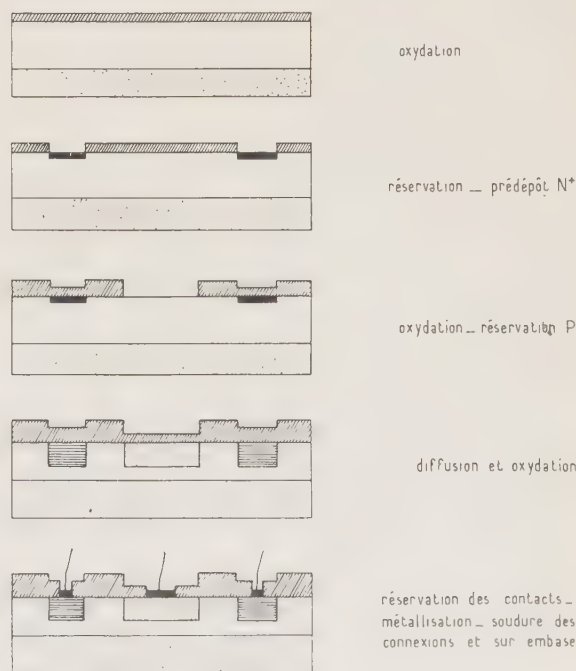


FIG. 11. — Réalisation du circuit de base NOR.

1 cm². Pour les isoler les unes des autres, on réalise une mesa collective qui découpe la plaquette en puces carrées d'environ 1 mm². Plusieurs éléments mis en parallèle constituent la résistance de charge du circuit NOR. Pour réaliser les interconnexions, on procède par métallisation sous vide de l'ensemble de la surface et par cache photographique.

Les limitations et les avantages des circuits solides

Du fait des techniques employées, on ne sait pas réaliser en circuits solides les éléments tels que selfs et transformateurs.

Pour microminiaturiser des fonctions qui comportent ces éléments, par exemple les filtres accordés, il faut imaginer de nouveaux circuits de remplacement [22]. De même, on ne sait pas réaliser sous forme de capacité de jonction les capacités de grosse valeur. On doit donc repenser les circuits pour éviter l'emploi de ces éléments irréalisables dans un monocristal.

Fort heureusement, si les circuits solides apportent des limitations à la réalisation des circuits habituels, la possibilité de réaliser plusieurs éléments identiques au cours du même processus de fabrication et côte à côte dans le même monocristal apporte une solution au problème de l'apairage des éléments.

Le circuit solide est un moyen élégant pour fabriquer par exemple des amplificateurs différentiels à liaisons continues doués d'une bonne stabilité. L'emploi de ces étages amplificateurs peut être une solution pour éviter d'avoir à placer dans les circuits des capacités de fortes valeurs, par exemple dans les étages amplificateurs basse fréquence. Ces limitations risquent donc d'imposer des solutions de circuits coûteuses. En fait, chaque cas sera un cas d'espèce compte tenu de l'objectif visé et de la quantité de circuits à produire.

Conclusion : L'avenir de la microélectronique L'électronique moléculaire

Que ce soient les Microcircuits ou les Circuits solides, on distingue encore les éléments de circuits classiques qui sont l'arsenal de l'électronicien.

Pour faire franchir une étape de plus à la Microminiaturisation, l'électronicien ayant pensé un matériel en terme de fonctions, le physicien s'efforcera de réaliser celles-ci en faisant l'inventaire des « moyens » dont il dispose [23].

C'est ce qu'on appelle l'Electronique Moléculaire.

On ne distinguera plus forcément une résistance, une capacité, etc. au sein du circuit intégré. Le phénomène physique ou les phénomènes physiques associés dans le circuit fournissent la fonction demandée.

Ainsi a-t-on associé physique du solide et phénomènes optiques [24]. Bien d'autres voies sont envi-

sageables qui exigeront sans doute la formation d'une nouvelle catégorie d'Ingénieurs Physiciens-Electroniciens.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Communications du Colloque International sur les Dispositifs à Semiconducteurs. Paris, 20-25 février 1961. 2 volumes Editions Chiron, Paris (1961).
- [2] Proceedings of the Agard Conference on Microminiaturization. Oslo, 24-26, 1961, 1 volume. Pergamon Press, 1962.
- [3] Electronics Reliability on Microminiaturization, revue trimestrielle, Pergamon Press.
- [4] BERTRAIS J. — Methodes d'optimisation appliquées à la microminiaturisation. Proceedings of the Agard Conference. Oslo, 1961, Pages 45-63.
- DUMMER G.W.A. — A Review of British work on Microminiaturization. Proceedings of the Agard Conference, Oslo, 1961, Pages 1-23.
- [5] SURAN J.J. — Considérations sur les circuits relatives à la microélectronique. *PIRE*, février 1961. Page 420.
- [6] MEINDL J.D. — Power dissipation in Microelectronics transmission circuits. *Trans. IRE, MIL* 1961, p. 209.
- [7] TURNER J.C. — Reliability and operability of system components in series and in parallel. *Electronics Reliability and Microminiaturization* 1, 1962, p. 21-26.
- [8] SORESENSEN A.A. — Digital circuit reliability through redundancy, idem, p. 27-37.
- [9] STELMAK J.P. — Molecular Electronics and Microsystems. *Electrical Engineering*, July 1961, p. 504.
- [10] STONE H.A. Jr. — System of Tantalum film circuitry. Proceedings of the Agard Conference, Oslo, 1961, p. 186.
- [11] GAFFEE D.I. — The Microcircuit concept, idem, p. 214.
- [12] CAROLL W.N. — Thin film microcircuit networks, idem, p. 228.
- [13] PINET A. — Systèmes de circuits logiques rapides à élément de base unique. *Onde Electrique*. Novembre 1961, p. 905.
- [14] OHLSEN G.T. — Static Switching. *Electronic Engineering*. October 1960, p. 609-613.
- [15] BLACK J.R. and WELCH H.W. — Solid State Integrated Circuits : development, manufacture and applications, Proceedings of the Agard conference, Oslo, 1961, p. 262.
- [16] ALBERTS R.D. — Microminiaturization and Molecular Electronics, idem, p. 41.
- [17] ADCOCK W. and WALKER J.S. — Semiconductor networks, idem, p. 297-316.
- [18] NORMAN R.H. and NALL J.R. — Micrologic Elements idem, p. 317-333.
- [19] ROBERTS D.H., WILSON B.L.H. and ALLEN J.M. — The Background to Integrated Single Crystal Circuit Fabrication, idem, page 282.
- [20] GROSVALET J. — Etude d'un nouvel élément tétrode à effet de champ : l'Alcatron, *Onde Electrique*, Fév. 1961, p. 114-122.
- [21] GROSVALET J., TRIBES R. et MOTSCH C. — Etude de phénomènes fondamentaux déterminant les caractéristiques des éléments à effet de champ. *Annales de Radio-électricité* (article à paraître).
- [22] DILL H.G. — Semiconductor inductive elements. *Semiconductor Products*. May 1962.
- [23] SCHEIBNER E.J. — Solid State Physical Phenomena and effects. *Trans. IRE CP* : 1, 12, 1961, p. 133 ; 2, 3, 1962, p. 20 ; 3, à paraître ; 4, à paraître.
- [24] LOEBNER E.E. — Solid State optoelectronics. *RCA Review*, 12, 1959.

TECHNOLOGIE DES CIRCUITS INTÉGRÉS

PAR

ALLEN - SNYDER

Motorola - Semiconducteur

Un changement important prend place dans les techniques de construction électronique. Les circuits intégrés sont en train de passer de l'état de simple projet à celui de la réalisation pratique, dans des conceptions différentes qui répondent chacune à des besoins déterminés et seront très probablement complémentaires dans l'avenir. Cet avenir verra sans aucun doute une expansion considérable des circuits intégrés, pour aboutir enfin à la production d'équipements électroniques, dans une gamme étendue qui va des engins spatiaux jusqu'aux postes récepteurs de radiodiffusion. Les répercussions de cette nouvelle technologie sur l'industrie sont encore très difficiles à prévoir, mais il est probable qu'elles seront importantes et entraîneront des bouleversements profonds.

A l'heure actuelle, certaines réalisations ont déjà atteint le domaine de l'exploitation militaire ou professionnelle, mais il n'en reste pas moins que bien des modifications et des améliorations devront être apportées pour que la technique des circuits intégrés prenne, dans l'électronique, la place qui lui revient. Il est bon cependant de préciser quelque peu les idées, ne serait-ce que pour couper court à une certaine confusion qui semble s'être répandue au cours des derniers mois quant aux possibilités des circuits intégrés.

Il est certain, par exemple, que les circuits intégrés permettent de réduire de façon considérable la dimension et le poids des équipements. La réduction de dimensions constitue d'ailleurs l'un des avantages les plus importants des circuits intégrés.

Ce que le transistor a apporté aux équipements à tubes à vide, il y a une dizaine d'années, peut être comparé à ce que les circuits intégrés apporteront aux équipements actuels. C'est ainsi que les ensembles complexes d'autrefois, déjà considérablement réduits en poids et en encombrement par l'utilisation

massive des transistors, seront encore plus réduits dans le proche avenir.

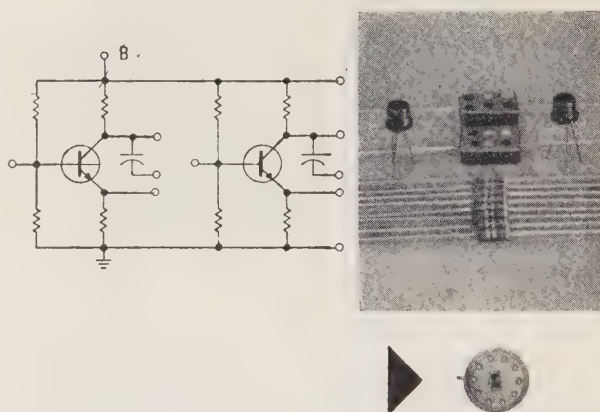


FIG. 1. — A gauche : Schéma de principe d'un amplificateur à deux étages.

A droite : Composants classiques nécessaires au montage.

Au dessous : Circuit intégré équivalent (grandeur réelle).

Le principal avantage, du point de vue professionnel, des circuits intégrés, est peut être l'augmentation de la fiabilité de l'ensemble, bien qu'une telle amélioration soit difficile à chiffrer, puisque les composants qui participent à l'élaboration d'un circuit intégré ne peuvent être essayés individuellement pour les performances maximales. On notera à ce propos que la fabrication des circuits intégrés fait appel aux procédés de la diffusion, de l'épitanie, du planar, etc., dont aucun n'est nouveau, de sorte que l'on fait appel en réalité à des techniques qui ont fait leurs preuves. Il est probable que les circuits intégrés complets assureront la même fiabilité que

les semiconducteurs classiques utilisant les mêmes techniques. Un autre avantage du circuit intégré est d'ordre purement économique. Contrairement à ce qu'on aurait pu croire, ils permettent en effet d'abaisser sérieusement le prix de revient des équipements. Les circuits intégrés sont fabriqués par grandes quantités, plusieurs centaines ou plusieurs milliers simultanément, sur une plaque de silicium mince comme une feuille de papier, et il est possible de traiter simultanément un grand nombre de ces plaques.

Au point de vue du prix de revient, on peut considérer qu'un circuit intégré coûte légèrement plus cher qu'un transistor, mais il ne faut pas oublier qu'il assure des performances correspondant à l'assemblage de plusieurs semiconducteurs et d'éléments passifs divers. De ce fait, le coût d'un circuit classique basé sur la technique des circuits intégrés ne sera qu'une fraction du coût du même circuit réalisé en montage classique.

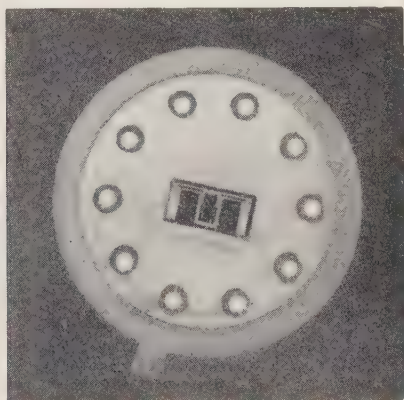


FIG. 2. — Vue agrandie d'un circuit intégré mettant en évidence le nombre réduit de fils d'interconnexion.

Toutefois, la conception et la production d'un système électronique fonctionnel à base de circuits intégrés, constituent encore une opération coûteuse, à moins que les demandes permettent d'opérer à grande échelle sur un grand nombre de circuits fondamentaux identiques.

Le facteur qui permet d'abaisser le prix de revient est particulièrement important lorsque les demandes sont suffisamment étendues pour que la fabrication n'augmente que faiblement le prix de chaque unité.

Par ailleurs, des circuits intégrés hybrides peuvent maintenant être construits pour une fraction du prix des ensembles électroniques, et cela même en petite quantité.

Si l'on envisage l'utilisation des circuits intégrés dans le domaine de la fabrication des équipements, on peut penser qu'ils permettront de réduire le temps d'étude et de ce fait le nombre d'heures de travail des ingénieurs. Toutefois, il faut penser que pour un matériel terminé, entièrement fabriqué à partir d'un nombre limité de circuits standards, on

aura besoin d'un certain nombre de spécialistes capables de concevoir l'intégration de ces circuits dans le cadre d'un système complexe, et que les problèmes associés à cette technique ne sont peut être pas tous faciles.

En général les constructeurs de circuits intégrés fournissent aux firmes l'assistance qui leur permet d'aborder les nouvelles techniques avec le plus de chances de succès possible. A cet effet, une liaison étroite doit être établie entre l'utilisateur et l'usine qui fabrique les circuits intégrés, de façon à prendre en compte tous les éléments et toutes les caractéristiques des équipements qui doivent être pensés en fonction de la nouvelle technique.

Différents types de circuits intégrés

A la base, la technique actuelle des circuits intégrés repose sur deux procédés fondamentaux.

1. Le procédé « THIN-FILM », au moyen duquel les éléments électroniques passifs, tels que résistances et condensateurs, sont disposés sur une couche passive ;

2. La technique SEMICONDUCTEURS, où les éléments actifs et passifs sont produits simultanément sur un substrat isolant.

La gamme des valeurs des composants est un peu plus réduite que dans le cas des circuits standards. Certains éléments sont plus difficiles à obtenir, par exemple les inductances. La technique des films minces utilise l'évaporation multiple ou la décomposition en phase vapeur pour déposer les composants passifs du circuit sur une couche diélectrique. Les éléments actifs doivent être fixés séparément. L'étendue de valeur des composants est plus grande que lorsqu'elle est obtenue par le procédé semi-conducteurs.

De tels circuits nécessitent cependant plus de types de matériaux et plus de procédés différents, et sont de dimensions plus grandes.

Grâce à une recherche poussée dans le domaine des circuits intégrés, MOTOROLA a réussi avec succès à combiner les deux procédés pour aboutir à une troisième technique, dans laquelle l'épithaxie joue un rôle fondamental. Grâce à cette technique, il est possible de fabriquer des circuits intégrés ayant une plus grande souplesse, une étendue fonctionnelle plus large et des tolérances plus étroites.

Utilisations des circuits intégrés

A la première étape, l'utilisateur doit d'abord décider s'il veut intégrer tout ou partie de l'équipement. L'étape suivante consiste à produire des circuits prototypes, selon les méthodes standards, aux fins d'évaluations des performances. Souvent, les valeurs des composants et d'autres paramètres doivent être changés, pour arriver à une présentation standard s'adaptant à l'intégration des circuits.

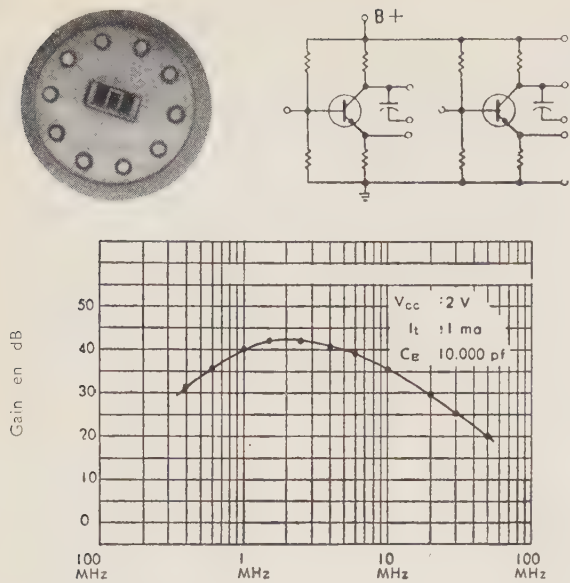


Fig. 3. — En haut : Circuit intégré linéaire, et, à côté, schéma amplificateur équivalent.
En bas : Courbes de réponse en fréquence obtenues.

Normalement, cela nécessite des discussions entre l'usine et le client pour redéfinir la fonction réelle du prototype intégré. Cette étude peut être effectuée par l'utilisateur à partir de circuits intégrés spéciaux, disponibles chez le constructeur, et qui constituent des pièces d'assemblage à partir desquelles il est possible de construire tout système aussi complexe qu'on le désire. Ces pièces ont toutes les caractéristiques des éléments du circuit intégré final, mais elles peuvent être câblées de façon classique de manière à permettre une évolution ou des modifications.

L'étape suivante consiste à convertir le prototype de fabrication en un ou plusieurs circuits intégrés hybrides, dans lesquels des pièces identiques à celles du prototype sont réunies sous un faible volume (T O 5).

L'ensemble constitue alors un circuit provisoire qui, dans quelques cas, peut être le produit final. Les circuits hybrides ont les caractéristiques des circuits entièrement intégrés, du point de vue technique.

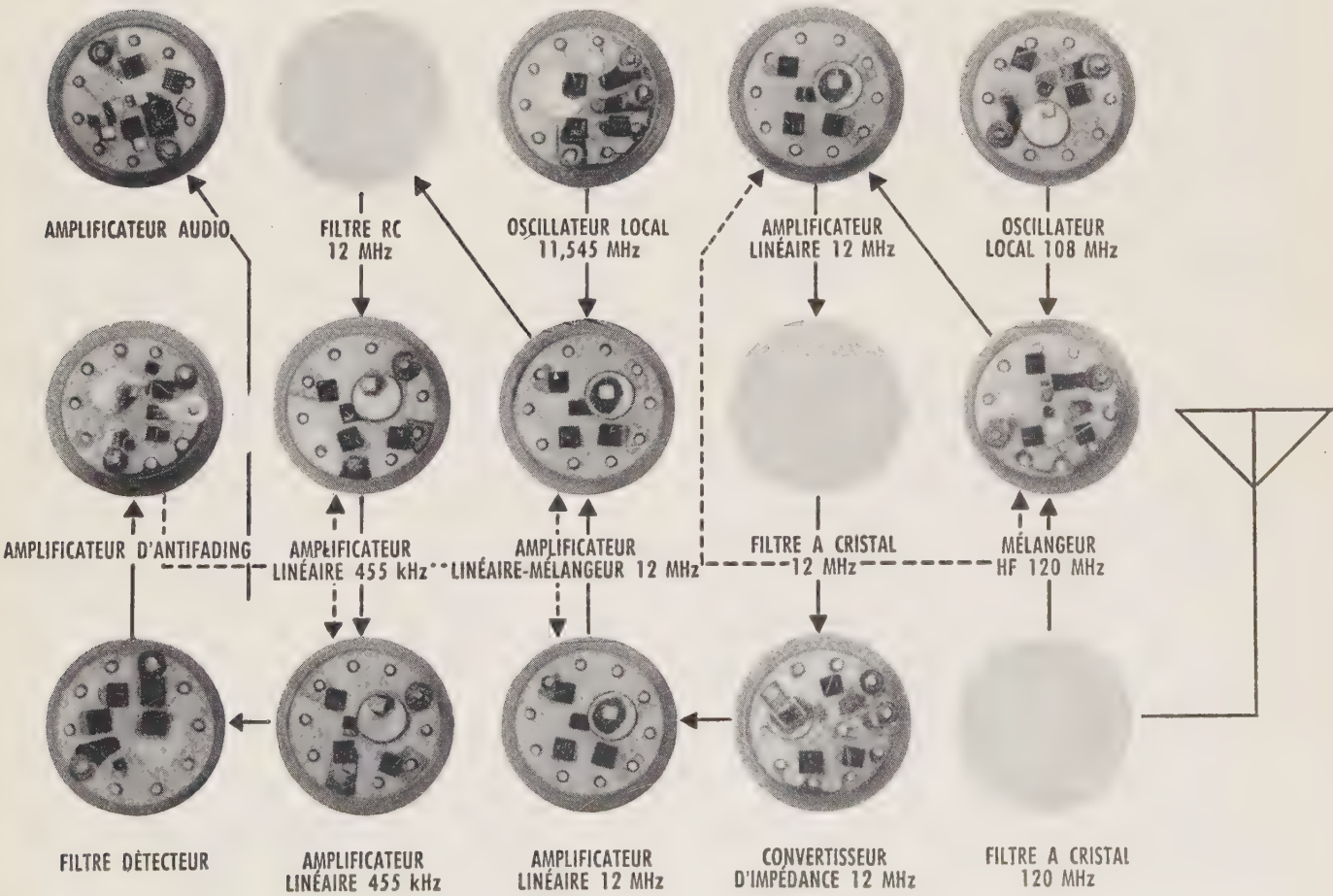


Fig. 4. — Modèle expérimental d'un récepteur intégré 120 MHz à double conversion, qui utilise des circuits hybrides pour tous les étages. Le même montage est en cours de développement avec des circuits intégrés monolithiques.

Ils offrent les avantages suivants : des changements peuvent être facilement effectués en cours de production ; les modifications du projet sont relativement simples et peu coûteuses. De plus, il est possible de fabriquer les circuits hybrides très rapidement, puisqu'un grand nombre de composants intégrés existent déjà en stock.

Le circuit hybride, par conséquent, présente des avantages, bien que n'étant applicable qu'à de petites quantités en tant que produit final.

Pour passer du circuit hybride au circuit intégré final, il faut procéder à des études et à des développements du modèle hybride, de manière à obtenir une modification qui permette la fabrication la moins coûteuse possible. Toutefois, cette étape ne peut être valable que pour de très grandes quantités et ne peut se justifier que pour des séries utilisant un très grand nombre de circuits.

Passer du circuit hybride au circuit compact final consiste à établir le montage optimal et les masques nécessaires aux différentes étapes du procédé. Du fait des techniques de fabrication mises en jeu, cette partie constitue l'étape la plus coûteuse de l'opération totale, mais elle est justifiée si les

équipements comprennent un grand nombre de circuits élémentaires identiques. Il ne faut pas oublier en effet que sur des productions en grande série, les circuits intégrés sont peu coûteux à produire et ont une fiabilité potentielle qui atteint le maximum de ce qui est possible dans l'état actuel de la technique. Grâce à l'élimination de nombreuses opérations de soudure, ils réduisent également les temps d'assemblage et de montage. Cependant, les circuits intégrés obtiennent ces avantages aux dépens de la souplesse d'utilisation, puisque de tels circuits ne peuvent être modifiés en cours de production, à moins de revenir au point de départ de l'évolution de la fabrication, c'est-à-dire de recommencer le processus.

On peut dire que l'ère des circuits intégrés est arrivée. Ils sont pratiques et déjà commercialement disponibles. Les années à venir verront sans aucun doute de nombreuses modifications et améliorations se greffer sur cette technique naissante, mais il n'en reste pas moins que le départ est déjà pris et que les spécialistes peuvent s'attendre à voir les circuits intégrés occuper une place de plus en plus grande dans les équipements à venir.

RÉALISATION ET CONTROLE DE CIRCUITS LOGIQUES

A

STRUCTURE MODULAIRE

PAR

G. GERBIER, A. SAUTEL, J.-P. BERGER

Centre National d'Études des Télécommunications

Introduction

Les ensembles logiques de type calculateur qui sont étudiés et réalisés actuellement au CENTRE NATIONAL d'ÉTUDES des TÉLÉCOMMUNICATIONS (Département « Recherches sur les Machines Electroniques ») utilisent comme élément de base la fonction NI $a + b + c$. Cette fonction permet, en effet, d'effectuer toutes les opérations logiques à partir d'un élément unique ; la fonction mémoire, en particulier, se présente comme le simple assemblage de deux fonctions NI [1]. Une fabrication de petite série s'est avérée nécessaire pour satisfaire les besoins des laboratoires en circuits réalisant cette fonction.

Une étude de fabrication et de contrôle de ce circuit dont le schéma est indiqué sur la figure 1 a été entreprise à partir des données suivantes :

— groupement sur des plaques de circuits imprimés de dimensions déterminées avec sorties sur connecteurs à 22 contacts de 8 fonctions NI (cas général) ; ce nombre 8 étant un compromis dû princi-

palement au nombre de contacts du connecteur utilisé,

— facilité de montage et de démontage d'un circuit élémentaire qui doit donc être de prix relativement réduit,

— fabrication avec les moyens d'un atelier de prototypes, donc avec très peu d'outillage spécialisé,

— possibilité de contrôle individuel et de tri des circuits réalisant la fonction NI,

— essai final de la plaque de circuit imprimé, quelles que soient les liaisons entre les diverses fonctions NI.

1. Choix du circuit élémentaire

La réalisation d'une plaque enfichable pour chaque type d'assemblage logique de 8 fonctions NI avec une mise en place standard des éléments et un câblage imprimé spécifique de la plaque est à éliminer a priori, ne répondant pas correctement à tous les critères de départ, en particulier ne permettant pas un montage rapide ni un contrôle individuel des circuits.

Il est donc apparu nécessaire de réaliser un circuit élémentaire comportant un ou un petit nombre de circuits réalisant la fonction NI sous la forme d'un module individuel, testé, trié et stocké sous cette forme, et de monter ces modules sur une plaque support enfichable en circuit imprimé.

Les moyens de l'atelier de maquette font que l'on a choisi de réaliser l'élément de base sur une plaquette de circuit imprimé (commodité d'usinage, de montage et de soudure), ces plaquettes étant ensuite montées sur la plaque support. Deux versions ont été réalisées, l'une avec comme circuit élémentaire une seule fonction NI câblée sur une plaquette montée perpendiculairement à la plaque enfichable PM 1

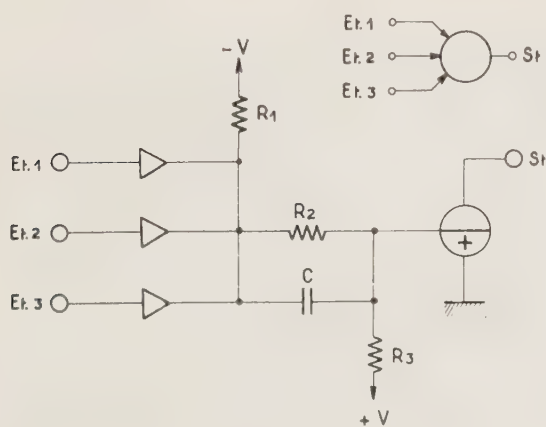


FIG. 1. — Schéma du circuit NI.

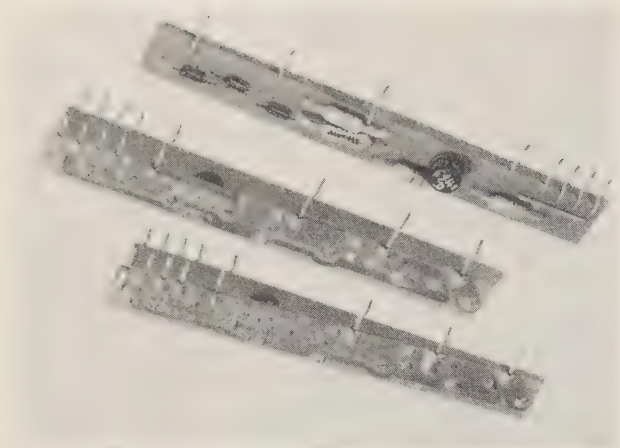


FIG. 2. — Circuit PM1.

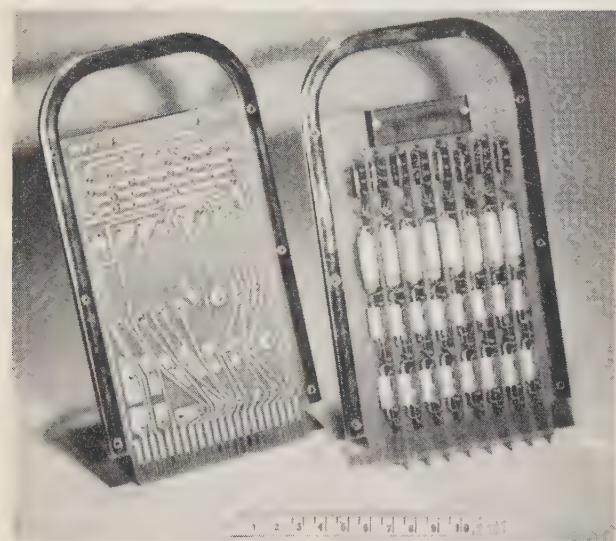


FIG. 3. — Plaque à circuit PM1.

(fig. 2 et 3), l'autre avec comme circuit élémentaire, deux fonctions NI câblées sur une plaquette montée parallèlement à la plaque support PM 2 (fig. 4 et 5). La principale difficulté rencontrée est la liaison entre plaque support et plaquette.

Dans le premier cas, PM 1, l'élément de raccordement est un fil métallique soudé sur la plaquette et formé pour apparaître dans le prolongement de la plaquette et permettre son montage sur la plaque support ; ces éléments de raccordement, 8 par plaquettes (3 d'entrée, 1 de sortie, 3 d'alimentation, 1 de test), assurent à la fois la tenue mécanique et le raccordement électriques.

Dans le deuxième cas, PM 2, l'élément de raccordement est une entretoise métallique avec 2 épaulements ; ces entretoises, 13 par plaquette (6 d'entrée, 2 de sortie, 3 d'alimentation, 2 de test), assurent aussi à la fois la tenue mécanique et le raccordement électrique. Le deuxième mode de raccordement est nettement supérieur au premier :

— du côté plaquette, l'entretoise est cannelée pour assurer la tenue mécanique, la soudure n'assurant alors que le contact électrique, du côté plaque enfichable, l'entretoise, par contre, est libre pour permettre le montage, la soudure assurant à la fois le contact électrique et la tenue mécanique,

— les épaulements de l'entretoise protègent contre les dilatations, en effet, en cas de dilatation, l'entretoise agit sur la plaque et sur la plaquette par ses épaulements, de telle sorte qu'aucun effort important ne tend à détacher le cuivre du circuit imprimé de son support isolant,

— la plaque support placée verticalement dans un alvéole horizontal, permet une convexion naturelle autour des composants électroniques (fig. 4),

— le nombre des connexions entre les plaquettes et la plaque support, ainsi que le câblage imprimé sur cette dernière, est réduit, en effet, les tensions d'alimentation sont communes aux deux circuits de la plaquette.

Ces avantages importants font donc préférer la plaquette de type PM 2 bien que le circuit élémentaire réalise 2 fonctions NI au lieu d'une seule, inconvénient mineur vu la qualité des composants utilisés (un tri de ceux-ci pouvant être effectué, si nécessaire).

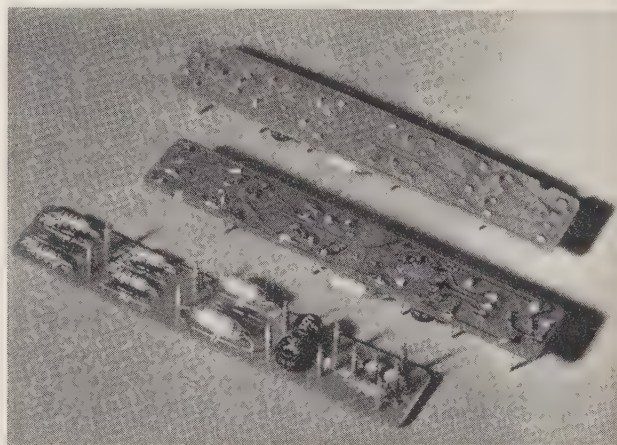


FIG. 4. — Circuit PM2.

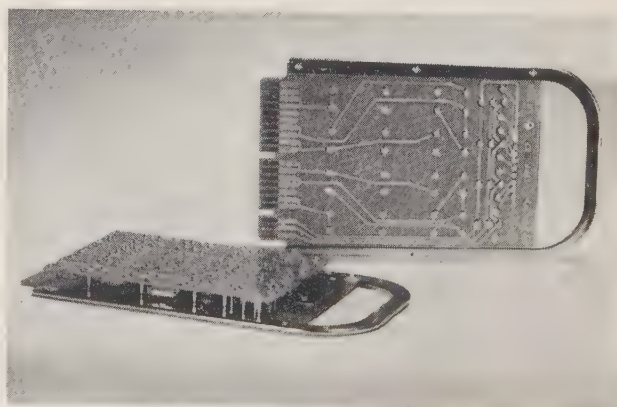


FIG. 5. — Plaque à circuit PM2.

2. Fabrication de la plaquette modulaire

2.1. CHOIX DU PROCÉDÉ

L'étude de la fabrication en série des plaquettes modulaires a été guidée par le souci essentiel d'utiliser une technologie de réalisation présentant le maximum de sécurité alliée à une grande facilité de montage et à une certaine rapidité de fabrication.

La nature des éléments constitutifs dont la sécurité de fonctionnement avait déjà fait l'objet d'études préalables, était également un facteur d'appréciation non négligeable.

La fabrication de ces plaquettes devait en outre s'effectuer avec les moyens classiques d'un atelier de prototypes. Le bureau d'études avait donc pour tâche de prévoir le minimum d'outillage spécialisé afin que le coût d'amortissement n'augmente pas sensiblement le prix de revient de la plaquette PM 2.

Les composants électroniques à monter sont par plaquette :

- 6 résistances à couche de carbone subminiature, 1/2 ou 1/4 W, à sorties axiales étamées de 0,8 mm de diamètre.

- 6 diodes à pointes de tungstène subminiature, à sorties axiales étamées de 0,6 mm de diamètre,

- 2 condensateurs à film plastique à sorties axiales étamées de 0,5 à 1 mm de diamètre suivant le type,

- 2 transistors à boîtier TO 5,

- 13 entretoises cannelées soudables.

En outre, les plaquettes doivent être montées sur des plaques support enfichables dans des ensembles mécaniques déjà existants, ce qui limite l'épaisseur de l'ensemble plaque support-plaquettes modulaires.

Compte tenu de ces impératifs, la technologie de montage utilisée est celle du câblage imprimé simple face avec soudure simultanée de tous les points de raccordement. Les figures 4 et 5 montrent respectivement la plaquette modulaire isolée et montée par groupe de quatre sur la plaque-support enfichable.

2.2. ASPECT TECHNOLOGIQUE DES DIFFÉRENTES OPÉRATIONS

Comme dans toute fabrication de série, le choix des procédés et outillages doit être adapté à l'importance de la fabrication et aux outillages existants.

La technique du circuit imprimé fait intervenir quatre opérations principales (mécanique, gravure, montage, soudure), qui interfèrent entre elles, et des contrôles.

Chacune de ces opérations est étroitement dépendante des autres et la sécurité de fonctionnement de la plaquette terminée est conditionnée par la conformité de chaque opération élémentaire aux dispositions initialement prévues.

2.2.1. Opération de mécanique

Le raccordement électrique de la plaquette modulaire avec la plaque support est réalisé comme il a déjà été dit par un dispositif essentiellement méca-

que qui permet le démontage après soudure. Ce dispositif, consiste en 13 entretoises de 15 mm de longueur avec deux épaulements à 9 mm de distance avec une extrémité cannelée (côté élément modulaire) et l'autre lisse (côté support).

Cette entretoise assure un montage rapide et à positionnement constant et permet d'effectuer simultanément les soudures de tous les éléments constitutifs aussi bien sur la plaquette que sur la plaque support.

Il est nécessaire par contre, que la découpe et le perçage des plaques de stratifié, matériau suffisant pour nos besoins de laboratoire, soient effectués avec une grande précision pour assurer le positionnement de la gravure et le montage mécanique des éléments électriques (transistors, résistances, diodes et condensateurs).

La découpe et le perçage (poinçonnage) de la plaquette sont effectués à la presse, par des outils à guidage par colonne et extracteur à ressort dont un exemple est indiqué sur la figure 6 (outil de poinçonnage).

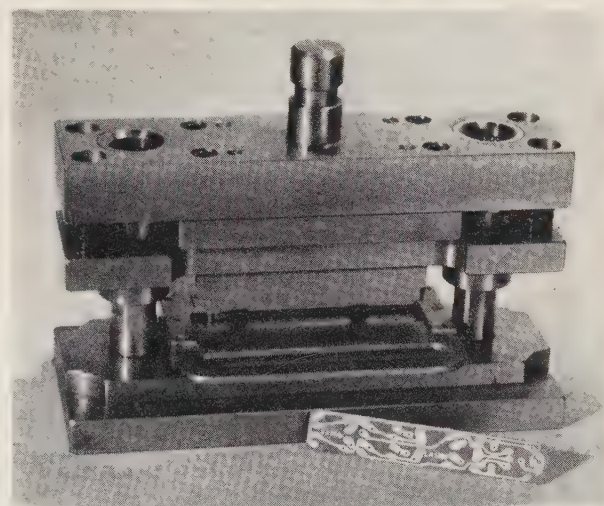


FIG. 6. — Outil de poinçonnage des plaquettes.

2.2.2. Opération de gravure

La reproduction du dessin des conducteurs sur les plaques de stratifié isolant cuivré est effectuée par le procédé de l'écran de soie qui, peu onéreux, convient bien à la réalisation de séries moyennes.

Un cadrage précis de l'écran de soie qui sert de matrice d'impression à l'égard de la plaquette à imprimer est nécessaire afin d'éviter un déplacement des surfaces à souder par rapport aux perçages qui permettent le passage des fils de raccordement des éléments. Différents traitements de nettoyage, passivation et protection sont en outre effectués pour donner et conserver à la surface cuivrée les qualités nécessaires à assurer ultérieurement une bonne soudure étain-plomb.

Une impression est également faite à l'écran de soie sur le côté éléments (fig. 3) pour symboliser

l'emplacement des différents composants et éviter des erreurs au moment du montage.

A la fin de ces opérations, est effectué un contrôle visuel sous binoculaire portant sur la continuité des conducteurs de cuivre, leur isolement entre eux, les défauts de piqure et de décentrage. L'automatisation de ce contrôle a été étudiée : chacun des différents conducteurs ne peut être en court-circuit qu'avec ses voisins, les 13 conducteurs que comporte la plaquette peuvent être divisés en 4 groupes, tel qu'un conducteur quelconque ne puisse présenter un défaut d'isolement qu'avec un conducteur d'un autre groupe, il suffit donc ensuite, par une logique à relais, de s'assurer de l'absence de défaut d'isolement et de défaut de continuité. Les plaquettes sont approvisionnées automatiquement, leur position sous les contacts est contrôlée, puis les divers tests réalisés sous la commande d'un arbre à cames entraîné manuellement ou automatiquement. Toute plaquette qui présente un défaut est automatiquement rejetée.

Moins de 1 % des plaquettes présente actuellement un défaut de gravure.

2.2.3. Opération de montage

La mise en place des éléments, pliés précédemment par des dispositifs adaptés à chaque type de composants (fig. 8) s'effectue au moyen de deux machines pneumatiques complémentaires l'une de l'autre (fig. 9). Chacune d'elles permet d'effectuer la coupure et le pliage des fils de connexion sur la

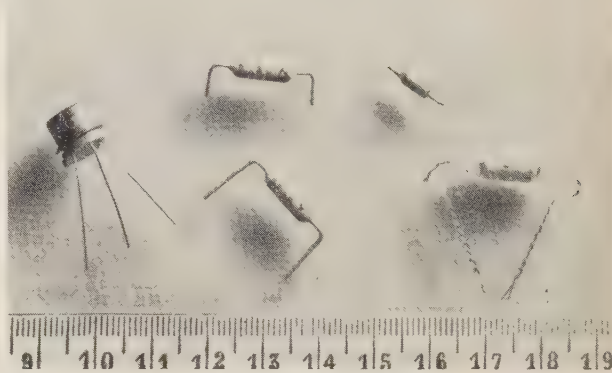


FIG. 8. — Pliages des composants.

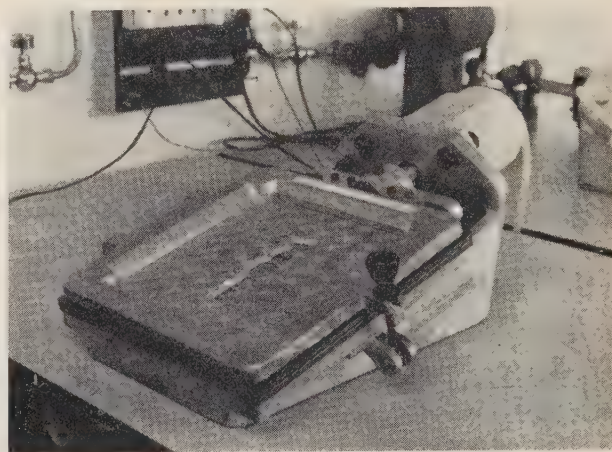


FIG. 9. — Mise en place des composants.

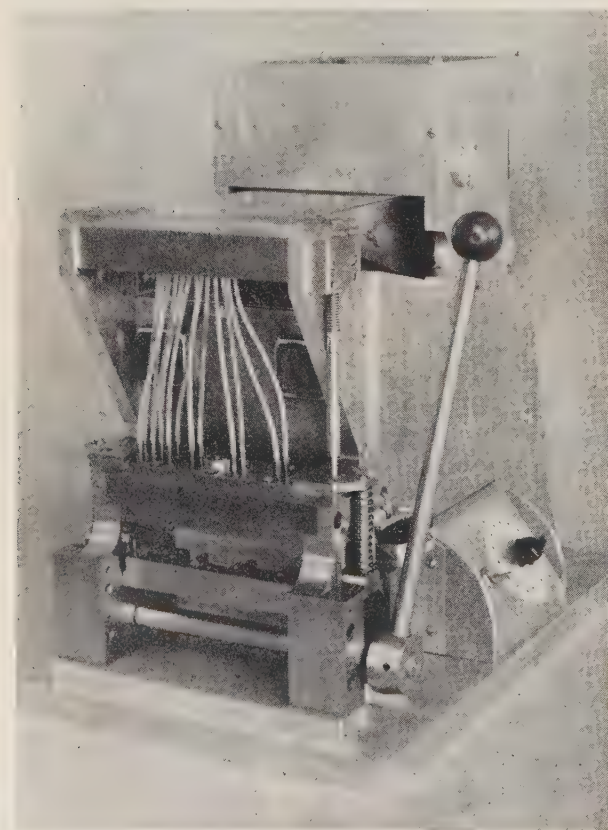


FIG. 7. — Appareillage de montage des entretoises.

face cuivrée d'une partie des éléments de manière à immobiliser ceux-ci dans l'attente de l'opération de soudure (voir la plaquette du haut de la figure 3).

La dernière phase est la mise en place des entretoises cannelées sur la plaquette, elle est réalisée à l'aide de l'appareillage de la figure 7 qui, approvisionné par un organe vibratoire, assure la mise en place dans le sens convenable, des 13 entretoises de la plaquette en une seule opération.

Lorsque tous les éléments sont montés, les plaquettes modulaires sont stockées dans l'attente de l'opération suivante.

2.2.4. Opération de soudure

L'opération de soudure des fils de connexion sur la face cuivrée est effectuée au moyen d'une machine spéciale dont l'objet est de remplir les conditions suivantes : température et vitesse de soudure constantes et réglables, ligne de soudure de hauteur réglable et constamment débarrassée de toute impureté.

Les plaquettes qui sont disposées à plat sur des chariots entraînés par une chaîne sans fin passent

sur une « vague » de soudure de hauteur et de largeur réglables. La soudure s'effectue en 5 secondes pour une composition du bain de 60 % d'étain et 40 % de plomb et une température de 235 °C.

Cette opération, dont la régularité et la reproductibilité sont remarquables, à condition de faire subir préalablement aux surfaces cuivrées un traitement bien déterminé, assure également un échauffement minimum des plaquettes de stratifié.

À la suite de la soudure, les plaquettes sont de nouveau stockées dans l'attente du contrôle visuel de l'état des soudures et de la mise en place des composants qui constitue la dernière phase de l'opération de montage. Les défauts révélés par ce contrôle qui sont de 1,5 % du nombre de points de soudure et de moins de 0,1 % du nombre des composants, sont pratiquement toujours réparables.

3. Contrôle électrique de la plaquette modulaire

Les transistors entrant dans la construction des plaquettes sont mesurés initialement à l'unité sur l'appareillage automatique de mesure décrit précédemment dans cette revue [2], les diodes, les résistances et les condensateurs sont vérifiés par prélèvements chez le constructeur (diodes) ou au C.N.E.T. (résistances et condensateurs).

Un appareillage a été défini dont le but est d'une part de vérifier les composants et le câblage associé, d'autre part, de classer en fonction de leurs temps de réponse les plaquettes modulaires en plusieurs catégories. Cet appareillage doit être d'exploitation simple et rapide et ne doit laisser aucune marge d'interprétation à l'opérateur. Les vérifications et le tri éventuel sont donc effectués à partir de signalisation lumineuse (fig. 10).

Le prix de revient de l'ensemble de l'appareillage et le coût du contrôle d'une plaquette, ont conduit à choisir un appareillage automatique semi-électronique.

3.1. VUE D'ENSEMBLE

L'appareillage traitera successivement les deux circuits NI de la plaquette. Une partie électromécani-

que établit successivement les connexions nécessaires entre circuit NI et circuits de test. La progression se fait automatiquement ou manuellement de tout essai qui donne un résultat correct au suivant. Une partie électronique, entièrement transistorisée, effectue les essais proprement dit, en interprète le résultat en donnant à l'appareillage la possibilité de progresser ou au contraire en le bloquant. Lorsque l'appareillage a franchi toutes les positions d'essais, une lampe de fin s'allume qui indique que la plaquette est bonne. Lorsqu'un défaut apparaît, par contre, l'appareil se bloque, les indications lumineuses indiquent alors quel est le circuit en cause et quelle est la faute trouvée. Un bouton « renouvellement » permet de recommencer la suite des essais sur le circuit en faute, par contre, il n'est pas possible de passer aux essais qui suivent l'essai décelant une faute, ce pourrait, en effet, être catastrophique pour certains des circuits d'essais. Si le premier circuit de la plaquette est en faute, le suivant pourra cependant être testé.

3.2. ESSAIS PRATIQUÉS

Les essais sont séparés en deux groupes, les essais des composants et du câblage associé d'une part, l'analyse de temps de commutation d'autre part.

3.2.1. Essai des composants et de câblage associé

Les essais portent sur :

- l'isolement des 3 entrées par rapport au - 6 V d'alimentation ;
- le blocage en inverse des 3 diodes ;
- la continuité en direct des 3 diodes ;
- le blocage du transistor ;
- la saturation du transistor.

Ils ont été répartis sur 4 positions successives :

1^{re} position :

- isolement des entrées E_1 , E_2 et E_3 par rapport au - 6 V d'alimentation ;

2^e position :

- saturation du transistor ;
- continuité en direct de la diode de l'entrée E_2 ;
- blocage du transistor ;
- blocage en inverse de la diode d'entrée E_1 ;

3^e position :

- continuité en direct de la diode d'entrée E_3 ;
- blocage en inverse de la diode de l'entrée E_2 ;

4^e position :

- continuité en direct de la diode d'entrée E_1 ;
- blocage en inverse de la diode d'entrée E_3 .

Le passage d'une position à l'autre, électromécanique, se traduit par la déconnexion du circuit à tester de certains circuits électroniques de test (d'attaque et d'interprétation) et sa connexion à d'autres ou aux mêmes mais accompagnée d'une modification des points de raccordement.

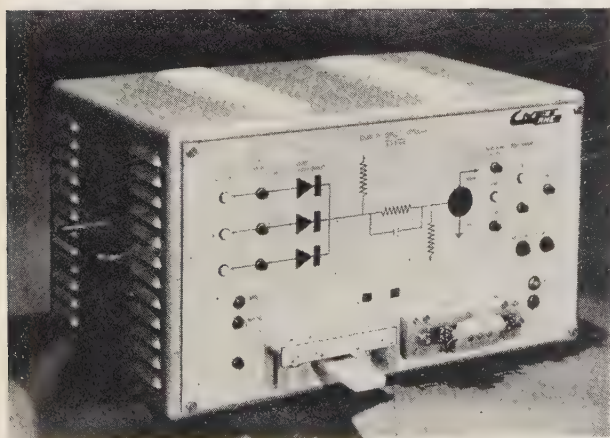


FIG. 10. — Appareillage d'essai électrique des plaquettes.

3.2.2. Analyse des temps de commutation

L'analyse porte sur le temps de réponse positif qui correspond au passage de l'état bloqué à l'état saturé du transistor du circuit NI et du temps de réponse négatif qui correspond au passage de l'état saturé à l'état bloqué de ce même transistor.

Il a été jugé préférable pour analyser ces temps, c'est-à-dire vérifier s'ils ne dépassent pas des limites fixées à l'avance, d'appliquer des impulsions de largeur calibrées à l'entrée du circuit et de vérifier par un circuit détecteur si le niveau de sortie atteint une valeur suffisante plutôt que de comparer une impulsion de sortie à l'impulsion d'entrée dont elle est la conséquence.

En effet, il n'est pas commode de comparer entre elles des impulsions de signes contraires qui, en outre, peuvent avoir des fronts de raideurs différentes.

Les essais ont été répartis sur les 3 positions suivantes :

5^e position :

- analyse du temps de réponse positif, attaque en E_1 ;
- analyse du temps de réponse négatif.

6^e position :

- analyse du temps de réponse positif, attaque en E_2 .

7^e position :

- analyse du temps de réponse positif, attaque en E_3 .

Le temps de réponse négatif, qui dépend surtout du transistor, n'est analysé qu'une fois ; le temps de réponse positif, par contre, qui dépend du transistor et des diodes, est analysé pour chaque attaque possible.

3.3. PRINCIPE DES DIFFÉRENTS CIRCUITS D'ESSAIS

3.3.1. Isolement des entrées par rapport au -6 V

Les trois entrées E_1 , E_2 et E_3 sont vérifiées en même temps par trois circuits identiques qui détectent une tension de -6 V à travers une résistance relativement faible (fig. 11).

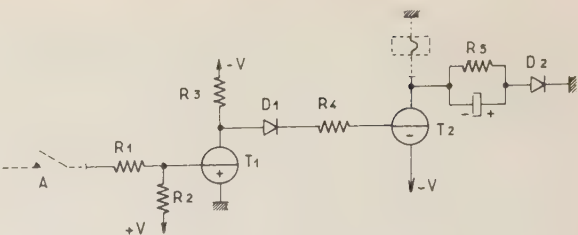


FIG. 11. — Circuit d'essai de l'isolement d'une entrée.

3.3.2. Saturation et blocage du transistor

Le circuit NI est alors chargé par une résistance de 500 ohms environ, on détecte s'il se bloque (tension de 5 V au moins en valeur absolue) et s'il se sature (tension de 0,5 V au plus en valeur absolue) (fig. 12).

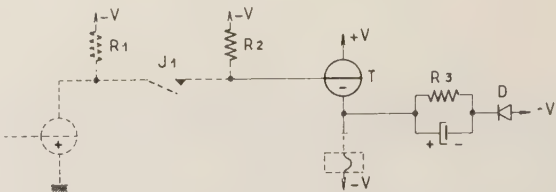


FIG. 12. — Circuit d'essai du fonctionnement du transistor.

3.3.3. Blocage et continuité des diodes

Le schéma (fig. 13) a été déterminé pour qu'un courant inverse de 250 μA sous 6 V dans la diode soit détecté. Cette valeur de courant a été fixée en fonction des règles d'assemblage des circuits du système logique considéré.

Comme certains de ces trois premiers essais sont déclarés « bons » lorsqu'un courant ou une tension manque, il a été nécessaire de les effectuer en deux temps :

- simuler le défaut recherché et vérifier que le circuit d'essai le signale effectivement ;
- supprimer le défaut simulé et vérifier que le circuit d'essai ne le signale plus.

Ce qui présente, en outre, l'avantage de vérifier à chaque fois le bon fonctionnement des circuits d'essais.

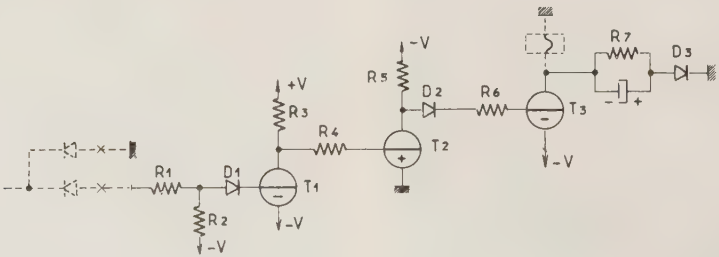


FIG. 13. — Circuit d'essai des diodes.

3.3.4. Temps de commutation

Les impulsions de contrôle sont créées à partir d'un circuit RC (une version avec ligne à retard est en cours de réalisation) attaqué par un générateur à 250 kHz. Elles sont appliquées à l'entrée en essai pendant toute la durée de la connexion du circuit à essayer et du circuit de test (10 millisecondes environ).

Plusieurs impulsions de caractéristiques différentes peuvent être ainsi appliquées aux entrées, suivant les règles d'assemblage des circuits qui ont été utilisées au cours de l'étude de l'ensemble auquel sont destinés ces circuits.

Les signaux appliqués à une entrée du circuit à essayer (fig. 14) comportent un support fourni par le signal de sortie d'un module bloqué ou débloqué à la cadence de 125 kHz auquel est superposée soit une impulsion destinée à débloquent le circuit si le circuit générateur du support est lui-même débloquent, soit une impulsion destinée à bloquer le circuit dans le cas contraire. Les circuits d'analyse qui sont des basculeurs très rapides à base de circuits transistors NI à 2 N 1500 qui changent d'état sur des impulsions d'attaque de seulement 10 nanosecondes, précédés d'un circuit à seuil à diode, sont bloqués pendant le changement d'état du support ; ils sont, de plus, liés à la sortie du circuit à essayer par l'intermédiaire de portes à coïncidence qui permettent d'orienter l'impulsion de sortie vers le circuit d'analyse désiré.

La réalisation actuelle contient 3 circuits d'analyse, 2 pour le temps de réponse positif, 1 pour le temps de



FIG. 14. — Signaux appliqués à une entrée pour l'analyse des temps de commutation.

réponse négatif. Dès qu'un circuit ne présente pas la rapidité maximale prévue par l'appareillage d'essai, celui-ci se bloque et des indications lumineuses (entrée du circuit en cours d'essai et état des basculeurs des circuits d'analyse) permettent de déterminer la rapidité du module.

3.4. MISE EN ŒUVRE

Cet appareillage ne demande aucune précaution spéciale de mise en œuvre si ce n'est la vérification des tensions d'alimentation qui doivent être à 5 % ou mieux.

Il permet d'essayer une centaine de circuits de base à 2 circuits NI à l'heure en notant l'analyse des défauts éventuels qui sont constatés.

4. Fabrication de la plaque support

Les circuits élémentaires sont montés par groupes de 4 sur une plaque de circuit imprimé enfichable

(fig. 5), la plaque support, sur laquelle sont établies les liaisons entre les différents circuits NI.

Le découpage d'une part, le poinçonnage des trous dans lesquels seront enfilés les entretoises d'autre part, sont effectués par des outils de même conception que les outils destinés à la fabrication des plaquettes des circuits élémentaires. La gravure et la préparation du circuit à la soudure sont aussi effectuées de la même manière.

Les circuits élémentaires sont alors montés sur les plaques supports et disposés à l'intérieur de chariots spéciaux qui assurent une pression suffisante sur les plaquettes pour maintenir le parallélisme entre les plaquettes et la plaque support. Ces chariots sont utilisés pour la soudure des entretoises sur la face cuivrée des plaques supports de la même manière que leurs homologues pour la soudure des circuits élémentaires.

Signalons, en outre, que le démontage des circuits élémentaires d'un support enfichable peut s'effectuer très simplement au moyen d'un fer à souder dont la panne comporte un relief correspondant aux 13 points à dessouder simultanément.

5. Contrôle de la plaque support *

Un appareillage destiné à essayer toutes les plaques supports déjà existantes ou non, a été étudié.

Son principe est la comparaison des signaux de sortie de la plaque support en essai avec les signaux de sortie d'une plaque support identique, reconnue bonne par un moyen quelconque, pour toutes les combinaisons possibles des signaux d'entrée.

5.1. VUE D'ENSEMBLE

Sur les 22 points de raccordement de la carte support, 3 sont toujours utilisés pour les alimentations (les cartes sont toujours alimentées par les mêmes points de raccordement) et un au moins est une sortie ; il reste donc 18 points d'entrées possibles pris parmi 19. La plaque à essayer et la plaque de référence seront semblables ; donc la plaque à essayer sera bonne, si les signaux de sortie sont identiques pour toutes les combinaisons possibles de signaux d'entrée. L'identité des signaux de sortie est vérifiée par des circuits OU exclusifs ($\bar{a}b + a\bar{b}$) qui, au nombre de 19, peuvent être connectés aux 19 points de sorties possibles.

Un point de raccordement est soit « entrée » et alors les points de raccordement des 2 plaques supports sont connectés par les contacts travail de 19 relais à 2 RT aux sorties d'un générateur qui affiche sur ses 19 sorties successivement les 2^{19} premiers nombres binaires, soit « sortie » et alors ces mêmes points de raccordement sont connectés par les contacts repos des mêmes relais aux entrées des circuits de test.

Les 19 relais qui permettent de distinguer les entrées des sorties, sont commandés par une plaque support de même type sur laquelle les points de raccordement correspondant aux entrées sont reliés au — 6 V, que l'opérateur enfiche dans l'appareillage en même temps que la plaque de référence. Cette

* Brevet français n° P. V. 917 940.

plaque est doublée par un jeu de 19 interrupteurs que l'opérateur peut utiliser s'il n'a pas de plaque câblée ou s'il doit effectuer des essais spéciaux, mais la mise en place d'une carte rend ces interrupteurs inopérants.

Le générateur des 2^{19} combinaisons de signaux d'entrée est un registre compteur à 19 étages qui progresse de 0 à 2^{19} sur les fronts positifs d'un générateur de signaux carrés. Le test sera exécuté pendant les paliers négatifs de ce générateur. La non-coïncidence des deux ensembles de signaux de sortie arrêtera la progression. L'état du compteur, repéré par des indications lumineuses, permettra de faire l'analyse du défaut. L'allumage d'une lampe, commandée par le débordement du registre compteur, indique l'identité des deux cartes pour l'ensemble des signaux d'entrée (fig. 15).

NI dont une entrée est reliée à un point de raccordement ; si une autre de ses entrées est utilisée, une masse apparaîtra obligatoirement à un instant donné sur cette deuxième entrée alors qu'aucun signal ne sera appliqué à la première diode ; si cette première diode est en court-circuit, la masse sera répercutée sur l'entrée où il suffira de la détecter. Pour cela, les connexions d'attaque sont reliées à la tension -6 V par une résistance de $1\text{ k}\Omega$; il suffit donc de trouver une coïncidence entre cette connexion et le signal inverse du signal d'attaque pour déceler une diode en court-circuit. Dans ce cas aussi, l'appareillage se bloquera et en plus, une indication lumineuse montrera que la faute détectée est une diode en court-circuit. Seul le cas de la diode d'entrée d'un circuit qui n'a qu'une seule entrée utilisée est alors laissé de côté.

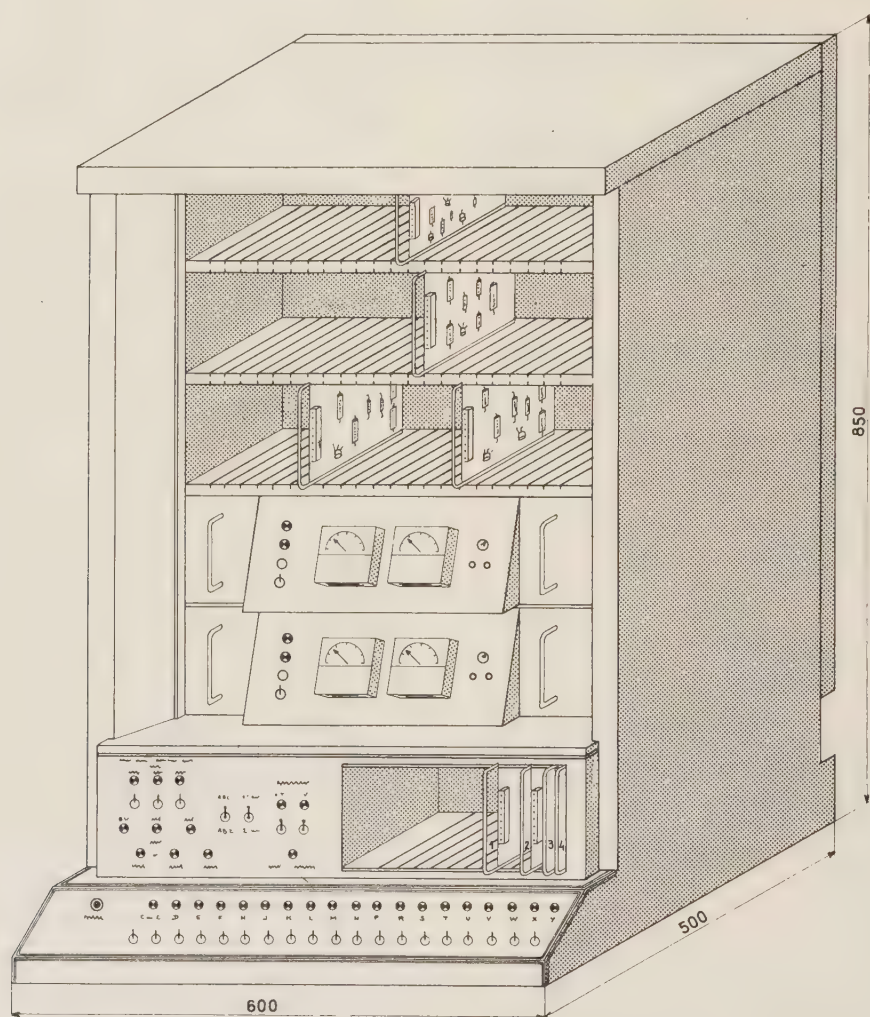


FIG. 15. — Appareillage d'essai électrique des plaques supports (réalisation en cours).

Non seulement les défauts de continuité (câblage, diodes ouvertes) mais encore les défauts dus aux transistors seront ainsi décelés par cet appareillage, par contre le court-circuit d'une diode qui est reliée à une entrée ne sera pas décelé. Il a été ajouté des circuits donnant la possibilité de déceler cette faute en se basant sur la remarque suivante : soit un circuit

5.2. GÉNÉRATEURS DES COMBINAISONS D'ENTRÉES

Le générateur doit se comporter comme un registre compteur à 19 basculeurs.

La durée de l'essai de la plaque support, donc la fréquence de l'oscillateur qui attaque le générateur, est fonction du montage utilisé pour le registre qui

détermine le temps t_1 de sa mise en place et du temps à prévoir pour la mise en état des circuits de la carte à essayer t_2 , soit t_1 et t_2 d'une part et du temps nécessaire à l'essai t_3 , d'autre part.

D'après le montage de la carte, t_2 est de $2 \mu s$, d'après la conception de l'appareil, t_3 est de $1,5 \mu s$; le mode de réalisation du registre compteur, câblé à partir de circuits dont la fabrication est décrite ici, soit t_1 , est le seul temps sur lequel il soit possible d'agir.

Pour un registre à basculeurs montés en série, le temps maximal de positionnement est, compte tenu de la propagation de la retenue de $14,25 \mu s$, ce qui conduit à $t_1 + t_2 = 16,25 \mu s$ et à un temps de mesure pour la plaque enfichable de 17 secondes, jugé prohibitif.

Pour un registre à positionnement rapide par attaque en parallèle des 19 basculeurs, le temps t_1 tombe à $9,75 \mu s$.

Mais ce n'est plus $t_1 + t_2$ qui intervient alors, c'est, si t'_1 est le temps de positionnement du basculeur, premièrement $t'_1 + t_2 = 2,75 \mu s$ d'une part, t_3 d'autre part, qui doivent être inférieurs à la demi-période, et, deuxièmement t_1 qui doit être inférieur à la période.

Le temps t_1 peut encore être réduit en utilisant 2 registres à positionnement rapide en série l'un avec l'autre; le registre attaqué par l'oscillateur est dimensionné pour que t_1 soit inférieur à la période minimale compatible avec $t'_1 + t_2$ et t_3 : il comporte 7 basculeurs, le deuxième registre en comporte donc 12; la liaison entre les deux registres cause une perte de temps négligeable.

La fréquence maximale d'utilisation est de 200 kHz, ce qui donne un temps de mesure légèrement inférieur à 3 secondes pour une plaque enfichable.

5.3. CAS PARTICULIERS DES PLAQUES SUPPORTS DE BASCULEURS

Le mode d'essai qui est utilisé dans cet appareillage nécessite que les signaux de sorties des deux plaques supports soient à chaque instant identiques sauf cas de mauvais câblage ou de composant détérioré; il faut, en particulier que les modifications des signaux d'attaque entraînent les mêmes modifications des signaux de sortie.

Dans le cas d'un basculeur, si les deux circuits d'attaque passent de l'état saturé à l'état bloqué au même instant, l'état final dépend des caractéristiques des transistors. Donc, les deux plaques supports de basculeurs, la plaque de référence et la plaque en essai peuvent présenter des signaux de sortie différents sans pour cela qu'une faute soit réelle.

Pour éviter cet inconvénient, il suffit d'avoir la possibilité d'utiliser, soit l'une, soit l'autre des deux sorties de chacun des basculeurs du générateur de combinaisons d'attaques et de brancher les deux attaques de chaque basculeur à tester sur des signaux qui ne se modifient pas au même instant. Si, dans l'une au moins des chaînes d'attaque est inséré un inverseur, il faut bien entendu, en tenir compte.

La figure 16 indique pour certains types de basculeurs, les signaux qu'il faut utiliser.

Au cours de l'étude d'ensemble logique, il a été défini la carte support dont le schéma est indiqué

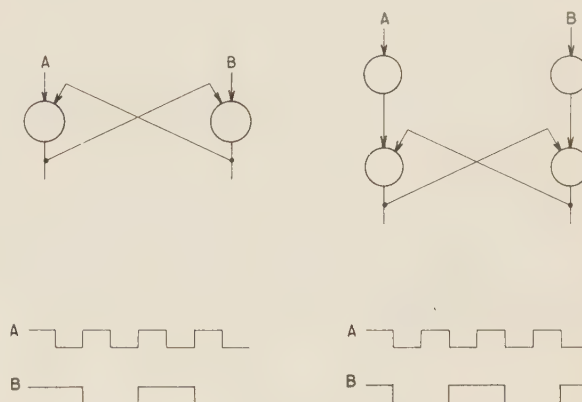


FIG. 16. — Signaux d'essai pour certains basculeurs.

sur la figure 17. L'entrée C pose un problème particulier qui ne peut être résolu qu'en favorisant volontairement un sens du basculeur, en branchant une diode par exemple entre C et E mais, si l'inversion des signaux d'attaque est facilement réalisée par 19 commutateurs, insérer une telle diode est beaucoup moins facile; deux solutions sont alors possibles: sortir les points C_1 et C_2 séparément et les relier sur le connecteur, ou considérer le point C comme une sortie et faire l'essai des deux diodes qui aboutissent sur un dispositif particulier.

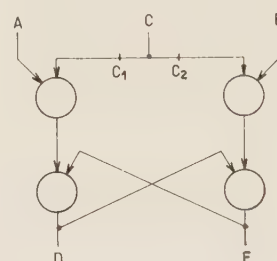


FIG. 17. — Schéma d'un basculeur à commande de transfert.

5.4. MISE EN ŒUVRE

La mise en œuvre de cet appareillage est très simple. Un jeu de cartes-support de référence et les cartes d'alimentation correspondantes sont, ainsi qu'un fichier indiquant la position des inverseurs pour chaque carte-support, à la disposition de l'opérateur. Celui-ci, après avoir mis en place les inverseurs si nécessaire, enfiche la carte de référence et la carte d'alimentation, l'appareillage est alors prêt à fonctionner.

Après enfichage de la carte en essai, l'opérateur appuie sur un bouton poussoir et le cycle s'effectue. Une signalisation lumineuse indique à l'opérateur,

en cas d'arrêt, l'état du générateur de combinaisons d'entrée, si le cycle est complètement effectué, la carte est bonne, si le cycle n'est qu'incomplètement effectué, la carte présente une faute. Dans ce dernier cas, une signalisation lumineuse supplémentaire permet de distinguer les fautes dues aux diodes d'entrée des autres fautes.

Le test peut être répété au gré de l'opérateur, la mise en route étant toujours précédée d'une remise à zéro. Un fonctionnement pas à pas est aussi prévu.

6. Conclusion

La structure retenue pour les circuits logiques permet d'atteindre de petites séries pour leur fabrication et leur contrôle tout en gardant une grande souplesse d'utilisation.

C'est là un résultat parfois difficile à atteindre dans un laboratoire de recherche où les réalisations sont faites le plus souvent à l'unité.

On notera aussi qu'un effort important a été fait pour l'automatisation des contrôles. Il a abouti en particulier à la réalisation d'un appareillage dont le principe, très général, peut facilement être adapté au contrôle de tout autre genre de circuits logiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PINET A. — Système de circuits logiques rapides à élément de base unique. *Onde Electrique*, Vol. 41, n° 416, nov. 1961.
- [2] GERBIER G. — Appareillage pour la mesure automatique de paramètres des composants électroniques. *Onde Electrique*, Vol. 42, n° 419, février 1962.

DOCUMENTATION TECHNIQUE

COMPARAISONS DE FRÉQUENCE

par rapport à l'Atomichron n° 107 du C.N.E.T. en 10⁻¹⁰
Moyennes journalières pour l'intervalle de 24 heures centré sur 3 h T.U.

Août 1962	NAA 14,7 kHz	GBR 16 kHz	NBA 18 kHz	NLK 18,6 kHz
1	—	— 130,3	— 128,1	— 128,2
2	— 129,3	— 129,7	— 127,3	—
3	— 129,1	— 129,2	— 125,3	— 128,9
4	— 129,0	— 130,5	— 128,5	— 129,6
5	— 128,2	— 127,3	— 129,4	— 128,0
6	— 128,1	— 128,8	— 129,5	— 128,2
7	—	— 128,3	— 130,0	— 128,8
8	— 128,7	— 131,0	— 131,2	— 130,4
9	— 128,0	— 129,0	— 129,5	— 127,9
10	—	— 128,1	— 130,5	— 129,2
11	—	— 128,4	— 128,9	— 128,8
12	—	— 129,4	— 127,5	— 128,7
13	—	— 129,4	— 127,0	— 128,5
14	— 128,0	— 129,7	— 126,8	— 129,3
15	— 126,6	— 129,5	— 127,4	— 129,1
16	— 127,1	— 129,5	— 127,0	— 127,7
17	— 126,9	— 131,3	— 128,3	— 129,4
18	— 127,8	— 127,5	— 128,0	— 128,9
19	— 127,8	— 127,6	— 127,2	— 128,1
20	— 127,4	— 128,6	— 126,0	— 128,8
21	—	— 128,7	— 126,0	— 129,6
22	—	— 128,9	— 126,2	— 128,5
23	— 128,5	— 127,9	— 126,6	— 128,5
24	— 128,5	— 128,0	— 129,1	— 128,2
25	—	— 127,1	— 130,4	— 129,4
26	— 127,3	— 127,6	— 128,5	— 127,7
27	—	— 127,4	— 128,4	— 129,4
28	—	— 128,3	— 127,6	— 127,9
29	—	— 129,7	— 127,6	— 129,5
30	— 127,4	— 129,6	— 126,9	— 128,6
31	— 125,6	— 128,0	— 125,1	— 128,3

Septembre 1962	NAA 14,7 kHz	GBR 16 kHz	NBA 18 kHz
1	—	— 129,2	— 125,6
2	— 127,6	— 130,7	— 126,5
3	—	— 130,8	— 125,8
4	— 127,2	—	—
5	— 128,0	—	—
6	—	—	—
7	—	—	—
8	—	—	—
9	—	—	—
10	—	—	—
11	— 127,2	—	—
12	— 127,5	— 129,8	— 127,1
13	— 127,6	— 130,4	— 126,3
14	— 127,2	— 128,1	— 126,3
15	— 127,5	— 130,7	— 125,1
16	— 126,9	— 129,0	— 126,8
17	— 126,4	— 128,0	— 125,0
18	— 126,6	— 128,6	— 127,1
19	—	— 129,0	—
20	— 125,7	— 128,0	—
21	— 125,7	— 129,4	— 126,6
22	— 126,2	— 129,5	— 125,8
23	— 126,9	— 128,7	— 127,3
24	— 126,1	— 129,2	— 126,4
25	— 127,7	— 129,7	—
26	— 127,2	— 130,8	—
27	— 129,0	— 129,6	—
28	—	—	—
29	— 127,0	— 128,6	—
30	— 127,0	— 129,6	—

— Une correction de — 74.10⁻¹⁰ est appliquée à la fréquence de l'Atomichron.
— Cf Onde Electrique, novembre 1960, p. 853, et janvier 1961, p. 81.

LES TRANSISTORS MICROSEAL

La technique Microseal, développée par HUGHES, permet de produire en quantité des transistors au silicium du type NPN ou PNP qui remplacent la plupart des types actuellement disponibles. Les transistors et diodes produits par cette méthode ont approximativement les dimensions d'un gros point décimal, et les fils de connexion associés ont des dimensions comparables.

Les transistors Microseal sont des transistors du type planar à double diffusion avec passivation totale. Le terme planar signifie que le collecteur, la base et l'émetteur se trouvent tous dans le même plan. La région de base est diffusée dans le collecteur et l'émetteur est à son tour diffusé dans la région de base. Pour la passivation, elle est obtenue par la déposition d'une mince couche d'oxyde de silicium à la surface des transistors, ce qui les protège contre toute dégradation chimique.

La fabrication des transistors Microseal commence par le découpage de rondelles minces, à partir d'un monocristal dont le diamètre approximatif est de 25 mm. Ce découpage est assuré par des scies au diamant tournant à grande vitesse. Les rondelles ainsi obtenues sont meulées et polies jusqu'à l'obtention d'un poli optique. Les impuretés sont alors introduites dans le silicium par diffusion. Dans ce procédé, le semiconducteur est exposé à l'action de vapeurs d'arsenic à haute température. L'arsenic diffuse dans le silicium jusqu'à une profondeur contrôlée, créant ainsi ce qui sera la zone N du produit fini. La surface obtenue est alors masquée, avec une résine photo-sensible, par une méthode qui la divise en un grand nombre de surfaces élémentaires, chacune correspondant à un transistor. Les régions non masquées, au centre de chaque surface élémentaire, subissent une diffusion de bore à haute température. Le bore diffuse et neutralise les impuretés du type N précédemment introduites par l'arsenic, les remplaçant par des impuretés dominantes du type P et créant la région d'émetteur.

L'oxyde de silicium est ensuite déposé sur la surface des transistors, ce qui les rend insensibles à toute contamination ultérieure.

La rondelle est découpée autour de chaque transistor élémentaire, en la marquant tout d'abord à l'aide d'une pointe à diamant, et en la passant ensuite dans un champ ultrasonique qui la brise en transistors élémentaires. Ensuite, les contacts d'émetteur et de base sont faits directement sur chaque transistor par thermo-compression.

Le collecteur est brasé à une petite plaque métallique.

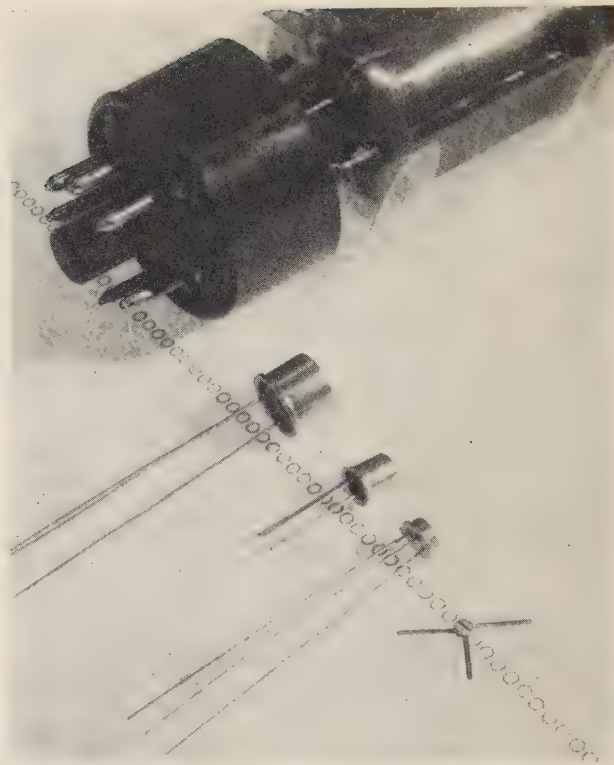
Le transistor est maintenant électriquement complet, et sa surface est protégée contre la contamination par la couche d'oxyde de silicium.

Le transistor est ensuite placé dans un boîtier de 2 mm de diamètre et de 0,75 mm de hauteur pour assurer sa protection mécanique. Ce boîtier contient deux soudures métal-céramique, obtenues par une méthode spéciale de brasage. En faisant appel au brasage, la présence de composés ferreux est éliminée, ce qui réduit d'autant les possibilités de contamination.

Du point de vue du fabricant, la technique Microseal apporte un avantage extrêmement important : une seule chaîne de fabrication est nécessaire pour produire toute une gamme de transistors. Les caractéristiques des transistors peuvent être changées de façon continue en cours de production, simplement en utilisant des matériaux avec des caractéristiques différentes dans la chaîne de fabrication finale, qui ne comporte que la fixation des fils de connexion et le scellement dans le boîtier métal-céramique.

Le dispositif ainsi obtenu, de dimensions très réduites, peut être utilisé tel quel, mais il est encore possible de le monter à l'intérieur de boîtiers standards, ce qui augmente évidemment les possibilités de dissipation en puissance.

Le même dispositif, dont les dimensions ont été citées plus haut, peut être monté dans des boîtiers des types TO 5, TO 18 ou TO 46. Grâce à la façon dont le transistor Microseal est monté à l'intérieur du boîtier, avec fixation directe à la partie supérieure, on assure une excellente dissipation thermique. Une résine de remplissage convenable est utilisée pour remplir le boîtier, mais ne joue aucun rôle dans la protection du transistor, qui est déjà complètement encapsulé.



Évolution des tailles : du tube à vide au transistors Microseal, en passant par des transistors de type classique.

Cette possibilité de changer de boîtier offre un avantage intéressant. Il est parfaitement possible d'utiliser dès maintenant ces transistors dans des montages standards, et en une deuxième étape de passer à une microminiaturisation des circuits qui ne présentera aucune difficulté, les performances étant les mêmes, à l'exception peut-être d'une réduction de la dissipation en puissance.

La fabrication d'une gamme complète de transistors du type Microseal est grandement simplifiée par rapport aux techniques classiques, et des problèmes précédemment gênants de rendement et d'inventaire ont été éliminés. Cela signifie que la production des transistors du type Microseal est intrinsèquement plus économique que celle des transistors de type standard, et que si les prix sont actuellement comparables, il est probable que l'avantage économique appartiendra aux transistors Microseal dans l'avenir.

MICROCIRCUITS « TRANSCO »

Une nouvelle gamme d'éléments fonctionnels TRANSCO microminiature vient de paraître :

- Multivibrateur bistable.
- Amplificateur.
- Porte NI.

Les caractéristiques essentielles sont les suivantes :

- Fréquence maximale de fonctionnement 100 kHz
- Gamme de température 0 à 45 °C
- Tension d'alimentation + 3 V
— 3 V
- Dimensions 36 × 28,5 × 3,75 mm.

COMMUNIQUÉS

SALON INTERNATIONAL DE L'ÉLECTRONIQUE

Bâle 2-7 septembre 1963

Parallèlement au Congrès de l'IFAC (International Federation of Automatic Control) qui se tiendra à Bâle du 27 août au 4 septembre 1963, un Salon International de l'Électronique industrielle, l'INEL 63 se tiendra du 2 au 7 septembre 1963 dans la même ville.

Le domaine de ce Salon est délimité comme suit :

1. Les composants électroniques : tubes électroniques, tubes à décharges gazeuses, semiconducteurs, éléments photosensibles, générateurs thermoélectriques, résistances, condensateurs, etc.

2. Les techniques électroniques de mesure : appareils électroniques pour la mesure de grandeurs électriques, instruments pour la mesure électronique du temps, appareils électroniques pour la mesure de grandeurs non électriques, etc...

3. Les applications industrielles de l'électronique.

En complément de celui de l'IFAC, un congrès de 2 jours aura lieu les 5 et 6 septembre, qui aura pour thème : la technique des Corps Solides, et sera plus particulièrement consacré aux branches représentées au Salon.

De nombreuses maisons d'Europe et d'Outre-mer exposeront dans ce Salon qui permettra donc aux fabricants d'entrer en contact avec des acheteurs et usagers du monde entier.

Pour tout renseignement complémentaire, s'adresser à : Secrétariat d'INEL 63, Clarastrasse 61, Bâle 21.

COLLOQUE INTERNATIONAL DES TECHNIQUES DE CALCUL ANALOGIQUE ET NUMÉRIQUE EN AÉRONAUTIQUE

Liège 9-12 septembre 1963

L'Association Internationale pour le Calcul analogique, la Société Belge pour l'Application des Méthodes Scientifiques de Gestion, la Société Royale Belge des Ingénieurs et des Industriels et l'Institut Belge de Régulation et d'Automatisme organisent conjointement à Liège (Belgique), du 9 au 12 septembre 1963, un colloque international sur les techniques modernes de calcul appliquées à l'aéronautique.

L'objectif poursuivi par les organisateurs du colloque est de provoquer des contacts directs et personnels entre spécialistes des diverses disciplines de calcul intéressant l'aéronautique et de permettre une confrontation des méthodes de calcul mises en œuvre et des résultats que celles-ci peuvent fournir.

Le programme proposé par le Comité d'Organisation s'établit provisoirement comme suit :

1° Aérodynamique (étude des écoulements permanents, instationnaires et aléatoires).

2° Structures (comportement statique, dynamique et thermique des structures).

3° Dynamique de l'avion (influence des caractéristiques aérodynamiques, massiques et structurales sur la réponse de l'avion aux diverses excitations auxquelles l'avion est soumis — avion classique, S/VTOL et hélicoptère).

4° Etude des organes mécaniques (servo-mécanismes).

5° Cinématique et navigation (trajectoires particulières, approche, atterrissage ; problèmes de navigation à moyenne et grande distance).

6° Etude des résultats d'essais en vol (interprétation des résultats d'essais).

7° Le simulateur de vol (pilotage, comportement d'avion en cours de projet, caractéristiques du pilote humain).

Les communications au colloque peuvent être présentées en français, anglais ou allemand.

Le temps de parole alloué aux auteurs de communications est limité à 20 minutes.

Des salles de réunion seront réservées aux discussions.

Les auteurs de communications sont priés de se faire connaître ainsi que de donner le titre de leur communication pour le 31 décembre 1962 au plus tard et de faire parvenir au secrétariat du colloque, avant le 15 avril 1963, un court résumé de leur communication comportant un maximum de 500 mots. Le comité d'organisation exprime le souhait que les auteurs envoient, jointes à leur résumé, les traductions de celui-ci dans les autres langues du colloque.

Les textes des communications, 5 000 mots au maximum, devront être déposés en double exemplaire au secrétariat du colloque avant la clôture de celui-ci.

Les personnes qui désirent participer au colloque et les auteurs de communications sont priés de bien vouloir se faire connaître auprès du secrétariat du colloque :

M. Jean Florine, 50, avenue Franklin-D.-Roosevelt, Bruxelles 5, Belgique.

RECHERCHE D'EXPERTS PAR LE SERVICE DE COOPÉRATION TECHNIQUE INTERNATIONALE

Le Bureau de Prospection des Experts, Service de Coopération Technique Internationale, Ministère des Affaires Étrangères, 23, rue La Pérouse, KLEber 52.00, poste 27.61, reçoit constamment des demandes d'experts, ayant une expérience d'une dizaine d'années dans leur spécialité, pour effectuer des missions temporaires dans les pays en voie de développement. Une bonne connaissance en langues étrangères (anglais ou espagnol principalement) est indispensable.

Les rémunérations offertes sont du niveau international. Tout spécialiste envisageant favorablement l'éventualité de s'absenter pour des périodes variant de quelques mois à plusieurs années est prié de se faire connaître à l'adresse précitée en vue de la constitution de son dossier.

NOUVELLE SOCIÉTÉ A PARTICIPATION FRANÇAISE POUR LA CONQUÊTE DES COMMUNICATIONS SPATIALES

La nouvelle société THOMSON-VARIAN est destinée à la production pour l'Europe des tubes et équipements électroniques nécessaires pour le développement des programmes spatiaux.

Cette nouvelle société a été présentée le 11 septembre devant de nombreuses personnalités américaines, européennes et françaises ; la SOCIÉTÉ THOMSON-VARIAN a été créée en commun par la COMPAGNIE FRANÇAISE THOMSON-HOUSTON et VARIAN ASSOCIATES de Palo Alto (Californie).

A l'occasion de cette manifestation il a été précisé que VARIAN avait conçu et réalisé les tubes amplificateurs « Klystrons » et les émetteurs qui ont permis aux savants américains du Jet Propulsion Laboratory de modifier à près de 1 500 000 kilomètres de la terre la trajectoire de la fusée MARINER II pour la faire passer à 15 000 kilomètres de Vénus.

Les signaux ont en effet été émis par deux stations équipées de dispositifs VARIAN et situées l'une à Goldstone en Californie et l'autre à Johannesburg en Afrique du Sud.

C'est actuellement la plus longue communication par radio qui ait été réalisée et tout donne à penser que les liaisons seront normalement maintenues jusqu'au voisinage de la planète.

La SOCIÉTÉ THOMSON-VARIAN profitera de l'avance acquise par la Société américaine dans le domaine des composants électroniques pour les communications spatiales et de l'acquit des laboratoires des deux maisons mères dans le développement des tubes hyperfréquences. La nouvelle Société, dotée de moyens importants et spécialement dans le domaine des études, doit connaître une progression rapide sur les marchés français et étrangers où ces deux firmes possèdent déjà une renommée incontestée, tant sur le plan de l'espace que sur celui déjà évoqué à propos de « THOMSON » des radars de très grande puissance et notamment des radars tridimensionnels.

REPRÉSENTATION EN FRANCE DE « POTTER-INSTRUMENT »

La compagnie POTTER INSTRUMENT (New York) vient de confier à la Société INTERTECHNIQUE, 81 rue Escudier, Boulogne sa représentation pour le marché commun.

INTERTECHNIQUE assurera la vente, l'installation et le service des productions bien connues de POTTER dans le domaine de l'enregistrement numérique sur bandes magnétiques. Parmi les autres produits de cette firme, citons encore les imprimeurs ultra-rapides et les lecteurs de bandes perforées.

SURVEILLANCE CENTRALISÉE DE LA RADIOACTIVITÉ A SACLAY

Le Commissariat à l'Energie Atomique procède, actuellement à la mise en place d'un système de surveillance centralisée des doses de radioactivité atmosphérique dans la région proche de Saclay.

Cette surveillance implique la connaissance de la radioactivité α , β , γ , et celle de la vitesse et de la direction du vent. Actuellement, ces paramètres sont mesurés et enregistrés par des stations, situées dans un rayon de quelques kilomètres autour du Centre d'Etudes Nucléaires ; des agents du CEA, au cours de rondes ininterrompues, relèvent et dépouillent les enregistrements obtenus. Le principal inconvénient de cette méthode est l'absence de centralisation instantanée des diverses informations recueillies, qui interdit la détection immédiate d'une dose dangereuse de radioactivité.

Afin de centraliser ces mesures, la Société T.R.T. a étudié et réalisé pour le CEA un système comportant à chaque station une armoire émettrice de télémesures (pouvant transmettre 10 mesures) et un émetteur-récepteur de radio fonctionnant en VHF.

Les données ainsi transmises sont reçues au poste de surveillance central, équipé d'un émetteur-récepteur, d'un ensemble récepteur de télémesures et émetteur de télécommande, d'enregistreurs multipistes. A chaque type de mesure est affecté un enregistreur et chaque piste correspond à une des stations de surveillance.

Fonctionnement du système

La fréquence radio allouée étant unique, le réseau fonctionne en alternat, par exploration cyclique des stations de mesure.

Le poste central de surveillance interroge la première station par l'émission de l'indicatif codé de celle-ci ; la station appelée répond en confirmant son indicatif, puis émet les séquences d'impulsion représentant en code la valeur numérique des mesures effectuées par les divers appareils de la station. Après réception

de ces données et l'écoulement d'un temps de repos, le P.C. procède à l'appel de la station suivante.

Les signaux d'appel et les mesures sont transmis en impulsions dans un code télégraphique trivalent (fréquence déplacée de ± 30 Hz). Deux fréquences, choisies dans la bande vocale de la liaison radio, sont utilisées.

Au poste de surveillance central, un dispositif prépare le code d'appel des stations et, au reçu du message de confirmation d'indicatif, met automatiquement en service l'enregistreur convenable pour inscrire la mesure, qui lui parviendra quelques millisecondes plus tard.

A condition d'interrompre le cycle de télémesures, il est possible de réaliser des liaisons en radiotéléphonie entre les stations et le P.C. Ces communications s'établissent seulement sur autorisation de ce dernier.

Le matériel électronique de télémesures et de télécommandes utilisé est constitué, à l'émission comme à la réception, d'un ensemble de boîtiers étanches, amovibles, réalisés suivant la même technologie que le matériel de télémesures cycliques à 5 termes produit en grande série par T.R.T. Ces équipements sont entièrement transistorisés.

Le matériel de transmission radio consiste en des émetteurs-récepteurs VHF à modulation de fréquence, type « Mobilophone », modèles standard de 20 et 50 W, équipés d'antennes Yagi ou ground plane suivant les stations.

AUTOMATISATION DE LA PLUS IMPORTANTE CENTRALE NUCLÉAIRE EUROPÉENNE

La Région d'Équipement Thermique Nucléaire n° 1 de l'Electricité de France, qui a mis en chantier à Chinon en 1961 la troisième centrale nucléaire française EDF-3, vient de passer commande à la C.A.E. d'un système de traitement d'informations RW-530 destiné à l'automatisation de cette centrale.

Construite dans le cadre du programme nucléaire d'Electricité de France, qui doit permettre dans les années à venir l'exploitation industrielle de l'énergie nucléaire, cette centrale EDF-3 comprend un réacteur à uranium naturel le plus puissant d'Europe et deux groupes turbo-alternateurs de 250 MW. L'importance et la complexité de cette installation ont nécessité la mise en œuvre d'un puissant système électronique qui permettra non seulement d'assurer une sécurité absolue mais encore de tenir compte des impératifs imposés par la demande du réseau d'énergie tout en maintenant la centrale dans un état de fonctionnement optimal.

Ce système, qui mettra en œuvre deux calculateurs numériques RW-530 à très grande vitesse de calcul et à grande capacité de mémoire (mémoires à tores de ferrite, tambour magnétique de 100 000 emplacements de mémoire) et un nombre important d'unités périphériques, sera connecté directement aux capteurs de mesures et d'organes de commande de la centrale.

Cet ensemble prendra en charge les fonctions classiques de surveillance permanente et d'enregistrement de 2 500 points de mesure, analysera leur évolution et assurera la détection séquentielle des états de 3 000 signalisations ainsi que le traitement des informations de la détection de ruptures de gaines d'uranium. Il effectuera, en outre, des calculs de bilans et de rendements ainsi que des calculs nucléaires qui détermineront les points de consigne de la régulation afin d'obtenir une marche optimale.

EDF-3 qui sera la plus automatisée de toutes les centrales nucléaires actuellement construites dans le monde consacre de façon péremptoire la position de leader que l'Electricité de France s'était acquise dans le domaine de l'automatisation des centrales et des réseaux de transports. Rappelons à ce sujet que la C.A.E. est chargée de l'automatisation de la centrale de Saint-Ouen et du « dispatching central » de l'Electricité de France.

BIBLIOGRAPHIE

Physique électronique des solides, par G. FOURNET. Un vol. 16 × 25 cm, 336 pages, 158 figures et 19 tableaux (Eyrolles, Paris 1962). Broché : 47 NF.

Depuis 1940, et surtout 1950, la plupart des nouveautés qui ont paru dans le domaine de l'électronique sont liées à la création ou au perfectionnement de substances solides telles que les semiconducteurs et les ferrites en vue d'applications déjà bien connues (cryotrons, matériaux pour masers, lasers ou mavers) ou d'applications encore à leur début. Ces divers matériaux interviennent de plus en plus dans les différentes branches de la technique : commutation, transmission, réception, amplification, machines à calculer... Aussi peut-on dire que la tendance actuelle de l'électronique est non pas dans le perfectionnement de l'agencement des éléments de circuits, mais bien dans le développement de nouveaux éléments.

C'est pour permettre aux ingénieurs de suivre ces développements que le présent ouvrage, inspiré du cours que l'auteur professe à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, a été écrit. Il est toutefois limité aux deux classes de corps actuellement les plus importantes : les semiconducteurs et les corps magnétiques.

L'auteur présente logiquement l'ensemble des différentes notions permettant de fournir pour chaque phénomène l'explication la plus « intime » qu'il a été jugé possible d'être donnée facilement. Il ne traite systématiquement que les phénomènes de base, à l'exclusion de tout procédé de fabrication, schéma de circuits, etc.

Pour expliquer le comportement des semiconducteurs et des corps magnétiques, il faut connaître du moins de façon précise l'état, au sens le plus général, des électrons se trouvant dans la matière. Cette description constitue le centre d'intérêt du présent livre qui porte, pour cette raison, le titre de « Physique électronique des solides ». Pour suivre ce programme, il a été nécessaire de donner des notions assez complètes sur les problèmes de détermination de l'état énergétique des électrons dans les solides qui ne peuvent être résolus qu'au moyen de la mécanique quantique dont l'exposé fait l'objet du premier chapitre. Les chapitres suivants traitent respectivement de la Statistique de Fermi-Dirac, de la Théorie électronique des métaux, des semiconducteurs et du magnétisme.

L'ouvrage de M. FOURNET, sera vivement apprécié tant par les ingénieurs et élèves-ingénieurs électriciens, radioélectriciens que par les physiciens et les physico-chimistes.

R.O.E.

Pile neutron research in physics. Un vol. 16 × 24 cm, 654 pages, nombreuses illustrations (International Atomic Energy Agency, Vienne 1962). Broché : 48 NF.

Ce volume contient les actes du symposium tenu à Vienne en 1960 sur la recherche en physique au moyen des neutrons émis par les piles. 55 communications présentées dans leur langue d'origine (anglais, français et russe) et précédées d'un résumé quadrilingue sont classées sous 7 rubriques : recherche au moyen de neutrons émis par les piles dans des pays jeunes (2 communications) généralités sur les programmes de recherche en physique au moyen de neutrons émis par les piles (8 communications), compte rendu des recherches en physique nucléaire au moyen des neutrons émis par les piles (5 communications), problèmes particuliers sur les recherches en physique nucléaire au moyen des neutrons émis par les piles et mesures des spectres des neutrons (13 communications), compte rendu sur les recherches en physique des états solides et liquides au moyen des neutrons émis par les piles (5 communications), problèmes particuliers dans les recherches de physique des états solide et liquide au moyen des neutrons émis par les piles (8 communications), équipements expérimentaux (14 communications). Ces actes sont précédés d'un article à la mémoire de DONALD J. HUGUES.

R.O.E.

Eléments de mécanique rationnelle à l'usage des électroniciens, par F. BULTOT. Un vol. 16 × 25 cm, 280 pages, nombreuses illustrations (Gauthier-Villars, Paris 1961). Relié : 35 NF.

Si dans la littérature technique d'expression française, il existe de nombreux traités et cours de mécanique rationnelle — et il en est d'excellents — il faut reconnaître qu'ils présentent entre eux un grand air de parenté.

L'auteur a voulu faire œuvre nouvelle. Si assurément, pour lui comme pour quiconque, les lois générales de la mécanique restent les mêmes, il a voulu donner à son ouvrage une orientation bien déterminée. Il a écrit un cours de mécanique rationnelle pour futurs électroniciens. Il a pris ses nombreux exemples et applications — sans lesquels la mécanique rationnelle ne serait qu'une science très abstraite et assez aride — parmi ceux qui directement ou indirectement, ont rapport avec l'électronique. C'est en effet en réfléchissant à ce que l'électronique attend de la mécanique rationnelle que son ouvrage est né. Et avant d'être publié, son contenu a été enseigné pendant plusieurs années, de sorte que l'on peut être assuré qu'en même temps que la solidité du fond, l'ouvrage se recommande par ses qualités pédagogiques.

R.O.E.

Whole-body counting. Un vol. 16 × 24 cm, 536 pages, nombreuses illustrations (International Atomic Energy Agency, Vienne 1962). Broché : 40 NF.

Ce volume contient les actes du symposium tenu à Vienne en Juin 1961 sur le dosage de l'activité du corps humain. Après l'exposé liminaire de F.W. SPIRES les 32 communications, présentées dans leur langue d'origine, sont groupées en 6 rubriques : propriétés des détecteurs de radiations (3 communications), techniques d'étalonnage (3 communications), appareillages type pour le dosage de l'activité du corps humain (7 communications), études des charges corporelles naturelles et sur des sujets contaminés (9 communications), techniques des traitements des informations (2 communications), applications classiques de l'activité du corps humain (8 communications).

R.O.E.

Electronique appliquée, par M. BIBAL et P. HEINY. Un vol. 13,5 × 21 cm, 300 pages, nombreuses illustrations (Delagrave, Paris 1962). Broché : 18 NF. — Relié : 22 NF.

Cet aide-mémoire, de la collection TECHNOR s'adresse aux candidats aux différents examens d'électronicien : CAP, BEI, BP, BT. Une première partie, documentation technique est divisée en électricité, électronique, manipulation et technologie. Une seconde partie, documentation générale, termine cet ouvrage.

R.O.E.

Inelastic scattering of neutrons in solids and liquids. Un vol. 16 × 24 cm, 652 pages, illustrations (International Atomic Energy Agency, Vienne 1961). Broché : 48 NF.

Ce volume contient les actes du symposium tenu à Vienne en octobre 1960 sur la diffusion inélastique des neutrons dans les solides et les liquides. Les 50 communications, publiées dans leur langue d'origine (anglais, français, russe) et précédées d'un résumé quadrilingue sont groupées en 7 sections : théorie générale (9 communications), méthodes de spectrométrie des neutrons (5 communications), liquides et molécules (autres que l'eau) (8 communications) eau (7 communications), modérateurs à froid (6 communications), solides (12 communications), aspects de neutrons (3 communications).

R.O.E.

Cours d'électrotechnique, par E. GILLON. Un vol. 16 × 25 cm, 328 pages, 272 figures (Dunod, Paris 1962). Broché : 32 NF.

Cette première partie du Cours d'électrotechnique, qui en est à sa quatrième édition, est consacrée à l'exposé des théories générales sur lesquelles sont basées les diverses réalisations de l'électronique.

Cet exposé est complété par un examen plus approfondi de la théorie des courants alternatifs, de la théorie électromagnétique et des mesures électriques.

Ce cours, présenté d'une manière propre à en favoriser l'application aux problèmes de la pratique, permet de bien comprendre l'aspect physique des phénomènes électriques fondamentaux, ce qui facilite l'analyse ultérieure des propriétés des machines électriques, des lignes et des réseaux, ainsi que des nombreuses utilisations de l'énergie électrique dans l'industrie qui sont traitées dans trois autres volumes.

A noter que, dans l'ensemble de ce traité, il est fait exclusivement usage du Système International.

R.O.E.

Le verre et la céramique dans la technique du vide, par Pierre COLNOT et Georges GALLET. Un vol. 16 × 25 cm, 128 pages, 48 figures et 14 tableaux (Eyrolles et Gauthier Villars, Paris 1962). Relié : 19 NF.

Ce nouvel ouvrage de la Collection de l'Association Nationale de la Recherche Technique est un important complément du « Traité de technique du Vide », réalisé précédemment sous la direction du professeur MORAND.

L'évolution technique qui s'est produite depuis cette époque, en verrerie et en céramique, rendait souhaitable cette nouvelle publication.

En effet, on peut signaler parmi les faits importants intervenus récemment :

— Pour les verres, l'amélioration des borosilicates utilisés en électronique, l'apparition de produits nouveaux tels que le Pyrocéram, les Fotoform et Fotocéram enfin, l'utilisation sur une grande échelle de la poudre de verre enrobée pour les préformes destinées aux pièces détachées ;

— Pour les céramiques, outre l'amélioration constante des méthodes d'élaboration et d'usinage qui permettent maintenant d'assurer la fabrication de pièces d'une homogénéité quasi-parfaite et d'une précision dimensionnelle très grande, la réalisation de nombreux matériaux nouveaux — en particulier de certains oxydes métalliques purs frittés — dont les caractéristiques mécaniques, thermiques et électriques modifient l'ordre de grandeur même des possibilités des isolants.

La partie réservée au « Verre » dans l'ouvrage de MM. COLNOT et GALLET comporte d'abord une étude sommaire des familles de verre et des techniques de fabrication et de finissage. Elle énumère ensuite les facteurs les plus importants qui interviennent dans la soudure verre-métal et donne quelques indications sur les méthodes employées pour faciliter certaines soudures. Enfin, elle indique sous forme de tableau les caractéristiques des verres actuellement utilisés en électronique et donne une liste d'ouvrages publiés dans différents pays dans lesquels le lecteur trouvera une étude plus complète des questions traitées dans le présent livre et la bibliographie de nombreux mémoires originaux concernant, en particulier, la soudabilité.

La partie consacrée à la « Céramique » a pour but essentiel de donner d'abord, au lecteur la notion de ce qu'est une céramique — au sens moderne du mot — afin de rendre intuitif chez lui le fait que certaines d'entre elles possèdent des propriétés physiques très différentes de celles des céramiques traditionnelles, faïences et porcelaines. Ensuite, en partant de ces notions fondamentales, sont décrites les caractéristiques des plus connus et des plus « industriels » de ces matériaux afin de permettre à l'utilisateur éventuel de choisir judicieusement celui dont il a besoin.

Enfin, les auteurs examinent quelques techniques classiques d'utilisation des céramiques dans les problèmes de la technique du vide et donnent quelques exemples de réalisation.

R.O.E.

Radiation damage in solids tomes I et II. Deux vol. 16 × 24 cm, 385 pages, nombreuses illustrations (International Atomic Energy Agency, Vienne 1962). Brochés : 28 NF et 24 NF.

Ces deux volumes font partie des comptes rendus du symposium sur les dégâts causés par les rayonnements dans les solides et les matériaux de réacteurs nucléaires tenu par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique à la fondation CINI à Venise en mai 1962.

Comme dans tous les actes publiés par l'IAEA le texte de chaque communication est donné dans sa langue d'origine, chaque texte étant précédé d'un résumé quadrilingue (anglais, français, russe, espagnol).

Le premier tome groupe 5 communications sur la théorie générale et 16 sur les métaux purs ; le deuxième tome contient 9 communications sur les alliages et 6 communications sur les techniques spéciales. En annexe se trouve la liste des présidents de sessions, des membres du secrétariat et des participants au symposium.

Les deux volumes contiennent la totalité des 35 communications sur les dégâts par radiations dans les solides présentées et discutées individuellement au symposium, un troisième volume à paraître groupera les discussions sur les effets des radiations sur les semiconducteurs et les cristaux non métalliques.

R.O.E.

PETITES ANNONCES

n° 599 C. — GROUPE DE FIRMES USA
CHERCHE
JEUNE REPRÉSENTANT

doit être — très actif et commerçant.

— ordonné, méthodique et organisateur.

doit avoir — bonnes connaissances théoriques en électronique et physique

— quelques années d'expérience de la vente de matériel électronique

— des relations et introductions dans l'industrie électronique

— très bonne présentation et aisance dans les rapports humains

— bonnes notions d'anglais

— voiture.

Très bel avenir pour élément de première valeur. Faire offre de service très détaillée au journal qui transmettra.

n° 600 C. — LES USINES
VIDEON

recherchent, pour leur laboratoire de la région parisienne, section « Etudes Avancées », des ingénieurs techniciens et Agents Techniques, parfaitement au courant de la télévision en couleur (systèmes NTSC et SECAM) et de tous les problèmes de transistorisation. Discretion assurée. Ecrire curriculum et prétentions à VIDEON, Section Etudes Avancées, 95, rue d'Aguesseau. BOULOGNE-sur-SEINE.

industriels

LA DOCUMENTATION
TECHNIQUE EST LE PLUS
PUISSANT FACTEUR

d'expansion



FORMAT
21 x 27

2 VOLUMES
1500 Pages

Couverture
cartonnée
4 couleurs

4 LANGUES

la 4^e édition

INTERNATIONALE

du GUIDE TECHNIQUE DE L'ÉLECTRONIQUE PROFESSIONNELLE

1963

1964

sera entièrement justifiée *



* Office
de Contrôle
de la
Diffusion
des supports
divers de la
Publicité
C.S.D.
18, Rue
Clairaut
Paris (17*)

TIRAGE ET DISTRIBUTION

EN FRANCE ET DANS LE MONDE...

Les catalogues condensés bilingues, **partie essentielle** de notre ouvrage, véritables cartes de visite techniques de l'ENTREPRISE, représentent l'élément **le plus efficace** et **le moins cher** pour les premiers contacts **marché intérieur**

et **MARCHÉ COMMUN**

• Sans engagement de votre part,
demandez la visite de nos représentants...

ÉDITION - ADMINISTRATION - VENTE

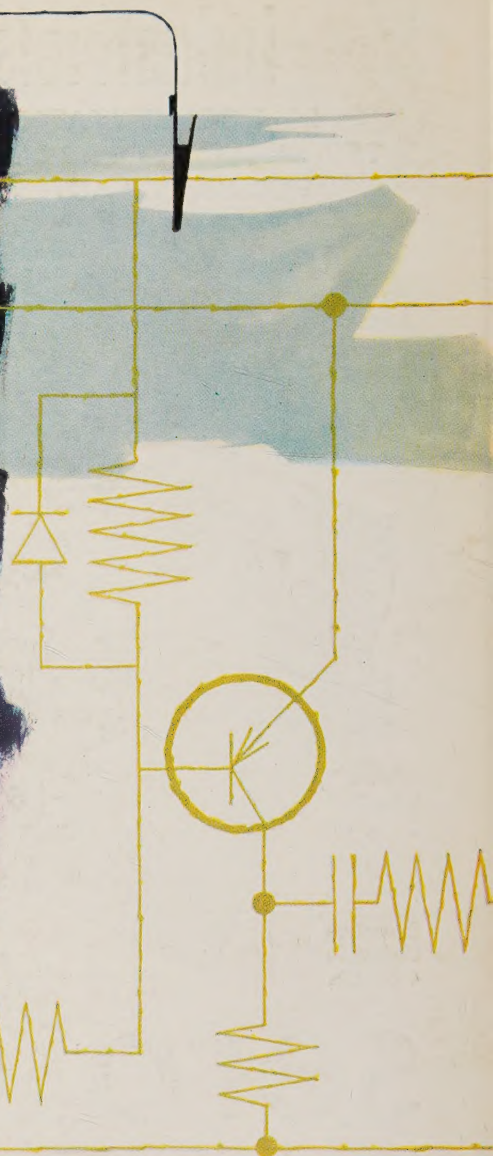
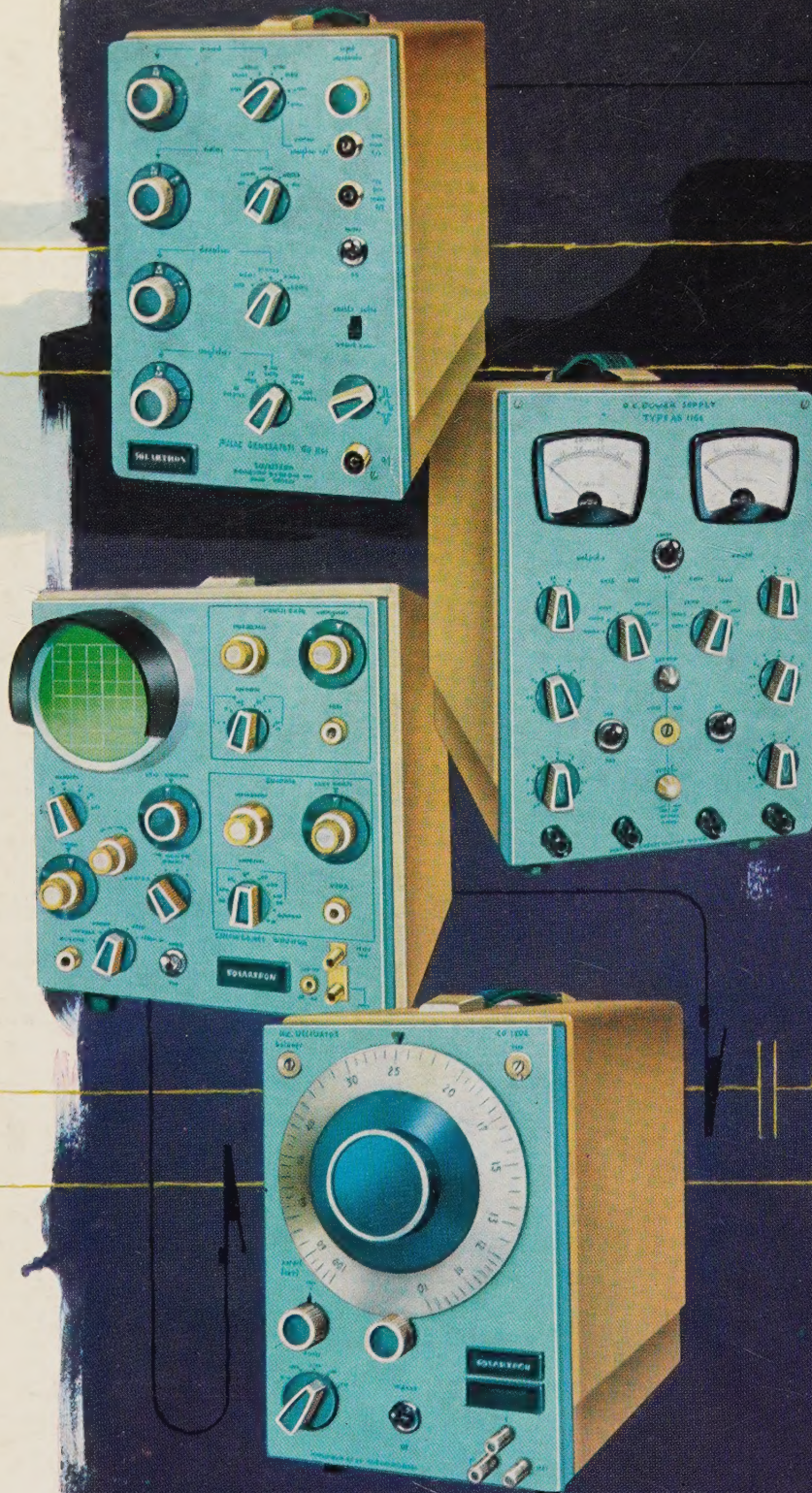
RÉGIE EXCLUSIVE DE LA PUBLICITÉ

LES GUIDES TECHNIQUES INDUSTRIELS
MEMBRE DE LA CHAMBRE SYNDICALE DES ÉDITEURS D'ANNUAIRES
13, RUE CHARLES-LECOQ - PARIS 15^e



AGENCE PUBLÉDITEC - DOMENACH
13, RUE CHARLES-LECOQ - PARIS 15^e - BLO. 88-04 et 05.

VENTE EXCLUSIVE DE NOS GUIDES EN LIBRAIRIE : EDITIONS CHIRON - 40, RUE DE SEINE - PARIS (6^e)



Cet ensemble d'appareils de mesure **SOLARTRON** constitue l'équipement de base indispensable à tout ingénieur dans les laboratoires d'étude ou de développement.

Il se compose (de haut en bas) du Générateur d'impulsions **GO 1101**, de l'alimentation double stabilisée pour semi-conducteurs **AS 1164**, de l'oscilloscope bien connu **CD 1014** et du Générateur sinusoïdal **CO 1004**.

SOLARTRON

22 bis, RUE DE TERRE-NEUVE • PARIS (20^e)

TÉLÉPHONE PYR. 48-40
TÉLEX N° 22.686