



Les ferrites à mémoire

G. Grunberg, H. Jeantils, H. de Silvestre

► To cite this version:

G. Grunberg, H. Jeantils, H. de Silvestre. Les ferrites à mémoire. Revue de Physique Appliquée, 1974, 9 (5), pp.859-864. 10.1051/rphysap:0197400905085900 . jpa-00243850

HAL Id: jpa-00243850

<https://hal.science/jpa-00243850>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES FERRITES A MÉMOIRE

G. GRUNBERG, H. JEANTILS et H. de SILVESTRE

COFELEC Mémoires, B. P. 203, 94600 Choisy-Le-Roi, France

Résumé. — Après un bref rappel des conditions de fonctionnement des tores à mémoire, et la définition des paramètres usuels des fabricants, les caractéristiques idéales du tore à mémoire sont précisées.

Les différents diagrammes utilisés sont cités, ainsi que l'évolution des dimensions géométriques. Les modes de préparation des tores, avec différentes variantes possibles, sont donnés rapidement.

Deux problèmes particuliers soulevés par la recherche de meilleures performances électromagnétiques sont exposés : un phénomène de résonance magnétoélastique lié à la magnétostriction, et un vieillissement des caractéristiques du tore dans certaines conditions de frittage rapide. Les grands axes de l'évolution actuelle des matériaux pour tores à mémoire sont donnés ainsi qu'une comparaison avec les semi-conducteurs.

Abstract. — After a short recall of working conditions of memory cores and definition of usual parameters of manufacturers, ideal characteristics of memory core are stated.

The different diagrams used are shown as well as development of geometrical sizes. Core preparation methods are given with various possibilities.

Two particular problems raised by research of best electromagnetic performances are : Phenomenon of magnetoelastic resonance due to magnetostriction and aging of core characteristics in certain conditions of quick sintering. The large lines of actual development of materials for memory cores are given as well as a comparison with semi-conductors.

L'utilisation de tores de ferrite comme éléments mémoire remonte à plus de vingt ans (Brown et Schoenberg, 1953). Actuellement, la production mondiale annuelle de tores à mémoire est de l'ordre de 30 milliards, hors IBM, et malgré les menaces périodiques que font peser des techniques concurrentes, on assiste à une évolution constante des matériaux et à l'apparition régulière de nouveaux types de tores.

1. Phénomènes fondamentaux. — Le principe de l'utilisation du tore de ferrite dans les mémoires repose sur l'existence d'un cycle d'hystérésis pratiquement rectangulaire, qui permet d'avoir deux états rémanents stables, 1 et 0 en système binaire. Le rapport de rectangularité de cycle, défini comme :

$$\frac{B_{(-0,6H_n)}}{B_{(H_n)}} \quad H_n \text{ étant le champ nominal appliqué,}$$

doit être au moins égal à 0,75 pour qu'un matériau soit utilisable. Les cycles effectivement décrits sont donc des cycles mineurs. En pratique, les mesures des caractéristiques d'un matériau sont fondées sur son fonctionnement en mémoire, et les tests en impulsions sont préférés aux mesures de cycle.

2. Mode d'exploitation. Caractéristiques requises. — Dans la majeure partie des cas, les tores sont assemblés en matrices et sont traversés par deux conducteurs de commande X et Y (Fig. 1). L'écriture et la lecture d'un

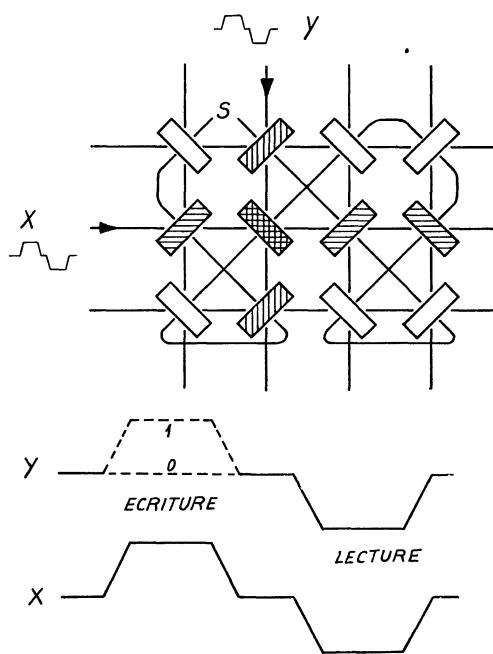


FIG. 1. — Fonctionnement d'un tore par coïncidence dans une matrice tissée. Forme des impulsions de courants utilisées. X-Y : fils de commande. S : fil de prélèvement des signaux.

tore sont faites par coïncidence de deux demi-courants envoyés dans les lignes X et Y correspondantes.

Le demi-courant I_p est choisi à une valeur telle que le champ créé H_p est inférieur au champ coercitif

H_c et que $2I_p$ est supérieur à H_c . Ces courants I_p traversent les tores non sélectionnés des lignes X et Y : il faut que ces tores restent dans leur état initial quels que soient le nombre et la polarité de ces impulsions partielles. On voit sur la figure 2 un programme d'impulsions tel que peut le subir un tore dans le cas défavorable, et le cycle décrit correspondant.

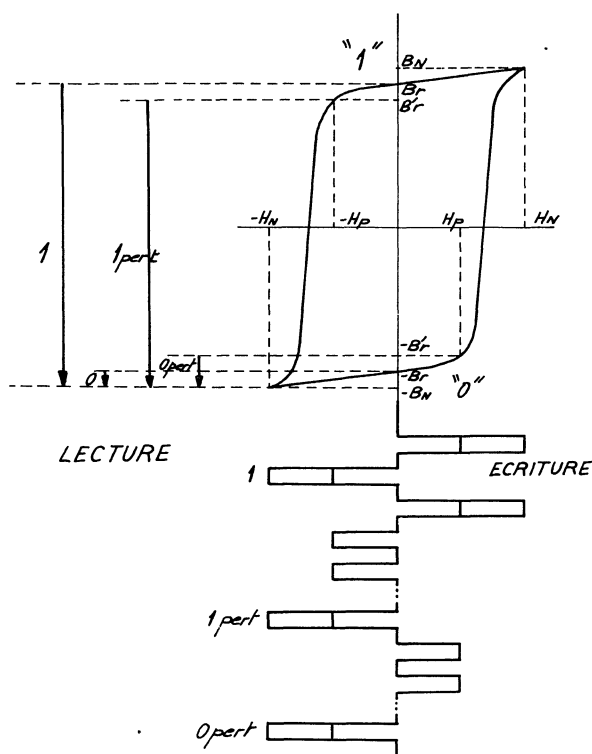


FIG. 2. — Cycle dynamique d'un tore en impulsions.

Le rapport I_p/I_n est le taux de perturbation du tore, qui est théoriquement égal à 0,5. En fait, les alimentations de courant sont en général à $\pm 10\%$, et dans le cas défavorable, un tore peut être écrit et lu avec un courant de $0,9 I_n$ et recevoir, entre-temps, des impulsions de perturbation de $\frac{I_n}{2} + 10\% = 0,55 I_n$. Le taux de perturbation est alors de 0,61. Ces conditions défavorables de fonctionnement sont les conditions de test, et le plus souvent le taux de perturbation appliqué est 0,65.

Sur la figure 3, on peut voir la forme des impulsions de courant utilisées pour la mesure du tore, et les réponses caractéristiques du tore lui-même. En général, l'amplitude du courant de basculement I_n est de 500 à 800 mA, les réponses 1 d'une quarantaine de mV et 0 de quelques mV, ce qui correspond à des champs coercitifs de 1 à 8 A/cm, et des inductions rémanentes de 1 000 à 3 000 G, selon les dimensions du tore et le matériau utilisé. Un tore à mémoire est donc défini par :

- Ses dimensions.
- Son courant de commande.
- Le taux de perturbation maximum supportable à cette valeur de courant.

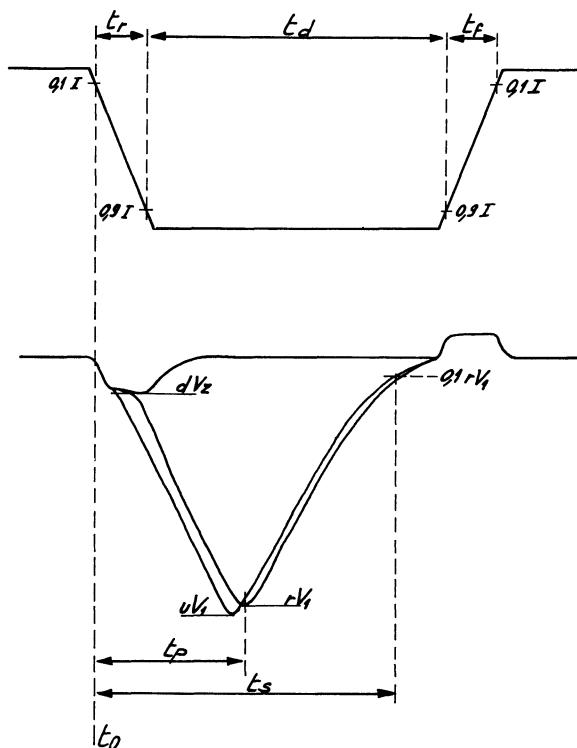


FIG. 3. — Forme d'une impulsion de commande. Réponses caractéristiques 1 et 0 du tore.

- Ses réponses $uV1$: 1 non perturbé,
 $rV1$ (ou $dV1$) : 1 perturbé,
 dVz (ou wVz) : 0 perturbé,
 t_p : temps de crête de la réponse 1,
 t_s : temps de basculement de la réponse 1.

● Son comportement en température : coefficient de compensation du courant de commande permettant de recueillir une réponse constante, et coefficient de « coude », c'est-à-dire variation du courant maximum d'utilisation compte tenu des perturbations (Fig. 4).

- Les caractéristiques idéales seraient les suivantes :
Courant de commande aussi faible que possible.
Taux de perturbation élevé.
Rapport signal sur bruit ($rV1/dVz$) très grand.
 t_p et t_s aussi petits que possible.
Coefficients de température très faibles.

Ces exigences sont en partie contradictoires : par exemple, on peut obtenir un courant de commande faible en abaissant le coercitif soit par additions, soit par un frittage plus élevé, mais au détriment des temps et de l'amplitude des réponses. Des substitutions de ZnO permettent d'accroître l'induction, mais abaissent le point de Curie et donc la tenue en température. La réduction des dimensions du tore amène une diminution des t_p et t_s , mais la masse étant moins grande, les réponses seront plus faibles.

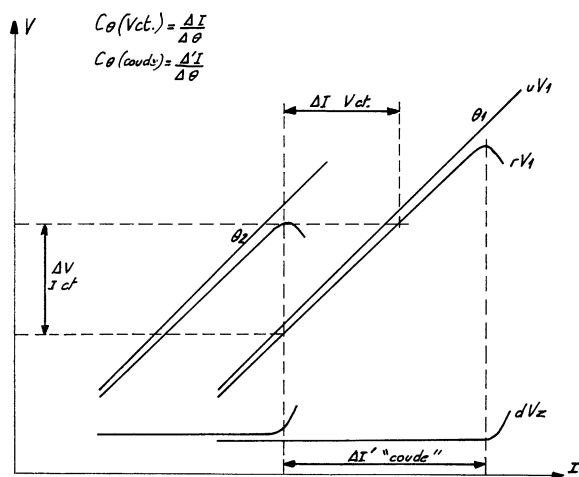


FIG. 4. — Réponses caractéristiques d'un tore en fonction des courants de commande et de la température. Coefficients de température.

Il faut donc chercher le meilleur compromis, en agissant à la fois sur la composition et la dimension du tore.

3. Matériaux utilisés. — Les compositions utilisées pour les tores à mémoire sont multiples et peuvent contenir jusqu'à six ions métalliques principaux. La position exacte de ces ions sur les sites du réseau cristallin est donc assez incertaine. Chaque fabricant a ses diagrammes de base, mais interviennent nombre d'additions, le plus souvent choisies empiriquement, en fonction d'un processus de fabrication.

C'est selon le comportement en température que l'on arrive le mieux à classer les matériaux mémoire, étant donné qu'une même formule peut convenir pour la fabrication de tores très différents. Ce classement correspond en outre à l'ordre d'apparition des matériaux sur le marché.

On peut donc distinguer :

1) Les matériaux à plage de température réduite : c'est-à-dire, les tores pour lesquels la température de fonctionnement ne peut excéder 50 °C, le cycle devenant insuffisamment rectangulaire au-delà. Leur point de Curie est de l'ordre de 230 à 250 °C, et leur variation en fonction de la température est importante : la correction de courant à apporter est d'environ 3 mA/°C.

Ces matériaux sont principalement des ferrites de magnésium-manganèse-zinc, mais on trouve aussi des ferrites de cuivre-manganèse-zinc ou cuivre-nickel-zinc. Malgré leur faible tenue en température, ces matériaux sont intéressants pour leur rapidité et leurs courants de commande moyens, mais la nécessité de thermostatier les mémoires limite leur emploi.

2) Les matériaux à très large plage de température pouvant fonctionner jusqu'à des ambiances de 125 à 150 °C. Le ferrite de base est le ferrite de lithium. Cependant, étant donné les difficultés que pose l'élaboration de ce ferrite simple, et les caractéristiques médiocres obtenues en tores, on préfère en général des

formules plus complexes avec addition, en faible proportion, de manganèse ou de nickel.

Les matériaux à base de ferrite de lithium ont des coefficients de température faibles : correction de l'ordre de 1 mA/°C ou moins, mais des coercitifs élevés et une induction faible : pour des tores de faible dimension (0,5 mm), les courants ne sont jamais inférieurs à 800 mA.

3) Les matériaux à plage de température moyenne, utilisables jusqu'à 75 °C et dont le coefficient de température est de l'ordre de 2 mA/°C. Ce sont actuellement les matériaux les plus développés et les systèmes sont très nombreux. On peut citer :

- les ferrites de lithium-manganèse-zinc, et lithium-nickel-zinc,
- les ferrites de fer-nickel-manganèse,
- les ferrites de lithium-nickel-magnésium-manganèse-zinc.

Ces matériaux combinent les avantages des deux classes précédentes, sans en avoir les inconvénients.

A titre de comparaison, la figure 5 présente les caractéristiques en température de trois tores de 0,5 mm (20 mil), l'un à base de magnésium-manganèse, le second à base de lithium avec addition de manganèse, le troisième en ferrite de fer-nickel-manganèse.

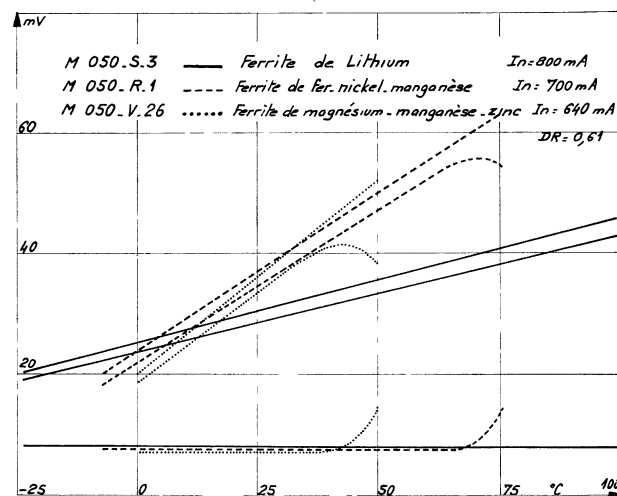


FIG. 5. — Evolution des réponses de tores de 0,5 mm, en fonction de la température et de la composition.

En même temps qu'apparaissent de nouveaux systèmes, on a assisté à une réduction constante de la dimension des tores depuis leur origine, dans le but d'obtenir des rapidités et des densités de points mémoire toujours plus grandes. En effet, le temps de basculement d'un tore suit la loi bien connue :

$$ts = \frac{Sw}{H - Ho}$$

où Sw est la constante de basculement du tore,

H le champ appliqué,

et Ho le champ de seuil du cycle partiel, voisin du champ coercitif.

On peut donc accélérer le basculement d'un tore, soit en diminuant Sw , c'est-à-dire en modifiant le matériau, soit en augmentant $H - H_0$. On est rapidement limité dans la première voie car les différences d'un matériau à l'autre n'excèdent guère 10 %. La solution choisie a donc été d'augmenter les champs pour ne pas arriver à des valeurs de courants rédhibitoires, à diminuer le rayon moyen du tore. Le tableau ci-dessous présente, grosso modo, l'évolution des rapidités des tores en fonction de leur dimension :

φ_e	$t_r \mu s$	$t_s \mu s$	Temps de cycle mémoire μs
2 mm (80 mil)	0,5	1,5 -2,5	10
1,25 mm (50 mil)	0,2	0,8 -1,0	5,0
1 mm (40 mil)	0,2	0,6 -1,0	5,0
0,80 mm (30 mil)	0,1	0,35 -0,5	2,0
0,50 mm (20-22 mil)	0,05	0,220-0,350	1,0 -1,5
0,46 mm (18 mil)	0,05	0,180-0,220	0,800-0,650
0,30 mm (12 mil)	0,03	0,090-0,120	0,400

4. Mode de préparation. — Le procédé de préparation des tores est essentiellement céramique. Les matières premières, oxydes métalliques ou sels tels que carbonates ou oxalates, sont mélangées intimement, le plus souvent par broyage mécanique en milieu liquide. Le mélange séché est ensuite calciné à basse température (de 700 à 1 000 °C), de manière à décomposer les sels et préformer le ferrite, puis broyé à nouveau en milieu aqueux avec adjonction d'un liant organique, et séché en atomiseur. La mise en forme s'effectue par compactage du granulé obtenu sur des presses à grande cadence (16 à 30 tores/seconde). Les tores sont ensuite frittés. Selon le type de matériau, on utilise soit une seule cuisson, en four à passage ou en discontinu, soit deux cuissons, la seconde étant un recuit sous atmosphère neutre. Après frittage, les tores sont testés par prélèvement, triés en épaisseur, nettoyés et triés unitairement dans les conditions de fonctionnement, c'est-à-dire en impulsions.

Les points délicats de cette fabrication sont d'abord les matières premières : Les paramètres, de la forme $d\varphi/dt$, utilisés en mémoire peuvent être affectés par des constituants à l'état de trace. Une manière vraiment efficace de contrôler la qualité d'une matière première consiste alors à fabriquer quelques tores et à les mesurer par référence aux étalons de production.

On contrôle de la même façon le lot de poudre de ferrite. Le coût de la poudre est négligeable dans le prix de revient du tore trié, il est plus simple et plus sûr de choisir parmi plusieurs lots, en théories identiques, celui donnant le meilleur rendement.

Outre la composition du lot de poudre, la qualité du granulé est d'une importance primordiale. Etant donné la dimension des tores : (un tore de 18 mil cru a une toile de 95 μ et un poids de 57 μg) et la cadence des presses, il est nécessaire que la fluidité du granulé soit aussi grande que possible pour obtenir une dispersion minimum des cotes géométriques.

Enfin, au frittage, la précision relative demandée est

de ± 1 °C pour des températures de cuisson de l'ordre de 1 100 °C. Là encore, le moyen utilisé pour vérifier la constance du frittage est le tore lui-même : des pièces de référence servent à ajuster les conditions de cuisson avant le passage d'un lot complet.

D'autres méthodes de fabrication apparaissent et se substituent partiellement au procédé classique. Elles portent sur les points les plus critiques de la fabrication.

— Au niveau des poudres, les procédés mécaniques de mélange et broyage sont délicats : outre les dérives de composition apportées par l'usure des billes de broyage, la granulométrie est difficile à contrôler, et l'homogénéité du matériau s'en ressent. Des techniques telles que les co-précipitation ou séchage-décomposition de solutions de sels métalliques sont essayées chez presque tous les fabricants.

Actuellement, il ne semble pas qu'elles aient encore débouché industriellement.

— Au niveau de la mise en forme, un nouveau procédé tend à se généraliser : il consiste à préparer à partir de la poudre de ferrite, non plus un granulé, mais un film plastique dans lequel sont découpés ensuite les tores. L'avantage est double : la dispersion des cotes géométriques des tores est considérablement resserrée puisque la seule variable est l'épaisseur du film ; d'autre part, l'usure des outillages de mise en forme est réduite d'environ un facteur dix, puisqu'il n'y a plus compression mais simplement découpe.

— Enfin, au niveau du frittage, les fours classiques à circulation de nacelles céramiques peuvent être remplacés avec d'excellents résultats par des fours à ruban de platine. On peut arriver ainsi à des durées de frittage très courtes : quelques minutes au lieu d'une heure au minimum, ce qui permet un contrôle permanent du matériau et multiplie la capacité de production d'un four.

5. Problèmes posés. — Les problèmes posés par les tores de ferrite sont loin d'être tous résolus. Ils sont de deux ordres : d'une part, la reproductibilité que chaque fabricant aborde de sa façon propre. On peut dire que le plus souvent c'est la solution de facilité qui est choisie. Un matériau présentant des difficultés de reproduction est abandonné au profit d'un matériau, même moins performant, plus aisé à fabriquer.

D'autres problèmes de caractère plus fondamental, liés à la structure du ferrite lui-même, ont été mis en évidence lors de la recherche de matériaux destinés à des mémoires rapides de temps de cycle inférieur ou égal à 650 ns. Il s'agit d'une résonance magnéto-élastique, liée à la magnétostriction du matériau. Sous l'effet d'une impulsion de champ, le tore vibre mécaniquement, à certaines fréquences, ce qui engendre une déformation du cycle et une oscillation parasite, d'une fréquence voisine de 5 MHz. Cette oscillation s'amortit lentement (10 μs) et perturbe le fonctionnement (Fig. 6). Des palliatifs peuvent être utilisés, tels qu'enrobage ou vernissage des nappes de tores, mais ces solutions

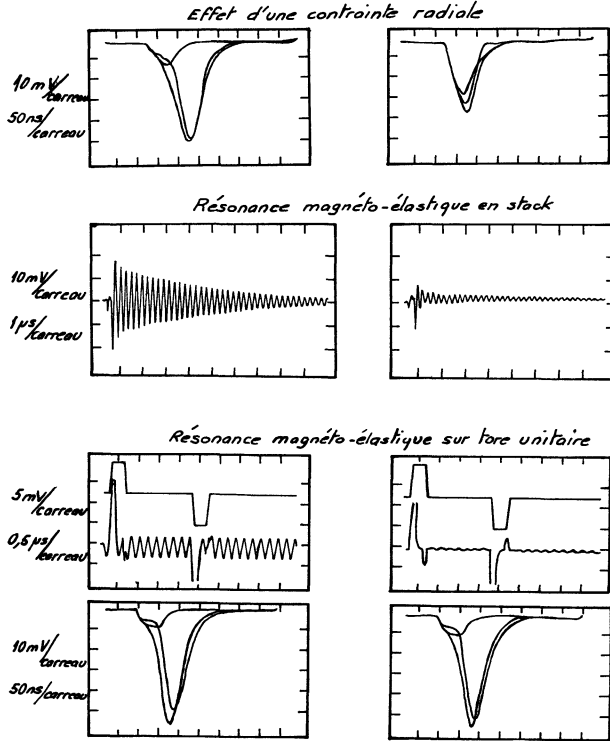


FIG. 6. — Résonance magnétoélastique sur un tore de ferrite de fer-nickel-manganèse.

entraînent d'autres difficultés : couplages entre fils, et réparations pratiquement impossibles.

L'importance de ce phénomène est évidemment variable selon les matériaux, mais on le trouve sur pratiquement tous les tores commercialisés, à de rares exceptions près. Ainsi, des matériaux présentant des performances excellentes, tels que les ferrites de fer-nickel-manganèse doivent être laissés de côté. Le problème qui se pose au fabricant est de parvenir à diminuer la magnétostriction, tout en conservant les qualités de rectangularité du cycle. Les solutions adoptées ne sont que des compromis, et les performances des tores pourraient être poussées beaucoup plus loin si une étude fondamentale, appliquée à ce domaine, pouvait être menée.

Un autre phénomène encore non expliqué apparaît sur certains types de tores subissant des frittages très rapides. Il s'agit d'un « vieillissement » très important des caractéristiques du tore, qui se traduit, à courant constant, par une augmentation de la tension de réponse et une diminution du champ coercitif en fonction du temps. Cette évolution est accélérée en portant les tores à 0 °C. Ainsi, sur la figure 7, on peut voir la variation de réponse I en fonction du temps, d'un tore de ferrite de lithium-nickel-zinc ayant subi un frittage de 12 min à 1 250 °C. Là encore, ce phénomène peut être maîtrisé par des traitements supplémentaires à basse température ; toutefois, il serait intéressant de pouvoir connaître les raisons fondamentales de cette « désaccommodation » positive et ses relations avec les frittages accélérés.

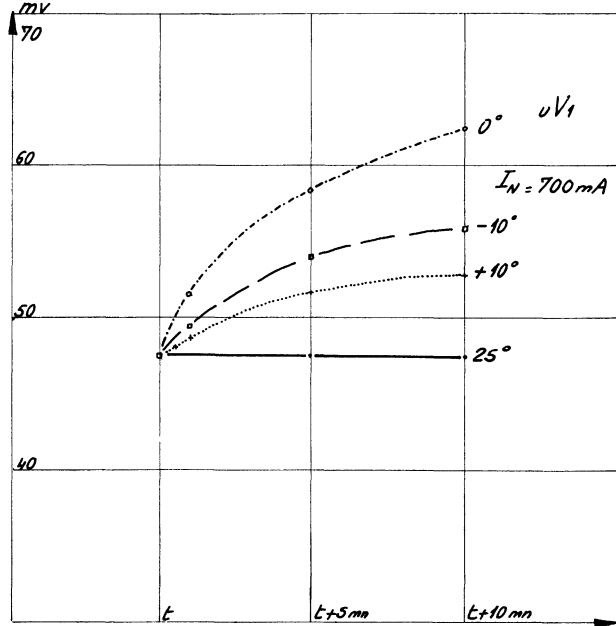


FIG. 7. — « Vieillesse » d'un tore de ferrite de lithium-nickel-zinc en fonction de la température.

6. Evolution actuelle. — Bien que les tores à mémoire aient à faire face à une importante menace de la part des semiconducteurs, les besoins mondiaux pour 1975 étaient récemment estimés à 35 milliards de tores pour 70 milliards de points mémoire. Ces chiffres étaient fondés sur l'apparition du boîtier 4K MOS. Il semble maintenant que les productions de 75 seront encore à l'avantage des tores ; la décroissance en % des besoins pourrait commencer à se faire sentir en 1976. Pour le moment, on assiste à un regain d'activité important pour les tores.

A titre indicatif, les éléments de comparaison entre les tores et les semi-conducteurs seraient les suivants :

Mémoire 4K 18 bits : prix équivalents,

8K 18 bits : en boîtiers 1K, les prix seront encore de 40 % supérieurs à ceux des tores,

en boîtiers 4K (prévus en 1974 pour pré-séries), les prix seraient comparables.

La volatilité des mémoires à semiconducteurs impose l'utilisation de batteries dont le coût compense la différence de prix des alimentations.

Actuellement, on envisage les mêmes performances en mémoires à semiconducteurs qu'en mémoires à tores.

L'évolution des matériaux se produit donc sur le même rythme qu'auparavant. Du point de vue miniaturisation, il semble qu'on soit stabilisé au tore de 0,46 mm (18 mil). La recherche porte donc essentiellement sur les matériaux proprement dits. Deux axes se dessinent :

— D'une part, les exigences de rapidité cèdent le pas aux exigences de consommation. Une nouvelle généra-

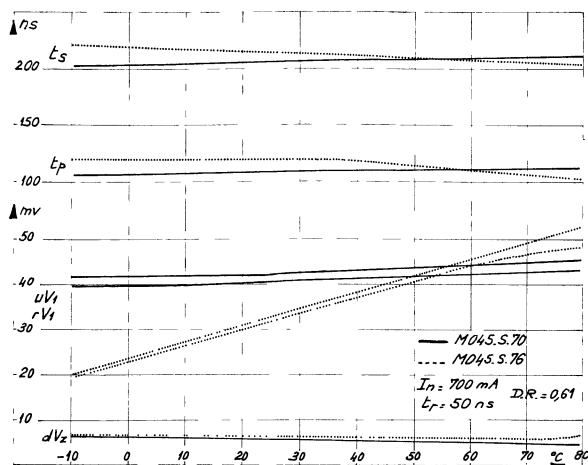


FIG. 8. — Réponses caractéristiques en fonction de la température de tores de 0,45 mm en ferrite de lithium-manganèse-zinc (S 76) et en ferrite de lithium-nickel-zinc-cobalt (S 70).

tion de tores de 18 mil à faibles courants de commande, et coefficient de température moyen voit le jour.

— D'autre part, toujours dans le même but de baisser le prix de revient, apparaissent les tores à coefficient de température nul. Ce sont, pour la plupart, des ferrites de lithium-nickel-zinc-cobalt. On peut ainsi

obtenir des matériaux pratiquement insensibles à la température dans une gamme assez large. Sur la figure 8, sont présentées, dans les mêmes conditions de mesure, les caractéristiques comparées de deux tores de 18 mil.

L'un est un lithium-manganèse-zinc classique (S 76), l'autre un tore lithium-nickel-zinc-cobalt (S 70). Les mémoires fabriquées à partir de tels tores peuvent fonctionner dans une gamme de température de -40° à $+100^\circ$, sans modification des conditions opératoires.

Une utilisation particulière des tores, permettant le stockage, simultané ou non, de plusieurs informations (jusqu'à 8 par exemple) est actuellement en projet chez plusieurs fabricants.

En conclusion, on peut dire que les tores semblent devoir être utilisés encore longtemps : le partage entre les dispositifs à tores et à semiconducteurs est en train de se dessiner, chacun d'eux devant concerner un domaine particulier.

Remerciements. — Nous tenons à remercier les administrations qui nous ont permis d'effectuer ces recherches (D. R. M. E., D. I. et D. G. R. S. T.) ainsi que les laboratoires spécialisés qui nous ont apporté leur concours (CENG-LETI et les laboratoires de THOMSON-CSF).

Bibliographie

- [1] WIJN, H. P. J., GORTER, E. W., ES VELOT, C. J., GELDERMANS, P., « Conditions pour l'obtention de ferrites à boucle d'hystérésis rectangulaire », *Revue Tech. Philips* **16** (1954) n° 5.
- [2] GORTER, E. W., « Some properties of ferrites in connection with their chemistry », *Proc. of the IRE* (1955).
- [3] SMIT, J., WIJN, H. P. J., « Les ferrites », *Bibl. Tech. Philips* (1961).
- [4] OLSEN, E., « Applied magnetism. A study in quantities ». Philips Tech. Library (1966).
- [5] RENWICK, W., « Les mémoires dans les calculateurs numériques » éd. Eyrolles (1967).
- [6] PALMER G. G., JOHNSTON, R. W., SCHULTZ, R. E., « Magnetic properties and associated microstructure of zinc-bearing square-loop ferrites », *J. Ass. Cer. Soc.* **40** (1957) n° 8.
- [7] HO-BIN-IM, WICKHAM, D. G., « Square-loop properties of materials in the system $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Te}_3\text{-MnTe}_2\text{O}_4$ », *J. Appl. Phys.* **35** (1964) 5.
- [8] ARLETT, R. H., SUKOVICH, A. T., TENZER, R. K., WILKEN, A. A. C., « Development of temperature, independent square-loop ferrites », *IEEE Trans. Mag.* (1971).
- [9] HO-BIN-IM, WICKHAM, D. G., « Memory core characteristics of cobalt-substituted lithium ferrite », *IEEE Trans. Mag. MAG-8* (1972) n° 4.
- [10] ECONOMOS, G., « Magnetic ceramics : general methods of magnetic ferrite preparation », *J. Ass. Cer. Soc.* **38** (1955) n° 7.
- [11] LESSOF, H., « Influence of annealing conditions on the pulse and hysteresis properties » 69th meeting of A. C. S. (1967).
- [12] CHOL, G., AURADON, J. P., DAMAY, F., « Influence of the sintering conditions on the densification of Mn-Zn ferrites », *IEEE Trans. Mag. MAG-5* (1969) n° 3.
- [13] GALLACHER, P. K., SCHREY, F., « Preparation and thermal analysis of mixed magnesium-manganese-iron-oxalate and hydrated oxides », *J. Ass. Cer. Soc.* **47** (1964) n° 9.
- [14] KOPPENS, L. J., « Beziehung Zwischen magnetischen Eigenschaften und Mikrostruktur hergestellt wurden » *Ber. DKG* 47 H 10 (1970).
- [15] MICHELI, A. L., « Preparation of lithium ferrite by coprecipitation », *IEEE Trans. Mag. MAG-6* (1970) n° 3.
- [16] KOPPENS, L. J., « Improved ferrite memory cores obtained by a new preparation technique » *Intermag* (1972).
- [17] BOYD, E. L., « Magnetoelastic resonances in ferrite memory cores », *J. Appl. Phys.* **38** (1967) n° 5.
- [18] BOYD, E. L., « Magnetoelastic resonance in ferrite cores », *J. Appl. Phys.* **39** (1968) n° 2.
- [19] O'CONNOR, M., BELSON, H. S., « Magnetostriction of commercial memory cores », *J. Appl. Phys.* **41** (1970) n° 3.
- [20] MILLS, G., « Magnetoelastic resonance characterization of core », *IEEE Trans. Mag. MAG-6* (1970) n° 3.