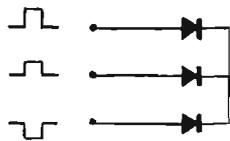


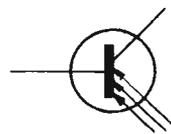
OUI



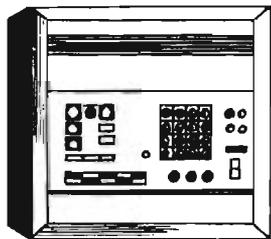
NON

1 + 1 = 10
10 + 10 = 100
1000 - 100 = 100
11 x 11 = 1001

ET



OU



INITIATION AU CALCUL ELECTRONIQUE

L'ORDINATEUR OPTO-ÉLECTRONIQUE

AU mois d'octobre 1970, la Compagnie générale d'électricité présentait, à Marcoussis, ses applications industrielles du laser. Elles sont nombreuses et on sait déjà que cet appareil moderne a trouvé des emplois en météorologie, en médecine, et même à l'usine. De plus, et cela est plus nouveau, la C.G.E. s'intéresse à l'application informatique : mémoire holographique — nous en reparlerons dans un prochain article — et mémoire magnétique à laser.

états stables, le champ magnétique est dirigé de l'avant vers l'arrière, à travers la couche mince, dans l'autre état, le sens du champ magnétique est, à l'opposé, c'est-à-dire d'arrière en avant. Il y a donc des régions dans le film qui, suivant le sens d'orientation du champ magnétique, correspondent à des « 1 » ou à des « 0 » logiques.

Dans une première étape, la couche mince est saturée magnétiquement : toutes les régions sont aimantées dans le même sens. Pour écrire une information binaire, le

faisceau laser est dirigé vers une petite région qui s'échauffe rapidement. A la température de 360 °C — c'est la température de Curie de l'alliage — cette région perd son aimantation. On coupe le faisceau laser ; la région se refroidit. Un champ magnétique extérieur oriente le vecteur champ magnétique dans le sens désiré.

Cette technique est dite à écriture au point de Curie.

L'information stockée est lue en faisant appel à l'effet Faraday : on envoie à travers une région du

film mince un fin pinceau de lumière polarisée ; comme le film est aimanté, il donne une rotation au plan de polarisation du faisceau lumineux, de sorte que la lumière transmise à travers la couche mince est polarisée dans une certaine direction, qui dépend de la nature de l'information stockée dans la couche mince. Il suffit alors d'analyser le faisceau lumineux pour connaître la nature de l'information qu'il transporte.

LUMIÈRE ET AIMANTS

Ce que propose la C.G.E., c'est un enregistrement sur film mince magnétique. La finesse du faisceau laser permet d'échauffer localement la couche magnétique et de faire varier ainsi le champ coercitif. Cette variation s'accompagne à la lecture, d'un changement de polarisation détectable de la lumière incidente. La lecture est non destructive, mais on peut effacer l'information en envoyant un faisceau lumineux « d'effacement ». La capacité d'enregistrement est énorme : 250 000 à 1 000 000 de bits par cm², sur un support étudié en collaboration avec le laboratoire d'électrostatique et de physique des métaux, du C.N.R.S., à Grenoble.

En fait, la C.G.E. n'est pas la première firme à s'attaquer au problème des mémoires optiques de masse. Depuis plusieurs années, Honeywell Inc. travaille sur la mémorisation d'informations binaires dans une couche mince en alliage de manganèse et de bismuth. Ce matériau, déposé en couche mince, peut être aimanté dans une direction perpendiculaire au plan de la couche, suivant deux états stables. Dans chacun de ces états, on observe l'effet magnéto-optique de Faraday. Dans l'un des

MOINS D'UN MILLIONNIÈME DE DEGRÉ...

Si cette technologie paraît séduisante, elle présente cependant quelques revers. Le principal est la nécessité d'utiliser un milieu à fort pouvoir de rotation par effet Faraday. Le bismuth-manganèse répond certes à la question, mais son pouvoir rotatoire n'est que d'un demi-microdegré par centimètre d'épaisseur du film. Pour disposer d'angles de rotation suffisamment grands, l'épaisseur du film doit se mesurer en angström (1 angström vaut un dix-millième de micron : 1 Å = 10⁻¹⁰ m).

A priori, il pourrait sembler que la technique de l'écriture au point de Curie soit une technique lente ; il faut en effet chauffer la matière et la porter à 360 °C. Cependant, on y est arrivé avec des lasers à impulsions dont la durée n'excédait pas 0,1 μs : les régions à chauffer n'ont que 1 ou 2 μ de diamètre et la quantité de chaleur à fournir n'est donc pas tellement importante.

Ces petites régions sont espacées les unes des autres de 5 à 10 μ : la densité d'informations dans une telle mémoire se chiffre entre 1 et 4 millions de bits par cm².

D'autres matériaux ferromagnétiques peuvent être utilisés, et en particulier le sélénium d'Europium et l'oxyde d'Europium. I.B.M.

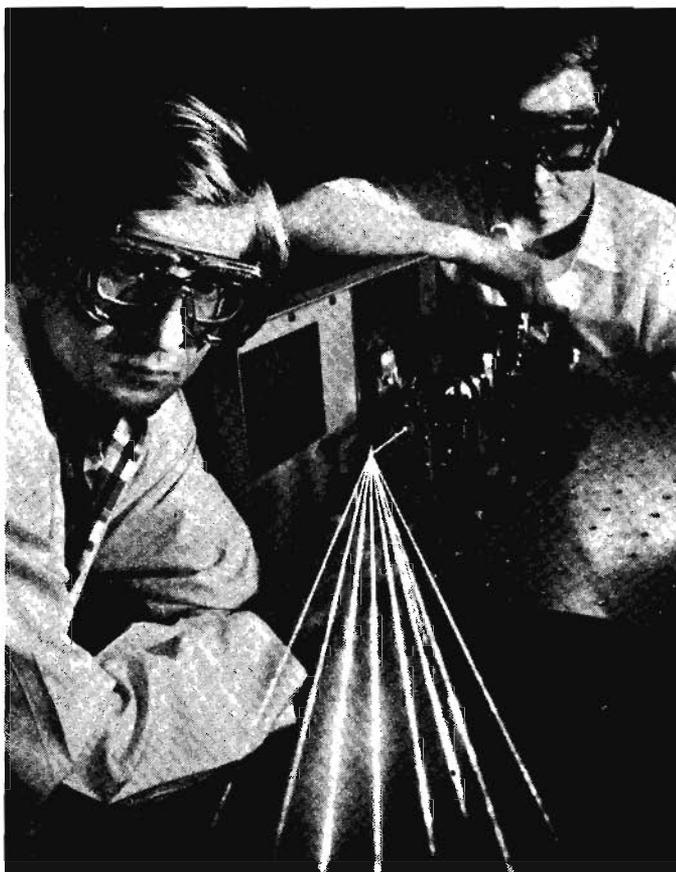


Fig. 1. — Le laser Exciplex émet sur plusieurs longueurs d'onde : c'est un composant des futurs ordinateurs optiques.

a beaucoup travaillé sur des mémoires optiques, fabriquées avec de tels matériaux. Ces matériaux présentent l'intérêt d'avoir de forts effets Faraday ; cependant, leur température de Curie est très basse : 4,2 °K pour le séléniure d'Europium et 60 °K pour l'oxyde. L'ordinateur qui les utiliserait devrait être cryogénique.

D. de Bouard, a décrit, voici moins de deux années, dans le *Journal of Quantum Electronics*, une mémoire multicouches : chaque couche a une température de Curie différente et l'on pourrait ainsi fabriquer des mémoires dont les capacités seraient multipliées par 2, 3, 4... selon le nombre des couches.

MÉMOIRES A GRENAT

Aux Bell Telephone Laboratories et chez Univac, on a pris d'autres chemins pour construire des mémoires opto-électroniques : le grenat de fer-gadolinium, par exemple, constitue l'un de ces chemins. Ce matériau présente certaines propriétés intéressantes, notamment à une certaine température, dite de compensation, voisine de la température ambiante. A cette température, le champ coercitif prend des valeurs de beaucoup supérieures aux valeurs normales.

Les films de ce grenat présentent deux états magnétiques stables, comme le film de bismuth-manganèse. Partant de l'état magnétique saturé, on opère un renversement de l'état magnétique de certaines régions en augmentant légèrement la température et en dépassant la température de compensation, à l'aide d'un faisceau laser. Simultanément, on applique un champ magnétique externe.

Le champ coercitif représente le champ magnétique qui permet de renverser l'aimantation locale, du matériau : l'application d'un champ magnétique externe va toucher exclusivement les régions qui ne sont pas à la température de compensation, les autres régions, à la température de compensation, ayant des valeurs de champ coercitif très élevées.

La plus petite région qu'il soit possible de définir, dans une pastille de grenat de fer-gadolinium, a un diamètre de 100 μ environ : ceci correspond à une densité d'informations égale, environ, à 10 000 bits par cm^2 . On peut obtenir des densités 10 à 20 fois plus élevées en découpant le matériau en petits carrés. Des chercheurs d'I.B.M. ont préparé, par une méthode chimique, ce matériau : le grenat, préparé de la sorte en couche mince, pourrait stocker entre un et deux millions d'informations au centimètre carré ; cependant l'écriture des informations nécessite un champ magnétique plus élevé, ainsi qu'une augmentation de température plus importante.

LES SANDWICHS EN CÉRAMIQUE

Les matériaux ferroélectriques, tout comme les matériaux ferromagnétiques, peuvent présenter deux états stables de polarisation. L'application d'un champ électrique permet de faire passer le matériau d'un état à l'autre ; cette propriété rend possible la réalisation de mémoires altérables en titanate de baryum ou en sulfate de triglycine.

Marquadt Corp., partant de ces principes, a construit le « ferrotron » : il s'agit de deux couches, l'une photoconductrice, l'autre ferroélectrique, positionnées entre deux électrodes ; l'électrode voisine de la couche photoconductrice est transparente. Quand la

sant l'effet électro-optique Faraday : il faudrait alors modifier le sens de polarisation d'un faisceau lumineux traversant la couche mémoire.

Le développement des techniques ferroélectriques est entravé par la préparation, fort difficile, des matériaux ferroélectriques. Cependant des études récentes sur des céramiques électriques polycristallines laissent à penser que ces difficultés pourraient être bientôt levées.

LES MÉMOIRES OPTO-ÉLECTRONIQUES

Toutes les mémoires précédentes sont très rapides et peuvent se prêter à la confection d'importantes mémoires de masse. Néan-

Chaque élément de mémoire opto-électronique est parfaitement isolé de son voisin. Cela signifie que l'écriture et la lecture peuvent s'effectuer simultanément, pas dans le même élément bien entendu. D'où gain de temps et fonctionnement plus rapide de la mémoire.

Pendant que les informations sont lues, des calculs intermédiaires peuvent être effectués à l'aide de masques opaques, de filtres ou de cellules de Kerr (ces cellules deviennent opaques lorsqu'on leur applique une tension électrique). On peut donc appliquer par exemple une fonction de corrélation à l'information qui est lue : ainsi, si l'information enregistrée est une image, l'utilisation de filtres pourrait supprimer le bruit de fond, et donner une image parfaite. On

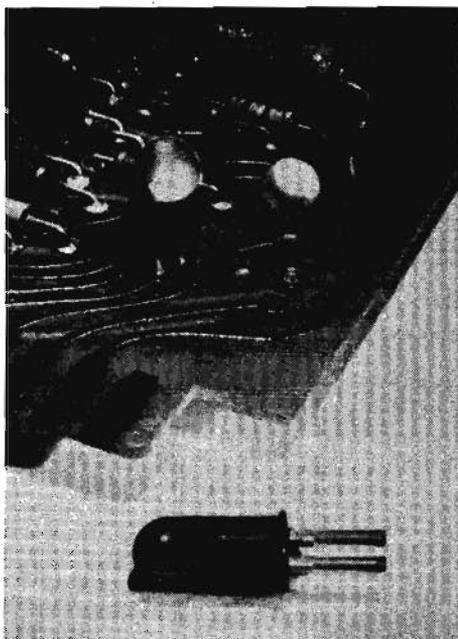


Fig. 2. -- La mémoire Optoélectronique la plus simple : une lampe électroluminescente que l'on associe à un photoconducteur (Cliché Hewlett Packard)

couche photoconductrice n'est pas éclairée, elle empêche le champ électrique appliqué sur les électrodes d'atteindre la couche ferroélectrique. Mais lorsqu'un fin pinceau lumineux tombe sur une région isolée de la couche photoconductrice, la résistivité chute localement et le champ électrique externe atteint la couche ferroélectrique et peut orienter, localement, sa polarisation.

L'information écrite est lue en déchargeant le milieu ferroélectrique lorsque le faisceau lumineux éclaire la région concernée. La direction du courant de décharge donne la direction de polarisation, donc la nature même de l'information enregistrée.

Dans le montage précédent, la lecture est destructive puisqu'on élimine les charges électriques qui ont été stockées. La lecture pourrait être non destructive en utili-

moins, elles ne satisfont pas pleinement l'ingénieur informaticien qui sait pouvoir faire mieux.

Faire mieux : les mémoires opto-électroniques en sont capables. Tout d'abord parce que leur état bistable est purement électrique, il n'y a pas besoin de laser pour lire ou écrire l'information. D'autre part, ces mémoires sont conçues de la même manière que les circuits intégrés : de sorte que des calculs intermédiaires peuvent se faire pendant la lecture : la machine lit et calcule en même temps.

Certes, la mémoire opto-électronique n'est pas encore pour demain : un long chemin reste à parcourir, et le principal reste la conception même des systèmes. Tout est donc à faire... à partir d'études fondamentales entreprises en particulier à la General Electric Co. ou encore aux RCA Laboratories de Princeton.



Fig. 3. -- Voici un laser en semi-conducteur : placé sur une pièce de monnaie américaine, l'élément sensible du laser ne dépasse guère 4 mm de long sur 3/4 mm de large...

peut également prévoir un filtre électronique éliminant tous les éléments de l'image, à l'exception de certains éléments préenregistrés : c'est de la reconnaissance des formes, dont les applications sont très diverses ; cette technique a déjà été employée pour la reconnaissance des empreintes digitales ; elle pourrait servir à la reconnaissance des caractères alphanumériques : l'ordinateur pourrait alors être en mesure de lire n'importe quel texte manuscrit ou imprimé.

Il faut bien comprendre les différences existant entre les mémoires opto-électroniques et les mémoires opto-électroniques, telles celles décrites plus haut. Les premières contiennent des éléments électroluminescents bistables, chacun d'entre eux pouvant être commandé séparément. Chaque bit opto-électronique doit donc avoir un accès direct aux circuits externes.

Dans ces conditions, l'opto-électronique convient bien à la réalisation de petites mémoires très rapides, du genre scratchpads (bloc-notes).

Les mémoires opto-électroniques (ou électro-optiques), au contraire, nécessitent un support intermédiaire, une sorte de masque qui transmet — ou non — un faisceau lumineux. Ces masques peuvent être importants et conviennent parfaitement à la fabrication de mémoires de masse.

LES COMPOSANTS OPTO-ÉLECTRONIQUES

Plusieurs composants ou associations de composants permettent de fabriquer les mémoires opto-électroniques ; l'association la plus simple est celle du photoconducteur et de la lampe au néon. Une autre association est la cellule électroluminescente avec un photoconducteur. Ces deux associations sont des circuits série avec boucle de réaction optique pour en faire des bistables.

Ces circuits « primaires » certes, ne ressemblent en rien aux circuits intégrés opto-électroniques : ceux-ci, beaucoup plus petits, sont le résultat de l'association d'un flip-flop et d'une diode électroluminescente. La mémoire est constituée par le flip-flop, tandis que la diode ne sert qu'à communiquer directement avec l'extérieur. General Electric a mis à l'étude une bascule électroluminescente unique en son genre. Elle contient une couche de matériau semi-isolant entre deux régions respectivement de type *p* et *n*. La résistivité du matériau — entre 10^5 et $10^6 \Omega/\text{cm}$ — est considérablement plus élevée que celle des semi-conducteurs usuels (leur résistivité s'échelonne entre 0,01 et $1 \Omega/\text{cm}$).

La bascule électroluminescente conserve l'un des deux états stables (haute ou basse impédance) tant qu'elle ne reçoit pas une impulsion qui modifie temporairement son point de fonctionnement et la fait passer dans l'autre état (Fig. 1). Dans l'état « basse impédance » — état conducteur —, la bascule émet un rayonnement lumineux, caractéristique de la largeur de sa bande interdite (dans le modèle des bandes pour les solides). Ainsi, avec une bascule en arséniure de Gallium, ce rayonnement se produit au voisinage d'une longueur d'onde égale à $8\ 880 \text{ \AA}$.

Une telle bascule opto-électronique, pour être utilisée dans une mémoire industrialisable, doit être intégrée dans un circuit à haute densité — genre circuit LSI —. On doit lui associer une cellule photosensible — photoconducteur, photodiode ou phototransistor — pour lire l'état dans lequel se trouve un élément de la mémoire.

LASERS SEMI-CONDUCTEURS POUR ORDINATEURS OPTIQUES

C'est en 1962 que l'on entendit parler pour la première fois de lasers en semi-conducteur. De tels lasers furent mis au point simultanément chez General Electric, chez I.B.M. et aux Lincoln Laboratories (photos 3). Dans les années suivantes, la RCA fut l'une des compagnies qui cherchèrent à abaisser le courant de seuil — c'est-à-dire le courant déclenchant

verre, cent fois plus fins que les cheveux humains — déposées en couches minces. Ces fibres optiques peuvent conduire la lumière comme un câble conduit l'électricité : on peut donc dès à présent concevoir l'existence d'une nouvelle classe de mémoires optiques où les circuits actifs seraient des lasers, disposés en mosaïque sur des circuits de type circuits intégrés LSI, et où les câbles seraient des micro-fibres optiques.

A cette classe pourrait s'ajouter une nouvelle catégorie de composants opto-électroniques, capables

européen d'ordinateurs. C'est également la première firme européenne à avoir présenté une mémoire opto-électronique de masse originale. Le prototype est une mémoire à lecture seulement capable de stocker 65 536 mots de 69 bits chacun. Cette mémoire comporte un tube cathodique, un objectif de réduction, un « tunnel à miroirs », un objectif de projection et un ensemble de cellules photo-électroniques. Les informations sont mémorisées sous la forme de surfaces blanches et noires sur une plaque photographique circulaire, en verre, de 25 cm de diamètre.

Un spot lumineux apparaissant sur l'écran du tube cathodique est concentré par l'objectif de réduction dans le plan de l'ouverture du tunnel à miroirs. Ce tunnel est composé de 4 miroirs disposés en carré, les surfaces réfléchissantes dirigées vers l'intérieur. Ce tunnel produit un réseau de points lumineux à partir du spot produit par le tube cathodique — comme le ferait un kaléidoscope —. A la sortie du tunnel, le réseau est concentré sur une plaque photographique par l'objectif de projection : l'image ainsi obtenue à partir du spot du tube cathodique se compose de 69 points lumineux.

Si la position du spot sur l'écran est modifiée, la position de tous les points lumineux sur la plaque est également modifiée. Comme le spot lumineux peut prendre 256 positions en largeur et 256 positions en hauteur, le nombre de positions possibles est donc de 65 536 (soit 256×256).

La plaque photographique ainsi éclairée par 69 petits points se compose de taches noires ou claires laissant — ou non — passer la lumière. Derrière la plaque photographique se trouvent des détecteurs photoélectroniques qui lisent l'information, c'est-à-dire qui détectent le passage ou l'arrêt des 69 points lumineux.

Il est bien évident que la préparation d'une plaque photographique demande beaucoup de temps et on est amené à utiliser un ordinateur pour effectuer l'enregistrement. Mais une fois la première plaque photographique produite, il sera aisé d'en tirer un grand nombre de copies par les techniques photographiques classiques. De plus, les plaques photographiques sont rapidement interchangeables. L'ordinateur qui utilisera cette mémoire optique pourra donc être un mini-ordinateur et il suffira de changer de plaque photographique-mémoire pour l'utiliser en outil de gestion, en outil de calculs scientifiques ou de calculs statistiques.

Cet ordinateur, petit, puissant, une fois produit industriellement, pourrait être également bon marché. « Petit, puissant et bon marché... voilà l'ordinateur des années 80 !

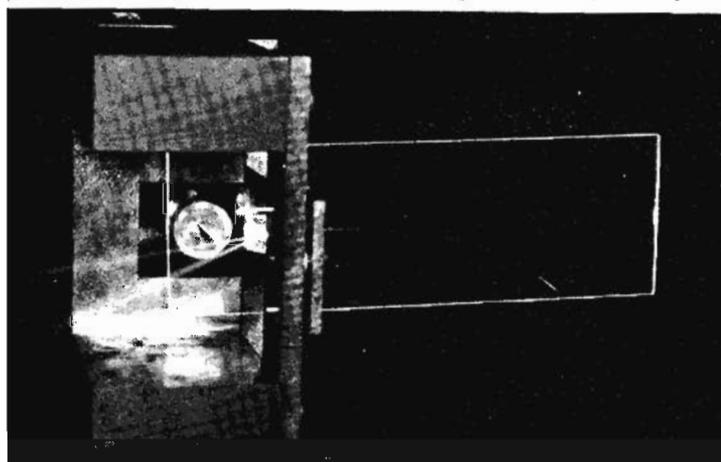


Fig. 4. — Le début des circuits intégrés optiques grâce à cette fibre optique déposée en couches minces (Cliché Bell Tel. Lab.)

l'effet laser —. En 1968, le courant de seuil le plus bas jamais atteint alors était encore de $20\ 000 \text{ A/cm}^2$. C'était un progrès — les premiers lasers semi-conducteurs nécessitaient 5 fois plus de courant — mais c'était encore trop. En 1969, RCA annonçait $8\ 000 \text{ A/cm}^2$, tandis qu'en U.R.S.S., Zh. I. Alferov, du Ioffe Institute de Leningrad atteignait $4\ 300 \text{ A/cm}^2$.

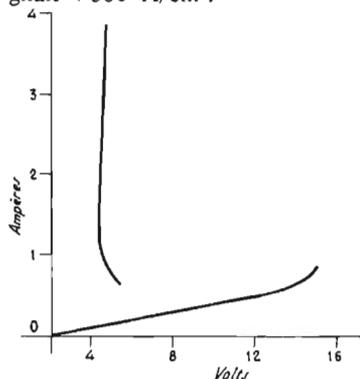


Fig. 1. — Caractéristiques courant-tension d'une bascule électronique G.E.

Tout récemment (il y a environ cinq mois de cela), deux chercheurs des Bell Telephone Laboratories descendirent le seuil de l'effet laser à $1\ 000 \text{ A/cm}^2$. Pratiquement, ce résultat signifie que le matériau s'échauffe beaucoup moins et qu'il n'est guère utile de le plonger dans un milieu cryogénique comme on le faisait autrefois.

Ajoutez à cette réalisation, l'annonce, en février 1970, de la réalisation de fibres optiques minuscules — ce sont de fins rubans de

de jouer un rôle d'amplificateur ou d'oscillateur. L'idée de base de tels composants est l'association de deux lasers semi-conducteurs, le premier jouant le rôle d'oscillateur et le second d'amplificateur. Ces deux lasers sont couplés optiquement, par exemple en les plaçant très près l'un de l'autre, comme le firent Kosonocky et Cornely. En associant plusieurs composants semblables à ceux de Kosonocky et Cornely, on pourrait fabriquer une série de circuits logiques ET, OU, NI, c'est-à-dire les composants de base de futurs ordinateurs optiques.

On pourrait également trouver une application en informatique au laser « Exciplex », fabriqué aux Bell Telephone Laboratories par Dienes, Shank et Trozzolo. Ce laser présente la particularité de pouvoir être « accordé » et de changer de couleurs. En supposant pouvoir miniaturiser à l'extrême un tel laser, on peut alors très bien concevoir une mémoire d'ordinateur où une série d'informations est représentée par une couleur, et un autre série d'informations par d'autres couleurs. On pourrait alors économiser un grand nombre de composants et, par là, rendre cette mémoire plus dense et plus rapide.

LA MÉMOIRE OPTIQUE VUE PAR I.C.L.

International Computers Ltd (I.C.L.) est le premier producteur

Marc FERRETTI.