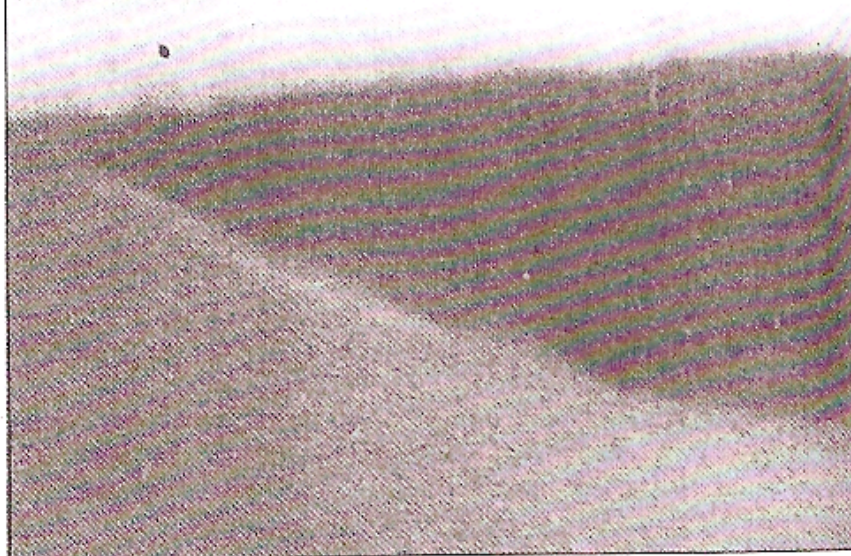
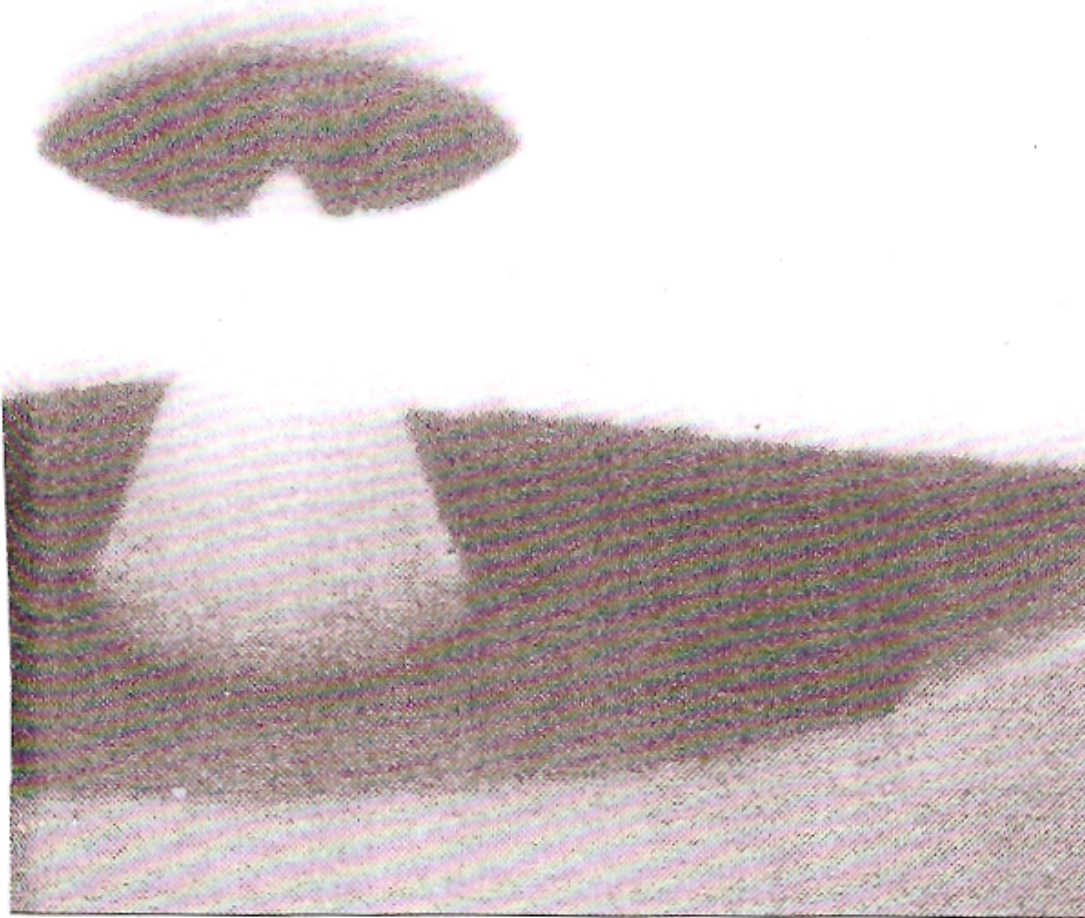


LES MICROTRIODES

Jean-Paul Biberian



Dans cette même rubrique du numéro précédent, nous vous avons communiqué les premiers éléments dont nous disposions concernant cette nouvelle technologie que sont les micro-triodes. Suite à leur parution, nous avons eu le grand plaisir d'être contactés par Jean-Paul Biberian qui était l'un des participants français à la première Conférence Internationale sur la Micro-Electronique à Vide. Nous lui avons demandé de faire le point sur l'état des recherches dans cette nouvelle technologie. Certes, ces nouveaux développements ne sont pas spécifiquement destinés à l'audio mais n'est-il pas sympathique de retrouver ces chères lampes même si le côté magique de leur tube et de leur filament a disparu... Nous lui laissons la parole



A la base des microtubes, la pointe de C. Spindt (SRI) joue le rôle de la cathode. Ici, elle est grossie 60 000 fois. Pour imaginer l'incroyable miniaturisation, il y a le même ordre de grandeur entre ces microtubes et un tube classique qu'entre un tube Classique et trois tours Eiffel empilés ...!

Par un de ces surprenants retournements de l'histoire, un objet qui nous semblait complètement obsolète est en train de revenir sur la scène de la Haute Technologie. En effet, en juin 1988 a eu lieu à Williamsburg en Virginie aux Etats-Unis la première Conférence Internationale sur la Micro-Electronique à Vide. Cette conférence traitait des micro-tubes électroniques à vide ! D'ailleurs, la conférence avait comme sous-titre « Back to the Future » c'est-à-dire « Retour vers le Futur ». Une centaine de scientifiques vinrent participer aux trois journées passionnantes, à la grande surprise des organisateurs : Henry Gray du Naval Research Center de Washington et Charles Spindt du célèbre Stanford Research Institute. L'assistance était très internationale avec des représentants de la plupart des pays engagés dans la course à la haute technologie. A côté des Américains, il y avait une représentation européenne, dont plusieurs Français, des Japonais, surtout observateurs et même des Soviétiques qui firent plusieurs exposés. Le succès a été tel que cette année aura lieu la deuxième conférence du 24 au 26 juillet à Bath en Grande-Bretagne.

Avant d'aller plus loin dans les applications de cette nouvelle technologie, il est intéressant de faire un historique qui nous a conduit des tubes à vide... aux tubes à vide en passant par le transistor !

Historique

A l'époque où tube à vide et transistor coexistaient, avant l'invention des circuits intégrés, certains scientifiques ont voulu créer de l'électronique intégrée, principalement pour des applications militaires. Des projets ont été poursuivis dans lesquels les triodes à vide avaient des tailles à l'échelle du micron. Il faut savoir qu'au début des années soixante, il n'existait pas d'équipement permettant de fabriquer des motifs à de telles échelles, et ainsi des astuces ont dû être découvertes pour les réaliser.

Avec l'avènement du circuit intégré, la quasi totalité de ces efforts ont été arrêtés. Seuls quelques irréductibles ont continué dans l'indifférence générale.

Cependant, on s'est aperçu que dans certaines situations, les tubes à vide sont sans concurrence : par exemple, hormis l'audio, un des problèmes les plus importants dans les applications militaires est celui du durcissement des circuits vis à vis des radiations de toutes sortes et plus spécialement des ondes électromagnétiques résultant d'une explosion nucléaire. Les transistors et circuits intégrés sont difficilement protégeables. Également un autre problème est le fonctionnement des circuits intégrés à haute température. En effet, les transistors qui sont la base des circuits intégrés contiennent des zones dopées qui peuvent diffuser rapidement d'une région à l'autre du transistor lorsque la température est élevée. D'autre part, on n'a toujours pas réussi à fabriquer avec des semi-conducteurs des amplificateurs de puissance à haute fréquence. Les satellites de télécom-

munication comme TDF 1 sont munis de tubes à ondes progressives, dont le fonctionnement est délicat et consommateur d'énergie.

Toutes ces raisons plus quelques applications nouvelles découlant des travaux réalisés pour les micro-tubes à vide ont, en quelques années, créé un mouvement mondial.

Avant d'aller plus avant, nous allons voir le fonctionnement d'un tube à vide de type triode traditionnel, puis celui des micro tubes à vide.

Les triodes

Un tube à vide traditionnel se compose pour les triodes : d'une cathode, d'une anode et d'une grille, voir figure 1. La cathode est chauffée par effet Joule, c'est-à-dire par passage d'un courant électrique. Le chauffage de la cathode permet l'extraction facile des électrons en appliquant une tension entre la cathode et l'anode. Ce courant d'électrons dépend de nombreux facteurs, en particulier de la température de la cathode et de la tension appliquée entre l'anode et la cathode. Un tel système sans grille constitue une diode à vide qui permet le passage d'électrons dans un seul sens et donc de courant dans le sens inverse. L'adjonction de la grille permet de moduler ce courant en appliquant une tension variable. Les triodes et leurs dérivés, tétrodes et pentodes ont été longtemps utilisés comme dispositif amplificateur dans de nombreux domaines de l'électronique. Un des inconvénients de cette technologie est d'une part qu'elle est difficilement miniaturisable et d'autre part consommatrice d'énergie, fragile et de durée de vie limitée à cause de l'usure des filaments. Sauf dans des cas très particuliers (audio de haut de gamme entre autre), on ne les utilise plus. Le transistor et les circuits intégrés les ont complètement supplantés.

L'effet de champ

Nous venons de voir que les triodes à vide comportaient des cathodes chaudes pour l'émission des électrons. Il existe une autre alternative pour émettre des électrons, c'est "l'effet de champ". Ce mécanisme est connu depuis de nombreuses années, et remonte en fait aux expériences de Benjamin Franklin sur les paratonnerres. Il apparaît que l'émission ou la réception d'électrons par la surface d'un matériau est d'autant plus facile, c'est-à-dire se fait avec une tension électrique d'autant plus faible que le rayon de courbure de la surface est petit. Pour fonctionner, un paratonnerre doit avoir une pointe très effilée correspondant à un très petit rayon de courbure. Inversement, si on applique une tension électrique entre une pointe et une plaque métallique, les électrons sont émis à partir de la pointe sans nécessité de chauffage de celle-ci, comme le montre la figure 2.

L'application des pointes à émission de champ pour la fabrication de triodes ne s'est jamais réalisée pour plusieurs raisons : tout d'abord, les pointes doivent avoir un rayon de courbure inférieur au dixième de micron, ce qui ne rend pas leur réalisation aisée, et par ailleurs le courant émis s'il dépend du rayon de courbure, dépend également du matériau présent en surface, et ce à l'échelle atomique. Les pointes à émission de champ sont très sensibles à ce que les physiciens du solide appellent le travail de sortie et qui représente la différence de potentiel nécessaire pour extraire un électron du matériau et l'amener au niveau du vide. Ce travail de sortie varie fortement avec le matériau présent en surface. C'est d'ailleurs pour cela que certaines cathodes sont recouvertes d'oxyde de baryum ou de césium par exemple. Or, la surface de la pointe

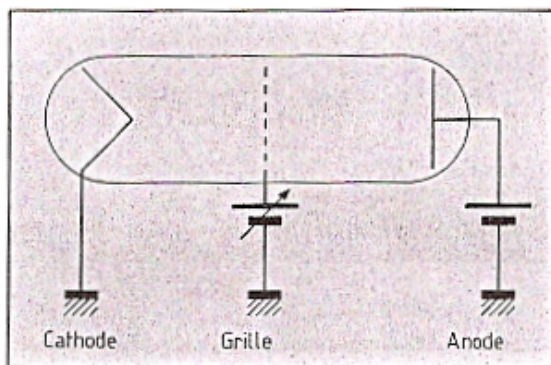


Fig. 1 : Schéma de principe d'une triode.

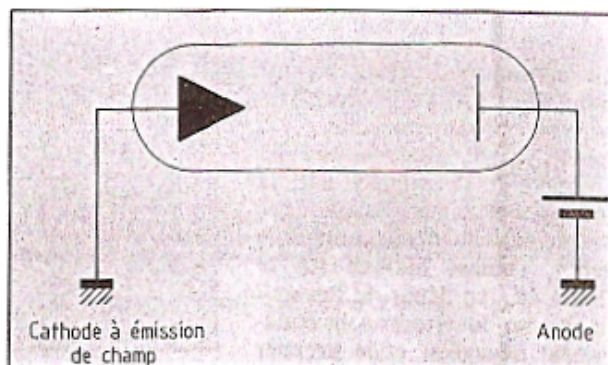


Fig. 2 : Fonctionnement d'une pointe à émission de champ.

évolue avec le temps. Il est intéressant de savoir qu'à une pression égale à un milliardième de la pression atmosphérique une surface se recouvre d'une monocouche de gaz en une seconde ! Il est donc évident que le matériau de la pointe peut évoluer et les caractéristiques de celle-ci varier.

Il n'est donc pas étonnant que les pointes à émission de champ soient d'un emploi restreint. En fait, à part le paratonnerre, on peut citer l'utilisation de pointes comme microscope à effet de champ, inventé dans les années 50 par le professeur Muller en Allemagne, qui permet de "voir" directement les atomes, en faisant un agrandissement de la pointe. Les pointes sont utilisées dans les microscopes électroniques à haute résolution comme source d'électrons brillante et de faible dimension. Récemment, deux chercheurs d'IBM Zurich ont reçu le prix Nobel de Physique pour leur invention d'un microscope à effet tunnel à balayage utilisant le courant qui passe entre une pointe et une surface comme sonde de distance à l'échelle atomique ; en balayant la pointe, ils obtiennent une cartographie à l'échelle atomique de la surface.

Finalement, on s'aperçoit que les pointes à émission de champ sont utilisées dans des domaines très restreints. Un des problèmes étant que ces pointes sont fabri-

quées à partir d'un fil métallique rendu pointu par des méthodes électrochimiques. Leur utilisation nécessitant un environnement de vide égal à un millième de milliardième de la pression atmosphérique ! Soit tout de même mille fois moins que la pression régnant dans un tube électronique traditionnel ou un tube de télévision.

Les micropointes à émission de champ

A la fin des années 50 et au début des années 60, plusieurs équipes de part le monde ont essayé de faire des micropointes. En effet, des micropointes en grande quantité peuvent servir de cathode froide à fort courant. Les applications allant de l'électronique intégrée à la propulsion spatiale. L'équipe qui eut le meilleur succès fut celle du Stanford Research Institut, un centre de recherche indépendant

sous programme. Charles Spindt, de l'équipe du Dr Ivor Brodie, a réussi à fabriquer par des techniques de microlithographie des pointes et des grilles intégrées avec des dimensions inférieures au micron, à l'époque où la microélectronique était loin d'atteindre de telles performances. Pour cela, ils ont dû développer des techniques très originales, qui valent la peine d'être décrites.

Le matériau de départ est une plaquette de silicium préalablement recouverte d'une couche d'un micron d'épaisseur d'oxyde de silicium (du verre) isolant, puis d'une couche métallique. Après une technique de masquage classique, d'insolation, de révélation et de gravure sélective, la plaquette se trouve comme indiqué dans la figure 3a. La difficulté consiste à déposer des pointes à l'intérieur des trous qui font un micron de diamètre.

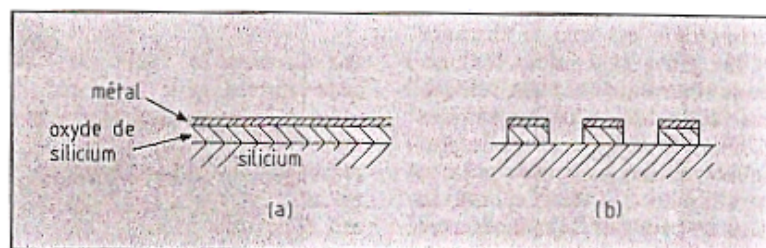


Fig. 3 : Premières étapes de la fabrication des micro-pointes.

Pour résoudre ce problème, C. Spindt a utilisé une technique d'évaporation de deux métaux simultanément. Le premier évaporateur est perpendiculaire à la surface, tandis que le second fait un angle de 15° environ avec la surface. Par ailleurs, la plaquette tourne sur elle-même pendant le dépôt, comme indiqué sur la figure 4a. Au début de l'évaporation, les ouvertures sont entièrement dégagées, et le premier évaporateur dépose le métal au fond des trous. Simultanément, le deuxième évaporateur dépose du métal à l'orifice et petit à petit le referme, figure 4b. Au fur et à mesure que l'orifice se referme, la surface recouverte par le premier évaporateur décroît, et le dépôt forme une pointe. Lorsque l'orifice est entièrement bouché, figure 4c, la pointe est constituée. Il ne reste plus qu'à enlever par une attaque chimique appropriée le métal déposé par le deuxième évaporateur. On se trouve alors avec la configuration de la figure 4d, c'est-à-dire avec des pointes métalliques centrées dans leur logement et ayant chacune une grille parfaitement positionnée avec une précision d'une fraction de micron !

C'est avec cette technologie que C. Spindt a réussi à fabriquer des cathodes froides comprenant plusieurs milliers de pointes, séparées les unes des autres de 12 microns. Certaines fonctionnent sans interruption depuis plus de quinze ans ! La figure 5 montre un tel ensemble de micro pointes.

Un point intéressant de cette technologie est que la distance pointe grille étant faible, les électrons sont émis avec une tension très faible de l'ordre de quelques dizaines de volts, au lieu de plusieurs milliers avec les pointes métalliques, car dans ce cas, la grille ne peut pas être placée avec précision près de la pointe.

Comment se fait-il que ces sources puissent avoir une telle durée de vie, alors que nous

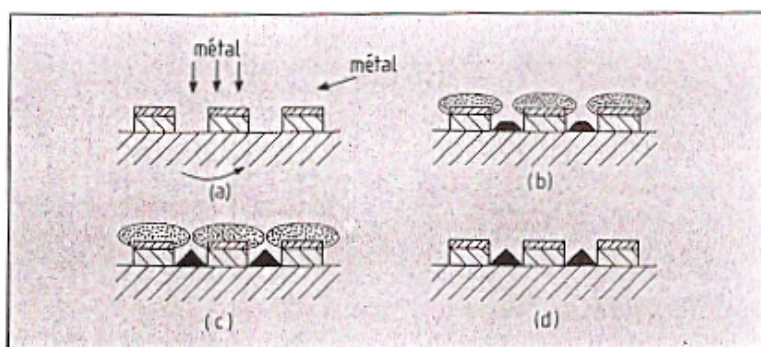


Fig. 4 : Fabrication des micro-pointes.

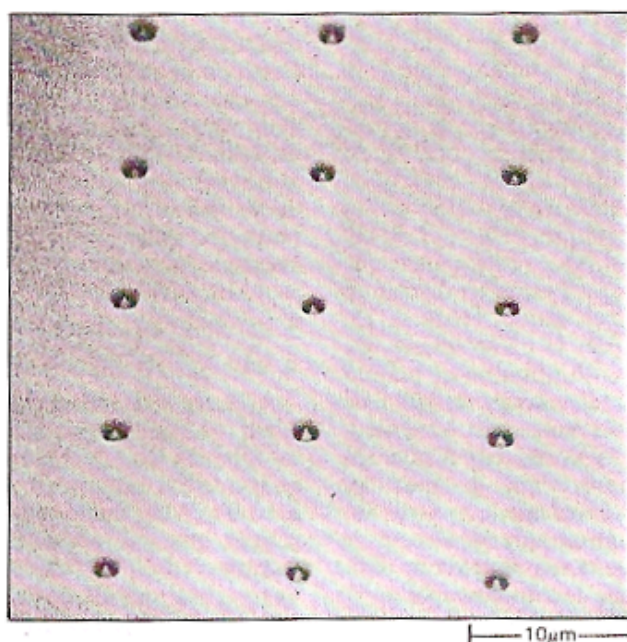


Fig. 5 : Ensemble de pointes réalisées par C. Spindt et vue de détail d'une pointe (sa base a un diamètre de $1 \mu\text{m}$!) et de la grille.

avons vu qu'il fallait un vide draconien pour assurer leur fonctionnement ?

En fait, ces cathodes ne devraient pas fonctionner si on utilisait les critères décrits plus haut de rayon de courbure, car de toute évidence, le leur est très grand. Des mesures de courant en fonction de la tension appliquée sur la grille d'extraction ont permis de déterminer la courbure effective de la partie de la pointe émettrice d'électrons. Il s'est avéré que son rayon était voisin des dimensions d'un atome ! Ceci indique que ce n'est pas la pointe globalement qui émet les électrons, mais des aspérités atomiques présentes à la surface. Par conséquent, la source réelle des électrons peut très bien varier au cours du temps, mais globalement, il y a toujours émission. Le fait d'utiliser une grande quantité de points moyenne le courant global et le rend stable. Cette découverte est primordiale dans le développement des cathodes froides.

Depuis d'autres techniques ont été développées, en particulier par Henry Gray du Naval Research Laboratory à Washington D.C., qui utilise les techniques modernes de gravure du silicium, mais les pointes de Spindt restent les plus intéressantes, en particulier elles ne nécessitent pas obligatoirement l'utilisation d'un substrat de silicium, qu'il n'emploie que par commodité.

Les microtriodes

Une des applications les plus évidentes de ces micropointes est la réalisation de microtriodes. La figure 6 donne deux possibilités parmi d'autres de réaliser ces dispositifs. La figure 6a montre une structure linéaire, et la figure 6b un modèle planaire.

Dans le mode linéaire, la pointe est évidemment la cathode, la grille est directement au-dessus et l'anode est située dessus cette dernière. Dans la

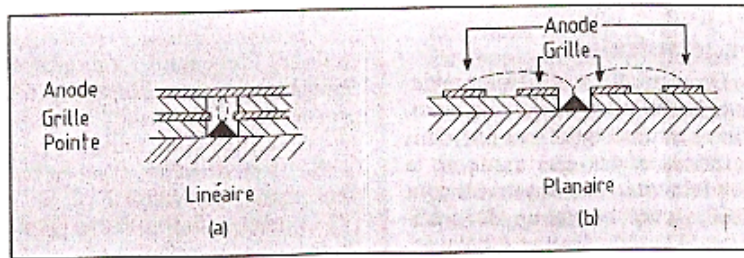


Fig. 6 : Deux modes de réalisation possible de micro-triodes.

conception planaire par contre, l'anode est sur la même surface que la grille, ce qui fait que les électrons émis par la pointe doivent monter et descendre par dessus la grille. On n'est d'ailleurs pas obligé de garder la symétrie cylindrique de la structure linéaire. On pourrait avoir des lignes au lieu de pointes, avec une forme de toit. Grille et anode seraient alors des lignes au lieu de cercles. La figure 7 donne une vue d'un tel système.

Les avantages de ces micro-triodes sont de plusieurs ordres :

a) Amplificateurs à gain élevé et fréquence élevée.

En effet, ce qui limite la fréquence de coupure (fréquence maximale admissible) d'un transistor de quelque nature que ce soit, c'est le temps que mettent les électrons pour traverser la grille du transistor. Ce temps est d'autant plus court que la grille est étroite, et que la mobilité des électrons est grande.

Actuellement, on arrive à fabriquer des transistors silicium avec des grilles inférieures au

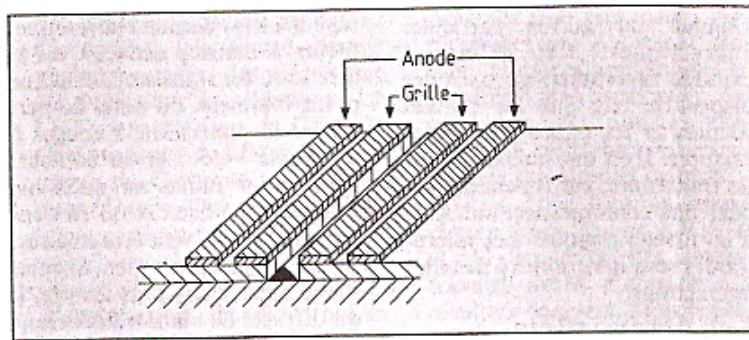


Fig. 7 : Structure de diode avec cathode en forme de toit.

micron. Mais la mobilité des électrons est plus grande avec l'arséniure de gallium. De toute manière, les électrons se déplacent dans un matériau solide et les collisions avec les atomes du réseau limitent la mobilité des électrons. Dans le vide, il n'y a plus de telles collisions, et les électrons se déplacent sans frottement. On pourrait comparer

cela à la chute des corps dans l'air et dans le vide. Dans l'air, le frottement limite la chute des corps à une vitesse maximale, dans le vide il n'y a pas de vitesse maximale. En pratique, on envisage des amplificateurs pouvant fonctionner à plus de 1000 GHz ! Ce qui est au moins 10 fois plus qu'avec les circuits à l'arséniure de gallium.

b) Bonne tenue en température.

Dans un élément semiconducteur, ce sont les impuretés introduites dans le matériau pur dans certaines zones qui assurent la conductivité. Ces impuretés sont dosées avec beaucoup de précision. Si la température est élevée, l'agitation thermique fait diffuser les impuretés des zones à forte concentration vers celles à faible concentration. Il n'y a plus de barrière entre régions dopées différemment, et le circuit est hors d'usage. Ici par contre, les matériaux utilisés sont de composition bien définie, cet effet n'existe pas.

c) Bonne tenue aux radiations.

Les éléments semiconducteurs fonctionnent par création de paires électrons-trous qui se déplacent sous l'effet du champ électrique. Malheureusement, de telles paires peuvent se créer par interaction d'ondes électromagnétiques indésirées, rayons X, Gamma ou autres particules énergétiques. Cet effet est exploité favorablement dans des dispositifs tels que les cellules solaires et les photo-diodes par exemple. Il est une nuisance dans les transistors, car il peut provoquer une commutation indésirée d'un niveau logique. Les microtriodes sont insensibles à de telles interactions.

Les écrans plats

Depuis 20 ans, nous savons que dans 3 ou 5 ans, les écrans plats seront une réalité, que nous n'aurons plus ce meuble monstrueux qui gâche notre salon. Nous accrocherons au mur ce qui ressemblera à un cadre, et l'image apparaîtra avec la résolution d'un écran de cinéma, et la luminosité d'un tube cathodique ! Peut-être dira-t-on toujours cela dans 20 ans ! Il est difficile de savoir. Certes, depuis quelques années, principalement

les Japonais, commercialisent des petits téléviseurs portatifs couleurs, et nous annoncent régulièrement la réalisation de prototypes de grandes dimensions. Mais ce n'est toujours pas la télévision de salon, et on en est loin encore. Pourquoi ?

Les techniques utilisées sont en fait soit les écrans à plasmas, soit à cristaux liquides. Le premier a l'avantage de la luminosité, car se sont des électrons créés dans un plasma qui sont accélérés et produisent sur l'écran fluorescent un point lumineux comme dans un tube cathodique classique. Il ont donc une bonne visibilité sans éclairage externe, et à tous les angles. Mais il est difficile de produire des niveaux de gris, car le plasma est soit allumé, soit éteint, un peu comme dans un tube néon, où on ne peut pas mettre un atténuateur d'intensité. C'est pour cela que les écrans plasma sont principalement utilisés en informatique, au moins quand on ne désire pas visualiser des images.

Les cristaux liquides ont l'avantage avec les derniers développements à matrice active, c'est-à-dire avec un transistor à chaque point lumineux ou pixel de permettre la réalisation d'images à la vitesse vidéo, et en couleur. Leur point faible est qu'ils ne sont pas lumineux et qu'en conséquence ils doivent être éclairés. Ils sont également peu visibles sur le côté. Dans tous les cas, il est difficile de réaliser des écrans de grandes dimensions, car le rendement de fabrication chute très vite avec la taille des écrans. Ceci est dû au fait que le moindre défaut crée un point noir sur l'écran : le taux de défauts admissibles est très faible. Un autre problème est la connectique. Les écrans de télévision haute résolution de l'avenir auront au moins 1100 lignes et 1500 colonnes, ce qui veut dire pour un écran couleur, la liaison de près de 5000 fils ! Si un fil manque, il apparaîtra une ligne

ou une colonne noire, ce qui est inacceptable.

Dans un tube cathodique classique, un faisceau d'électrons produit dans un canon à électrons balaye la surface de l'écran fluorescent. L'intensité du faisceau est modulée, ce qui produit des points lumineux d'intensité variable. Il est tentant de remplacer ce système par un ensemble de micros canons à électrons, avec un ou plusieurs canons par point lumineux. On peut donc fabriquer un écran plat dans lequel il y aurait un ensemble de micro pointes avec leurs grilles associées. L'adressage pourrait se faire par un système matriciel ligne-colonne, les pointes étant par exemple reliées en ligne et les grilles en colonne. L'intensité pourrait être modulée en faisant varier la tension sur l'écran. Pour obtenir des images couleur, il suffirait de tripler le nombre de lignes ou de colonnes, et de mettre un écran avec des bandes fluorescentes alternativement rouges, vertes et bleues. La figure 8 montre un éclaté d'une telle structure.

Ce système d'écran de visualisation présente un certain nombre d'avantages : il est lumineux comme un tube cathodique traditionnel. Il possède une excellente résolution spatiale puisque les pointes ne font qu'un micron de diamètre, et que même un ensemble de plusieurs pointes sera de très petite dimension. Il utilise pour sa fabrication des techniques classiques de microélectronique. Par contre, le problème de la connectique n'est pas résolu. Il faut toujours autant de fils !

Une autre solution est possible en prenant avantage de la nature de cet écran. Il s'agit de l'adressage série au lieu de parallèle comme indiqué ci-dessus. Imaginons que chaque pointe soit placée sur un petit condensateur, et que chaque condensateur soit relié au précédent par un dispositif de transfert de charge que

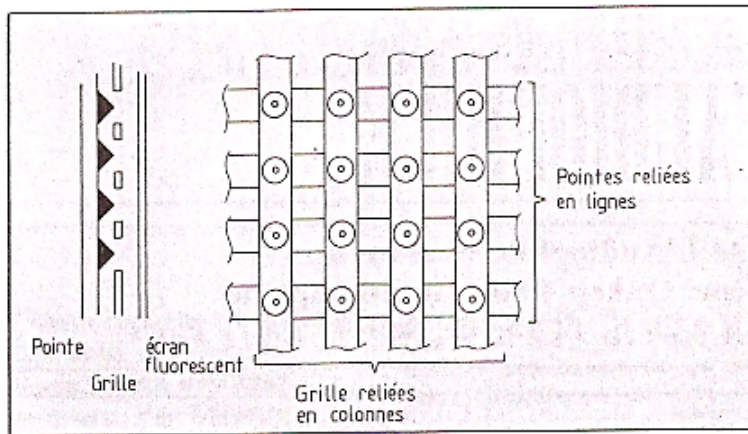


Fig. 8 : Ecran de télévision plat à pointes à émission de champ.

On trouve dans les caméras de télévision de type CCD. Dans ce schéma, les 5 millions de pointes sont reliées les unes aux autres en série, comme montré dans la figure 9.

Pour produire une image les charges sont transférées d'un condensateur à l'autre jusqu'à ce que chaque condensateur contienne la charge correspondant à l'intensité lumineuse désirée. Lorsque l'opération est terminée, les grilles, qui sont dans ce cas toutes reliées ensemble sont portées à un potentiel permettant l'extraction des électrons. L'image est formée dans son ensemble et non pas point par point comme dans un téléviseur standard. On s'approche d'une image cinéma où celle-ci apparaît d'un coup. Cette autre approche a d'autres avantages, le principal étant qu'avec la simplification extrême de la connectique, l'électronique est entièrement intégrée sur l'écran lui-même. Les bords de celui-ci sont donc libres. On peut alors imaginer construire des grands écrans en faisant un assemblage de petits écrans assemblés bout à bout comme un carrelage. Il est en effet beaucoup plus facile de fabriquer 10 petits écrans que de faire un écran 10 fois plus grand, pour à la fois des raisons techniques de dimension, mais surtout

pour un problème de rendement de fabrication.

Perspectives

Bien que les micro pointes soient connues depuis plus de 20 ans, il n'existe que très peu de réalisations industrielles. Seul S.R.I. commercialise des ensembles de plusieurs milliers de pointes pour des applications de recherche. Il n'y a pas eu encore de réalisation concrète au niveau des triodes. Par contre, depuis quelques années, des efforts ont été faits pour la télévision. Le LETI, une division du CEA, le Commissariat à l'Energie Atomique de Grenoble, a fabriqué un prototype d'écran plat noir et blanc entièrement scellé. Vidéo-color, une filiale de Thomson vient d'obtenir une licence d'exploitation de ce procédé. S.R.I. de son côté, a développé

un prototype couleur, mais installé dans un bâti à vide, et sans électronique de commande. Les Soviétiques travaillent également sur ce même type d'affichage.

D'autres applications sont en vue, on pourrait rajouter des grilles supplémentaires, et fabriquer des micro canons à électrons focalisés. Récemment, C. Spindt a réussi à percer les cônes constituant les pointes, les trous ont un diamètre de l'ordre du dixième de micron ! En faisant circuler un gaz à travers ces cônes percés, on produit une source de gaz ionisés. Les applications des sources ioniques par émission de champ sont nombreuses. En spectrométrie de masse par exemple, les molécules organiques ionisées ainsi ne se brisent pas en une multitude de fragments comme cela se passe avec l'ionisation par impact électronique, au contraire un seul électron est extrait de la molécule, et le spectre d'une molécule même complexe, n'a qu'un seul pic facile à interpréter. Pour la propulsion spatiale ionique, ces systèmes sont très utiles, car ils n'utilisent pas d'élément chauffant. D'autres applications sont possibles en particulier pour constituer des sources d'ions étendues utilisables en gravure ionique des circuits intégrés.

C'est donc tout un nouveau champ d'application qui s'ouvre et qui demandera des années de travaux avant d'aboutir à des résultats concrets. Mais le potentiel est énorme.

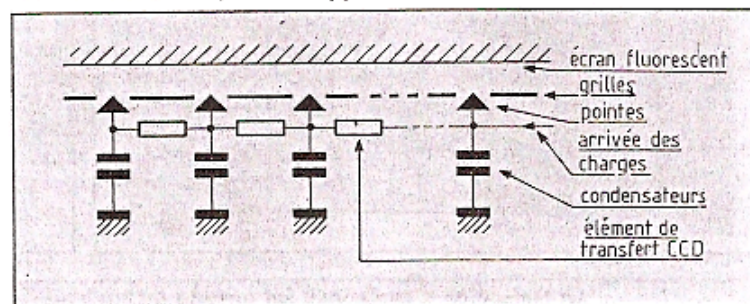


Fig. 9 : Montage avec adressage série des pointes.