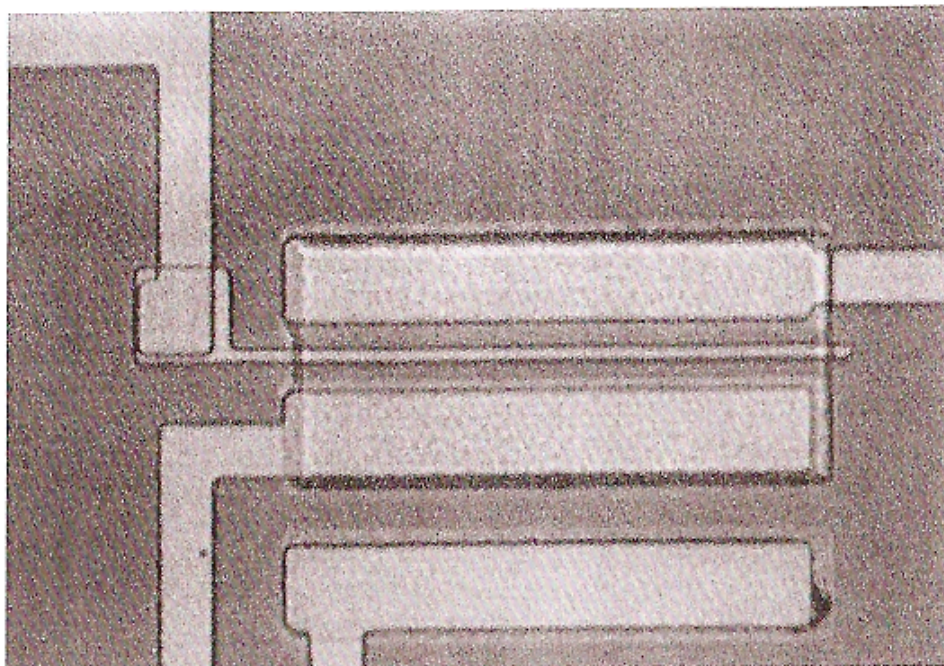


NOUVELLES TECHNOLOGIES



Transistor MESFET en arsénure de gallium en microscopie électronique. (Doc. CNET laboratoire de Bagneux).

Les colonnes III à VII du tableau périodique des éléments. On trouve le gallium Ga en colonne III et l'arsenic As en colonne V.

Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17
Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35
In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53

LES TRANSISTORS EN ARSENIURE DE GALLIUM

E

n électronique, on est passé des tubes à vide aux transistors. Ces derniers sont utilisés dans pratiquement tous les domaines sauf les télécommunications avec les tubes de puissance à haute fréquence et... à haute-fidélité. Nous avons vu, dans le n° 4 de L'Audiophile que des micro-triodes étaient maintenant en développement et pourraient avoir un avenir dans de nombreuses applications y compris, pourquoi pas, dans la Hi-Fi. Pourtant quand on parle transistors on ne pense qu'au silicium, mais ce n'est pas le seul matériau permettant de les fabriquer. En effet, depuis une quinzaine d'années, de nombreux laboratoires travaillent sur des transistors fabriqués à base d'autres éléments, en particulier l'arséniure de gallium.

Introduction

Les transistors ont été développés à partir de matériaux de type semi-conducteur ou semi-isolant qui ne laissent passer le courant que difficilement, mais lorsqu'ils sont « dopés » correctement permettent de le laisser circuler. Les premiers composants de ce type ont été élaborés à partir de germanium, puis de silicium. Ces deux éléments fai-

sant partie de la colonne IV dans le tableau périodique des éléments, ce qui signifie qu'ils ont quatre électrons périphériques. Chacun de ces électrons se lie à un électron d'un atome voisin pour former une liaison covalente. Chaque atome de silicium ou de germanium est donc relié à quatre atomes voisins. Cette structure est ce que l'on appelle également la structure diamant, car c'est ainsi que s'organisent les atomes de carbone pour cons-

tituer le diamant. La figure 1 donne une vue schématique de cette configuration (voir l'Audiophile numéro 5 pour plus de détails).

En réalité on pourrait fabriquer des transistors avec du germanium, du silicium ou du carbone sous forme diamant. On a utilisé le germanium, puis le silicium. Quant au diamant, le problème vient de la difficulté d'en fabriquer par synthèse. Mais cependant plusieurs laboratoires travaillent sur ce projet.

Une des caractéristiques des semi-conducteurs est la largeur du gap, ou de la bande interdite, c'est-à-dire de l'énergie qu'il faut donner à un électron de la bande de valence, pour l'amener dans la bande de conduction. La bande de valence est associée aux électrons liés aux atomes, tandis que ceux de la bande de conduction sont libres de se déplacer dans le matériau comme dans les métaux. Lorsque l'on passe du germanium, au silicium, puis au diamant, on a une largeur de bande interdite qui grandit. Cela permet de réaliser des applications très différentes. En particulier on pourrait imaginer en faisant un mélange carbone/silicium de fabriquer des matériaux à gap intermédiaire. C'est ce qui est réalisé avec les composés III - V.

Il est possible de réaliser des transistors avec d'autres matériaux semi-conducteurs. En particulier les composés de type III - V où un élément de la colonne III est associé à un élément de la colonne V. La colonne III est composée de: Bore, Aluminium, Gallium, Indium, et la colonne V d': Azote, Phosphore, Arsenic, Antimoine. On peut même réaliser des composants à partir des éléments des colonnes II et VI. Nous allons voir dans ce qui suit quels sont les avantages et inconvénients de ces matériaux, et nous verrons si les qualités uni-

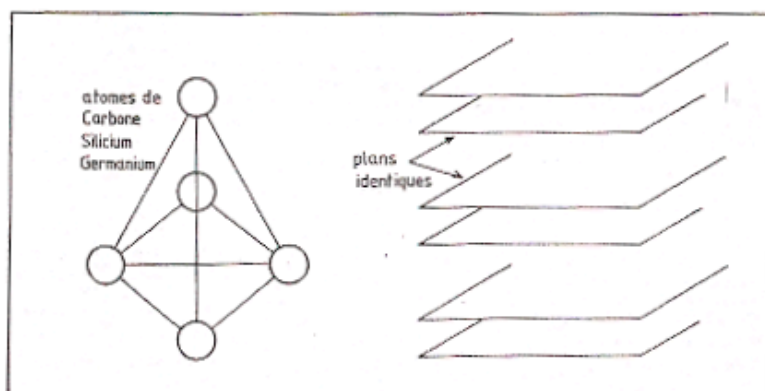


Fig. 1 : La structure diamant commune au diamant (carbone), au silicium et au germanium.

ques qui s'y rattachent permettent d'avoir des applications en haute-fidélité.

Les composés III - V

Ils ont la même structure cristalline que le diamant, donc que le silicium. La seule différence est qu'un atome sur deux est de nature différente. Le cristal a une structure lamellaire ou un plan de composé III qui est suivi d'un plan de composé V, et ainsi de suite. La figure 2 donne une vue schématique d'un tel cristal.

Deux raisons principales ont poussé au développement des transistors à base de composés III - V.

Les applications haute fréquence

Les électrons dans un matériau lorsqu'ils sont soumis à un

champ électrique atteignent une vitesse limite. C'est l'analogie de la vitesse des gouttes de pluie qui tombent et qui sont freinées par l'air. Quelle que soit la hauteur d'où tombent les gouttes d'eau, elles atteignent une vitesse limite imposée par le frottement de l'air. Les électrons sont moins freinés dans les III - V que dans le silicium.

Par exemple, la mobilité est sept fois plus grande dans le GaAs ou arséniure de gallium que dans le silicium, et 26 fois plus grande dans l'InP ou Phosphore d'indium que dans le silicium. La plus grande mobilité est évidemment dans le vide, c'est-à-dire dans les tubes à vide (voir l'Audiophile n°4 sur les microtriodes). Plus la mobilité des électrons est grande, plus les électrons se déplacent rapide-

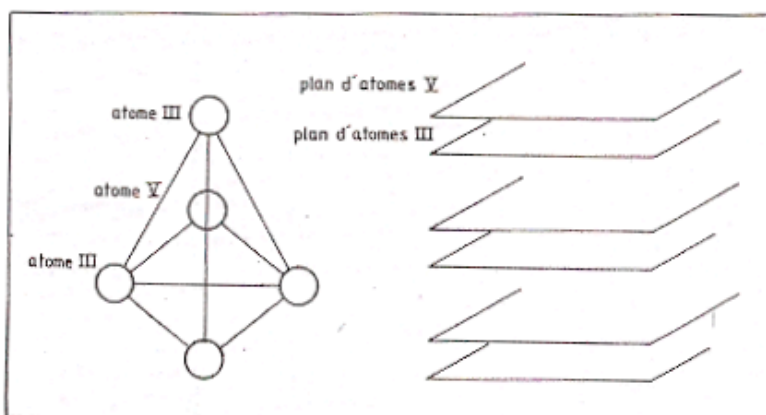


Fig. 2 : La structure cristalline des composés III-V.

ment et en conséquence la vitesse de commutation devient plus grande.

Un autre avantage des III - V est qu'ils sont plus isolants. Ceci se mesure par un gap plus élevé. Il est de 1,42 volt pour le GaAs contre 1,12 pour le silicium. Les transistors sont fabriqués localement à la surface du cristal de silicium ou de GaAs, sur une couche de quelques microns d'épaisseur. Si le substrat utilisé est isolant, il n'y a pas de perte d'électrons via le substrat. Dans le cas contraire il y a une perte d'électrons.

L'opto-électronique

A l'heure actuelle, les lasers solides sont fabriqués à partir de composés III - V, et il est intéressant pour des raisons de fiabilité, de vitesse et d'intégration de réaliser sur le même support à la fois la commande électronique, et l'émission ou la réception optique (voir l'Audiophile n°7 sur les fibres optiques).

L'épitaxie par jet moléculaire

Les circuits intégrés au silicium sont fabriqués à partir de tranches de silicium extrêmement pures. Les motifs permettant de réaliser les divers transistors sont fabriqués par une série d'opérations de masquage, de gravure, de dépôt, de diffusion ou d'implantation, d'impuretés. Pour les composés III - V, les techniques sont différentes. En particulier, il n'existe pas d'oxyde isolant qui puisse assurer l'isolation électrique comme l'oxyde de silicium pour le silicium. On ne peut donc pas créer une couche isolante par oxydation directe du substrat. Par contre les autres techniques sont identiques.

Cependant pour obtenir des propriétés très particulières, il a été développé une nouvelle technique d'épitaxie par jets moléculaires. Dans un bâti à vide où

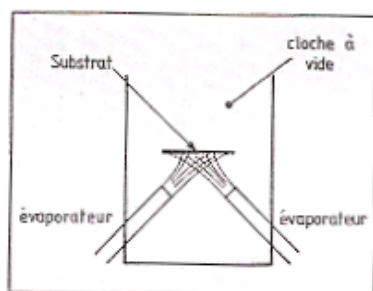


Fig. 3 : Vue schématique d'un bâti de croissance par épitaxie par jet moléculaire.

règne un vide très poussé, de l'ordre de quelques centièmes de milliardième de millibar, un substrat par exemple d'arséniure de gallium est utilisé comme support pour faire pousser des films minces avec une précision de la couche atomique, c'est-à-dire mieux que le millième de micron à la fois. Ces couches sont élaborées à partir de sources qui sont souvent des solides chauffés qui se subliment en vapeur, et en déposent sur la surface froide du substrat, à la manière de la vapeur d'eau sur le pare-brise froid. D'autres méthodes existent à partir de molécules organo-métalliques, comme l'arsine très toxique produite à partir de l'arsenic !

Ces molécules se décomposent au contact de la surface du substrat, et le métal se dépose. Ces techniques très sophistiquées, mais évidemment très chères permettent de fabriquer à la demande et d'une manière très souple, des couches avec des compositions très variées. La figure 3 donne une vue schématique d'un tel équipement.

Les superstructures

Nous avons vu que la vitesse de commutation était liée à la mobilité des électrons dans le matériau. Pour avoir des amplificateurs avec une grande bande passante, on a donc intérêt à utiliser ce genre de matériau. Une autre option est de diminuer la longueur de parcours des électrons en diminuant les largeurs

de grille des transistors. En micro-électronique silicium, on en est actuellement en dessous du micron pour les circuits à haute intégration. Ces dimensions peuvent être encore diminuées, mais il y a forcément une limite physique. On prévoit sans trop de difficultés atteindre dans les prochaines années le quart de microns, mais pour aller plus vite, il faudra trouver autre chose. Les III - V ont là un rôle à jouer. Cependant un autre phénomène apparaît dans les III - V qui va dans le même sens. En effet lorsque le champ électrique atteint des valeurs très importantes, les électrons peuvent voyager en sur vitesse, 10 fois plus vite que la vitesse maximale admissible, mais cela uniquement pendant un temps très court, de l'ordre de la picoseconde, c'est-à-dire du millionnième de seconde ! En associant les techniques de micro-électroniques aux effets de sur vitesse, on peut donc réaliser des dispositifs très rapides.

Un des problèmes rencontrés est que pour obtenir de forts courants, on est obligé d'augmenter le nombre d'atomes donneurs d'électrons, c'est-à-dire en réalité d'impuretés. Ceci a pour effet secondaire d'augmenter le nombre de pièges, et ainsi de baisser la mobilité.

Une solution intéressante a été trouvée avec le transistor à gaz d'électrons bi-dimensionnel. Dans un tel dispositif, on crée une hétéro jonction GaAlAs / GaAs. Sous certaines conditions, un champ électrique attire les électrons qui s'accumulent dans le GaAs, en couche très mince et très dense. La densité électronique est grande, alors que le nombre d'impuretés est faible.

Ce genre de transistors, est construit avec beaucoup de soins, car il s'agit de faire pousser des cristaux de paramètres cristallins, sensiblement différents les uns sur les autres sans

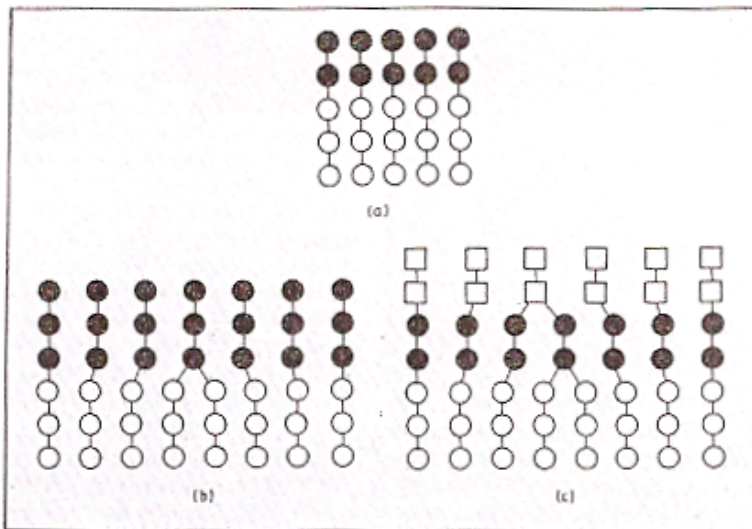


Fig. 4 : Différents modes de croissance cristalline.

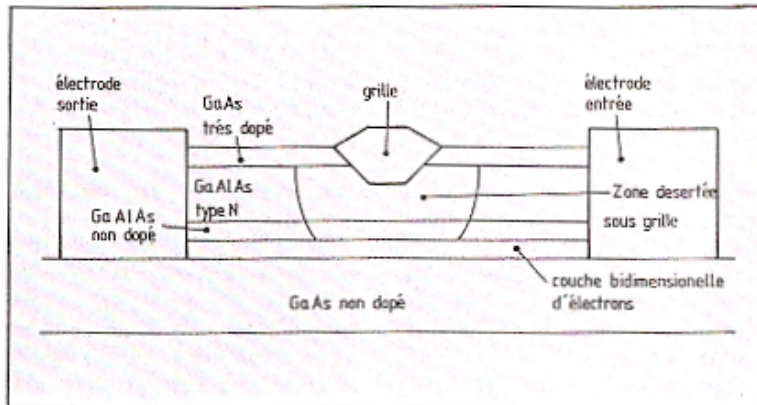


Fig. 5 : Transistor rapide en GaAs.

toutefois créer, de défauts propices à piéger les électrons. Si les paramètres cristallins entre deux matériaux sont identiques, il n'y a pas de problème à faire « pousser » un élément sur l'autre (figure 4 a). Si les matériaux ont des paramètres différents, on crée à l'interface des défauts réguliers (figure 4 b). Par contre si les paramètres ne sont que peu différents, on reste dans la limite élastique, et on peut déformer légèrement un des réseaux pour s'adapter à l'autre. En faisant un composé ternaire ou quaternaire à concentration variable, on peut passer continûment d'un réseau à un autre (figure 4 c).

Les applications audio

A l'heure actuelle il n'est pas possible de faire des amplificateurs à transistors d'aussi bonne qualité qu'avec les tubes à vide. Un point a été fait dans le numéro 8 de l'Audiophile, et il apparaît que certains des paramètres jouant un rôle important sont :

- la bande passante, et la régularité de la réponse en amplitude
- la distorsion de phase
- les bruits
- l'impédance interne

Serait-il possible d'améliorer les amplificateurs à transistors en utilisant des composants en III -

V? Il semble que oui, les raisons seraient d'une part la plus grande rapidité de ces composants due à la plus grande mobilité des électrons, ce qui assure une bande passante élevée. D'autre part le fonctionnement d'un transistor à effet de champ balistique ressemble à celui des tubes à vide. Les électrons se déplacent dans le matériau, sans interaction, à grande vitesse. Ceci devrait diminuer le bruit créé par toutes les interactions entre électrons et matière. La figure 5 donne une vue schématique d'un tel transistor.

Il se compose d'un substrat de GaAs non dopé — donc isolant — sur lequel est épitaxié un film mince de GaAlAs non dopé. Au-dessus une couche de GaAlAs dopé n, c'est-à-dire donneur d'électrons, et enfin une couche de GaAs très dopé. Les électrons provenant de la zone très dopée se retrouvent localisés dans une couche d'électrons bidimensionnelle. La densité d'électrons dans cette partie peut être très grande, mais n'interagit pas avec des défauts créés normalement par les impuretés sources d'électrons usuels, puisque ceux-ci sont produits dans une autre région. Ce dispositif se comporte comme un tube à vide.

Conclusion

Il ne semble pas qu'il y ait à l'heure actuelle d'amplificateurs audio à partir de composants en III - V. Une des raisons est probablement que jusqu'à présent les circuits développés l'ont été surtout pour l'électronique digitale, c'est-à-dire rapide, mais ne donnant aucune puissance. Dans l'avenir le but est de remplacer les tubes à vide par des composants solides, mais de puissance. Il est donc nécessaire de rester vigilant, car dans les années qui viennent, de grands progrès pourront être accomplis, et des retombées intéressantes pour l'audio se produire.